

Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
для студентов специальности 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»
специализации 1-53 01 05 01 «Автоматизированный
электропривод промышленных и транспортных
установок» дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2015

УДК 62-83(075.8)
ББК 31.291я73
Д46

*Рекомендовано научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 4 от 24.11.2014 г.)*

Рецензент: декан фак. автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *Г. И. Селиверстов*

Д46 Дипломное проектирование : учеб-метод. пособие для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» специализации 1-53 01 05 01 «Автоматизированный электропривод промышленных и транспортных установок» днев. и заоч. форм обучения / сост.: В. С. Захаренко, В. А. Савельев, М. Н. Погуляев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 68 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Содержит требования, предъявляемые к тематике, объему и оформлению дипломных проектов, рекомендации по содержанию и выполнению каждого раздела расчетно-пояснительной записки и графического материала, образцы титульного листа, задания на проект, штампов.

Для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» специализации 1-53 01 05 01 «Автоматизированный электропривод промышленных и транспортных установок» дневной и заочной форм обучения.

**УДК 62-83(075.8)
ББК 31.291я73**

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2015

Введение

Данное пособие содержит требования, предъявляемые к тематике, объему и оформлению дипломных проектов по специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» специализации 1-53 01 05 01 «Автоматизированный электропривод промышленных и транспортных установок».

Даются рекомендации по содержанию каждого раздела дипломного проекта, приводятся образцы оформления титульного листа (приложение 1), задания на дипломное проектирование (приложение 2), графиков, расчетов, списка литературы в расчетно-пояснительной записке и штампов к листам записки и чертежам. Также приводятся теоретические сведения, необходимые для выполнения типового проекта системы управления скоростью вращения электроприводом постоянного или переменного тока с частотным либо векторным управлением. Пособие ориентировано на студентов, выполняющих дипломные проекты, их руководителей, консультантов и рецензентов.

1. Организация дипломного проектирования

1.1. Цель и задачи дипломного проектирования

Целью дипломного проектирования является применение выпускником полученных при обучении на кафедре «Автоматизированный электропривод» ГГТУ им. П.О. Сухого теоретических знаний и практических навыков проектирования автоматизированных электроприводов для успешного прохождения второго этапа государственной аттестации подготовки специалистов с квалификацией «инженер-электрик» согласно ОСВО 1-53 01 05 - 2013 «Образовательный стандарт. Высшее образование. Специальность 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» через защиту дипломного проекта.

Цель достигается, если выпускник сможет решить при дипломном проектировании следующие задачи:

- уметь применять требуемые теоретические положения к решению конкретной практической инженерно-технической задачи;
- выполнять проектирование необходимого электрооборудования автоматизированной рабочей машины или технологического комплекса;
- знать и уметь использовать передовые достижения науки и техники в разработке систем автоматизированных электроприводов, автоматических средств управления рабочей машиной, блоков электропитания, защиты и сигнализации;
- конструировать узлы специального электрооборудования;
- уметь предусмотреть необходимые мероприятия, обеспечивающие охрану труда и окружающей среды по проектируемому объекту;
- иметь навыки в использовании современных методов технико-экономического анализа, с целью выбора оптимальных решений на всех этапах дипломного проектирования.

1.2. Тематика дипломного проекта

В дипломном проекте в комплексе решаются технические, экономические и организационные задачи, в основном, на конкретных материалах по электрооборудованию отечественных (импортных) промышленных установок, технологических комплексов или электротранспорта на действующем предприятии.

Дипломный проект разрабатывается исходя из перспективных направлений развития автоматизации данного производства. Его темой может быть усовершенствование имеющегося или проектирование нового автоматизированного

электрооборудования промышленной установки, технологического комплекса или электротранспорта, включающих в себя, как правило, систему электропитания, ряд автоматизированных электроприводов, логическую систему управления рабочими механизмами в соответствии с технологическим процессом, узлы и блоки защиты и сигнализации.

Кроме этого, выпускникам могут быть предложены темы дипломных проектов, связанные с научно-исследовательскими работами кафедры «Автоматизированный электропривод», темами кандидатских диссертаций аспирантов, постановкой учебно-исследовательской лабораторной базы, спецзаданиями или заказами предприятий.

1.3. Порядок работы над проектом

1.3.1. Выбор темы, составление плана работы

К дипломному проектированию студенты специальности 1-53 01 05 допускаются только при условии полного выполнения учебного плана полностью за прошедшее время обучения.

Студенту-дипломнику предоставляется право свободного выбора темы, которая закрепляется за студентом выпускающей кафедрой «Автоматизированный электропривод», что оформляется приказом по университету.

Кафедрой назначаются руководитель дипломного проекта, и консультанты по выполнению экономической части, обеспечению охраны труда и техники безопасности.

Работа студента начинается с оформления задания на проектирование, которое составляет руководитель проекта и утверждает заведующий кафедрой.

В задании указывается тема проекта, исходные данные для проектирования, перечень разрабатываемых вопросов, содержание расчетно-пояснительной записки и чертежей, фамилии консультантов по отдельным частям проекта, календарный график работы над проектом и срок представления законченного проекта на кафедру для заключения о допуске к защите.

Утвержденное заведующим кафедрой задание на дипломное проектирование (приложение 2) является официальным документом, на основании которого оценивается полнота разработки темы проекта при защите перед государственной экзаменационной комиссией.

1.3.2. Сбор материалов к проекту

Сбор материалов по теме проекта осуществляется на преддипломной практике, которая осуществляется на предприятии, предполагающем заключить с будущим специалистом контракт на инженерную работу, или на кафедре «Автоматизированный электропривод» университета.

Промышленная установка, технологический комплекс или электротранспорт, электротехнические системы автоматизации которых требуется спроектировать впервые или усовершенствовать, назначается руководством предприятия и согласовывается с руководителем преддипломной практики от кафедры.

На первом этапе дипломник собирает материалы, характеризующие рабочую машину или технологический комплекс и их электрооборудование в целом: назначение, технические параметры, конструкция, нагрузочная диаграмма в технологическом процессе, состав имеющегося электрооборудования, эксплуатационные требования, функциональные схемы и т.д.

Затем в результате критического анализа собранных материалов выявляются недостатки, имеющиеся резервы и пути решения задач проектирования. Этот этап наиболее сложный и ответственный, он определяет качество будущего дипломного

проекта, поэтому здесь дипломник постоянно консультируется с руководителем практики, работниками предприятия и преподавателями кафедры.

После принятия организационных и технических решений принципиального плана дипломник приступает к сбору материалов по научно-технической, проектной, справочной литературе, позволяющих реализовать эти решения, и начинает конкретную работу над дипломным проектом.

1.3.3. Работа над проектом

Непосредственно на дипломное проектирование по учебному плану отводится для дневной формы 13 недель, а для заочной – 11.

Рекомендуется следующая последовательность работы над проектом:

1. Систематизация, анализ и отбор материалов по каждой позиции будущего проекта, выявление необходимости дополнительных сведений, составление плана расчетно-пояснительной записки и перечня листов графической части проекта.

2. Предварительные расчеты, эскизная проработка отдельных частей проекта, формирование основных выводов и оценка их технико-экономической эффективности, сбор дополнительного справочно-нормативного материала, написание черного варианта расчетно-пояснительной записки и составление эскизного варианта графической части.

3. Обоснование, уточнение и оформление окончательных проектных решений, завершение расчетов, доработка расчетно-пояснительной записки и чертежей.

4. Литературная обработка и чистовое написание расчетно-пояснительной записки, оформление начисто графического материала.

1.4. Руководство и консультации при дипломном проектировании

Всю ответственность за правильность принятых в проекте решений, качество и своевременное выполнение дипломной работы несет студент-дипломник.

Для оказания помощи ему при подготовке дипломного проекта назначаются руководитель проекта и консультанты по экономической части, разделу охраны труда и техники безопасности.

Руководитель проекта:

а) выдает задание на проектирование (приложение 2) и составляет график его выполнения по этапам;

б) осуществляет систематическое наблюдение и контроль за выполнением графика работ, информирует заведующего кафедрой о возникших отклонениях от графика;

в) определяет первичный материал, который должен быть собран во время преддипломной практики;

г) рекомендует перечень основной литературы, необходимой для разработки проекта;

д) проверяет по разделам и в целом содержание и оформление расчетно-пояснительной записки и графической части, проводит предварительный нормоконтроль, дает необходимые консультации и указания.

Консультанты по отдельным частям проекта дают студенту руководящие указания по принципиальным вопросам, рекомендуют список специальной технической и справочно-нормативной литературы, ведут контроль за ходом выполнения соответствующих частей проекта по разработанному ими календарному графику.

В процессе работы над проектом комиссия консультантов во главе с руководителем проекта проводит 2 – 3 проверки выполнения установленного объема работ. Итоги проверки сообщаются заведующему кафедрой и декану, которые принимают конкретные меры по обеспечению своевременного и качественного выполнения проектов.

Законченный дипломный проект (записка и чертеж) подписываются последовательно дипломником, консультантами, руководителем проекта и заведующим кафедрой.

После этого проект вместе с отзывом руководителя за 10 дней до начала работы Государственной экзаменационной комиссии, назначаемой Министерством образования Республики Беларусь, представляется на выпускающую кафедру для заключения о допуске дипломника на защиту.

1.5. Рецензирование и защита дипломного проекта

Не позднее, чем за 5 дней до начала работы государственной экзаменационной комиссии допущенный к защите дипломный проект вместе с отзывом руководителя направляется на рецензирование.

Отзыв руководителя должен содержать:

1. Сведения о причине постановки темы дипломного проекта, его цели и реальности.
2. Характеристику работы дипломника над проектом, оценку его квалифицированности, творческой инициативы, умения принимать правильные технические решения.
3. Перечень положительных и отрицательных сторон проекта, причины возникновения последних.
4. Оценку качества оформления расчетно-пояснительной записки и графической части, их соответствие требованиям ЕСКД.
5. Отзыв о проекте и дипломнике в целом, рекомендации по использованию проекта на производстве.
6. Оценку проекта.

В состав рецензентов, утверждаемый приказом ректора университета, включаются высококвалифицированные работники промышленных предприятий, научно-исследовательских и проектных институтов, специалисты высших учебных заведений.

Рецензент составляет рецензию, в которой должно содержаться:

1. Заключение о соответствии дипломного проекта техническому заданию по содержанию и объему, а также соответствия тематике специальности 1-53 01 05.
2. Характеристику выполнения каждого раздела проекта, оценку использования последних достижений науки, техники и глубины технико-экономического обоснования принятых проектных решений.
3. Оценку качества оформления расчетно-пояснительной записки и графической части, их соответствие требованиям ЕСКД.
4. Перечень положительных и отрицательных качеств проекта.
5. Отзыв о проекте в целом, вывод о возможности его использования на производстве.
6. Оценку проекта.

Защита проекта производится на заседании ГЭК. Вначале секретарь ГЭК оглашает оценки, выставленные в отзыве руководителя и рецензии. Затем дипломант в течение 15...20 минут делает доклад о проделанной работе, подтверждая его обращениями к графическому материалу и расчетно-пояснительной записке. Затем зачитываются замечания по рецензии на проект и предоставляется слово дипломнику для ответа на замечания.

После этого члены ГЭК и присутствующие на защите задают дипломанту вопросы по теме проекта, а также по любому разделу учебного плана подготовки инженера-электрика по специальности 1-53 01 05.

После окончания защиты всех дипломных проектов на открытом заседании ГЭК объявляются оценки работ дипломников.

Студентам, получившим положительные оценки, Государственная экзаменационная комиссия присваивает квалификацию инженера-электрика.

Оценка и решение ГЭК о присвоении квалификации оформляется приказом ректора по университету, после чего дипломнику вручается диплом об окончании Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого.

2. Содержание дипломных проектов

2.1. Объем расчетно-пояснительной записки и графического материала

Дипломный проект выполняется в виде расчетно-пояснительной записки, в которой излагается текстовая часть проекта, и комплекта чертежей, которые представляют графический материал проекта.

Расчетно-пояснительная записка должна иметь объем не менее 60 листов формата А4, а графический материал – не менее 6 листов формата А1.

2.2. Содержание расчетно-пояснительной записки

Рекомендуется расчетно-пояснительную записку типового дипломного проекта выполнять по следующим основным разделам, раскрывающим последовательность и результаты проектирования.

2.2.1. Введение

Исходя из общей хозяйственно-экономической ситуации в Республике Беларусь, дипломник четко определяет актуальность темы дипломного проекта, формулирует его цель и задачи.

2.2.2. Анализ технического задания на дипломное проектирование

На основе описания рабочей машины и ее основного технологического процесса дипломник получает дополнительные сведения, необходимые для проектирования и технические показатели рабочей машины: условия эксплуатации ее электрооборудования (климатические, механические, радиационные и другие воздействия); задачи, режимы работы и требования к конструктивному оформлению электроприводов, систем электропитания, управления, защиты и сигнализации и т.д.

2.2.3. Выбор системы основного электропривода главного механизма рабочей машины

Расчет нагрузочной диаграммы механизма.

Расчет производится по параметрам наиболее энергоемкого технологического процесса, кинематической схеме механического преобразователя (редуктора) рабочей машины и результатам анализа технического задания (п. 2.2.2).

Предварительный расчет мощности электродвигателя главного привода.

По нагрузочной диаграмме, исходя из условий допустимого нагрева, требуемого числа повторных включений и перегрузочной способности, осуществляют предварительный расчет требуемой мощности электродвигателя.

Выбор системы электропривода.

По результатам анализа технического задания и расчета мощности электродвигателя дипломник выбирает несколько систем электроприводов, пригодных для данной рабочей машины. Техничко-экономический анализ их показателей приводит к выбору одной системы электропривода, которая далее и будет проектироваться.

Выбор типоразмера электродвигателя.

Для выбранной системы электропривода, исходя из нагрузочной диаграммы механизма и требуемой мощности, выбирается типоразмер электродвигателя, строится его нагрузочная диаграмма и проводится проверка по нагреву и перегрузочной способности.

2.2.4. Выбор силового электрооборудования электропривода

В данном разделе осуществляется выбор комплектного электропривода, преобразователя. А также, при необходимости, трансформатора, дросселей и другого электрооборудования силовых цепей питания обмоток электродвигателя. Рассчитываются параметры силовой цепи, а также коэффициенты передачи и постоянные времени электрооборудования.

2.2.5. Синтез и анализ системы электропривода

Синтез функциональной схемы электропривода.

По заданным основным статическим и динамическим показателям формируется функциональная схема привода: задается принцип регулирования (по отклонению, возмущению или комбинированный), назначаются необходимые контуры регулирования, обратные связи, каналы компенсации возмущений. При проектировании не на основе комплектного серийного электропривода выбираются основные стандартные элементы: задающие устройства, датчики обратных связей и т.д. Рассчитываются коэффициенты передачи, постоянные времени и точность элементов.

Синтез системы автоматического управления.

Выбираются критерии обеспечения показателей качества управления электроприводов и на их основе синтезируются сначала структурные схемы и передаточные функции регуляторов. Затем для аналоговых электроприводов синтезируются принципиальные электрические схемы регуляторов, задатчиков интенсивности, узлов ограничения, логических блоков адаптации и т.д. Для электроприводов с микропроцессорным управлением разрабатывается алгоритм управляющей программы.

Анализ статической точности системы электропривода.

Рассчитываются статические характеристики электропривода и, с учетом погрешностей элементов системы управления и параметров кинематической цепи, определяется точность работы механизма по скорости и (или) позиционированию.

Если заданные требования по точности не выполняются, то предыдущая часть проекта корректируется.

Анализ динамики электропривода.

С помощью ЭВМ рассчитываются переходные процессы «в малом» и «в большом» за один рабочий цикл рабочей машины.

Анализируя переходные характеристики, выявляют динамические показатели: время переходных процессов, перерегулирование, величины бросков тока, момента, ускорение и т.д. Время переходных процессов по управлению и перерегулирование определяется по диаграмме основной регулируемой координаты переходного процесса «в малом». Время переходного процесса по возмущению определяется для переходного процесса «в малом» по диаграмме переменной, которая компенсирует воздействие возмущения (например, для процесса по моменту сопротивления длительность определяется по диаграмме тока или момента двигателя).

При несовпадении динамических показателей с требуемыми по заданию, предыдущая часть проекта корректируется.

Окончательная проверка правильности выбора типоразмера электродвигателя.

С учетом диаграмм переходных процессов уточняется нагрузочная диаграмма и производится окончательная проверка выбранного типоразмера электродвигателя по нагреву и перегрузочной способности.

При необходимости выбирается другой типоразмер двигателя и расчет повторяется.

2.2.6. Выбор систем вспомогательных электроприводов рабочей машины

Выбор осуществляется по общим рекомендациям, исходя из требований задания и результатов его анализа.

2.2.7. Синтез функциональной схемы управления рабочей машиной

Основываясь на требованиях технологического процесса рабочей машины разрабатывают релейную или логическую схему управления, которая должна обеспечивать согласование работы всех механизмов во времени и пространстве, защиту электрооборудования в аварийных режимах, сигнализацию о прохождении рабочего процесса в аварийных ситуациях.

Здесь же выбирают по известным инженерным рекомендациям типовые элементы и узлы электрооборудования, необходимые для реализации схемы управления рабочей машиной.

2.2.8. Конструкторская разработка узла с электрооборудованием рабочей машины

В соответствии с заданием на проект разрабатывается конструкция панели или пульта управления, силового шкафа, кинематического специального узла и т.д.

При этом осуществляется выбор унифицированных элементов, размещение их, удобное для эксплуатации и ремонта, выполняются требования техники безопасности и экологии.

2.2.9. Мероприятия по обеспечению техники безопасности

Этот раздел выполняется по заданию и под руководством консультанта данного раздела. В нем должны быть решены вопросы охраны труда и электробезопасности при обслуживании рабочей машины, а также осуществлена проверка правильности выбора защитной аппаратуры в п. 2.2.7.

2.2.10. Экономическая проработка проекта

Этот раздел выполняется по заданию и под руководством консультанта данного раздела. Он должен содержать экономическое обоснование принятых технических решений, расчет капитальных вложений на приобретение и монтаж электрооборудования рабочей машины, разработку графиков планово-предупредительных ремонтов электрооборудования, расчет годового фонда зарплаты и т.д. Техничко-экономические показатели сводятся в общую таблицу, которая представляется как в расчетно-пояснительной записке, так и на листе графической части проекта.

2.2.11. Мероприятия по ресурсо- и энергосбережению

В данном разделе по заданию и под руководством руководителя дипломного проекта производится проработка вопросов энергосбережения и ресурсосбережения при эксплуатации рабочей машины, электропривод которой разрабатывается в ходе дипломного проектирования. Либо приводится обоснование (при модернизации электрооборудования существующей технологической установки) того, что

проектируемый вариант электропривода выгоднее с точки зрения указанных целей базового варианта.

2.2.12. Принципиальная электрическая схема электрооборудования и спецификация ее элементов

В этом разделе обобщается вся проделанная при проектировании расчетно-графическая работа, которая представляется в виде общей принципиальной схемы и спецификации элементов электрооборудования рабочей машины. Кратко описывается принцип действия и назначение элементов схемы.

2.2.13. Заключение

Здесь содержатся окончательные выводы, характеризующие результат работы дипломника в достижении поставленной цели и решении задач проектирования.

Подчеркиваются достоинства и технико-экономические преимущества принятых решений перед возможными другими вариантами, указываются перспективы использования проекта в производстве и намечаются пути его усовершенствования.

2.2.14. Литература

Пронумерованный список литературы включает только те источники, которые использовались в проекте. Он составляется в той последовательности, в которой были ссылки на источники в расчетно-пояснительной записке.

2.3. Содержание графического материала

Рекомендуется графическую часть типового дипломного проекта выполнять в виде следующих чертежей:

1. Общий вид рабочей машины с расположением электроприводов, шкафов с электрооборудованием, пультов управления и т.д. – 1 лист.
2. Техничко-экономические показатели электрооборудования рабочей машины – 1 лист.
3. Принципиальная электрическая схема основного разработанного электропривода для аналогового электропривода – 1 – 2 листа. Или для электропривода с микропроцессорным управлением: принципиальная электрическая схема – 1 лист, блок-схема алгоритма управляющей программы – 1 лист.
4. Статические и динамические характеристики основного электропривода: уточненная нагрузочная диаграмма, логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики, статические характеристики, кривые переходных процессов – 1 – 2 листа.
5. Принципиальная электрическая схема всего электрооборудования рабочей машины – 1 – 2 листа.
6. Конструкция одного из узлов электрооборудования (силовой шкаф, пульт управления, кинематический узел и т.д.) – 1 лист.

Кроме перечисленного, графический материал полезно дополнить плакатами, улучшающими и облегчающими доклад на защите дипломного проекта: фотографии макета и экспериментальные осциллограммы спецузла электропривода и т.д.

3. Оформление дипломных проектов

3.1. Общие требования к оформлению пояснительной записки

Текст пояснительной записки может быть выполнен одним из следующих способов:

- рукописным чертежным шрифтом по ГОСТ 2.304-81 черной тушью (черная паста или чернила);
- с применением печатающих и графических устройств вывода ЭВМ (ГОСТ 2.004-88).

При выполнении записки с применением печатающих и графических устройств вывода ЭВМ должны быть выдержаны следующие обязательные требования:

- тип шрифта во всём документе Times New Roman (в формулах – шрифт с засечками – Times New Roman или Cambria Math);
- размер шрифта во всём документе включая заголовки – 14 пт. (исключение могут составлять таблицы и графики);
- межстрочный интервал – 1,5;
- выравнивание текста по ширине (за исключением формул и рисунков);
- отступ первой строки абзаца (в т.ч. заголовков, кроме текста таблиц) 1,25 см.;
- не допускается вставка нераспознанного текста в виде картинок;
- формулы следует набирать в редакторе формул Equation 3.0 или в формате MathML (редактор формул в MS Office начиная с версии 2007), **но в одном и том же по всей записке**. Тип шрифта и размер символов в формулах должен соответствовать типу и размеру шрифта в тексте записки;
 - в формулах для разделения дробной и целой части должна использоваться десятичная запятая (**не точка!**);
 - не допускается оставлять пустые строки между абзацами;
 - интервал перед и после абзаца – 0 пт.;
 - в обозначении единиц измерения для обозначения умножения не допускается использования символов «*» и «x», необходимо использовать символ «·»;
 - в тексте записки должен быть установлен автоматический перенос;
 - качество напечатанного текста и оформления иллюстраций, таблиц, распечаток должно удовлетворять требованию их четкого воспроизведения;
 - при выполнении работы необходимо соблюдать равномерную плотность, контрастность и четкость изображения по всей работе. В работе должны быть четкие, не расплывшиеся линии, буквы, цифры и знаки;
 - опечатки, опiski и графические неточности, обнаруженные в процессе подготовки проекта, допускается исправлять подчисткой или закрашиванием белой краской и нанесением на том же месте исправленного текста (графики) машинописным способом или черными чернилами, пастой или тушью – рукописным способом;
 - дипломный проект оформляется в жесткий переплет.

Пример расположения текста пояснительной записки на листе формата А4 писчей бумаги должно соответствовать рис. 3.1 – 3.2.

Материал пояснительной записки разбивается на разделы и подразделы, при необходимости – на пункты и подпункты.

Разделам присваиваются порядковые номера в пределах всей пояснительной записки. Обозначают их арабскими цифрами без точки. Наименование разделов должно быть кратким, соответствовать содержанию и записываться в виде заголовка (в красную строку) с прописной буквы, без точки в конце и без подчеркивания. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой. Каждый раздел начинается с нового листа. Не допускается запись заголовков к разделам на отдельных листах без текста.

Расстояние между заголовком и текстом при выполнении документа машинописным способом должно быть равно 15 мм. Расстояние между заголовками раздела и подраздела – 8 мм. Для подразделов расстояние между последней строкой текста и последующим заголовком должно быть не менее 15 мм.

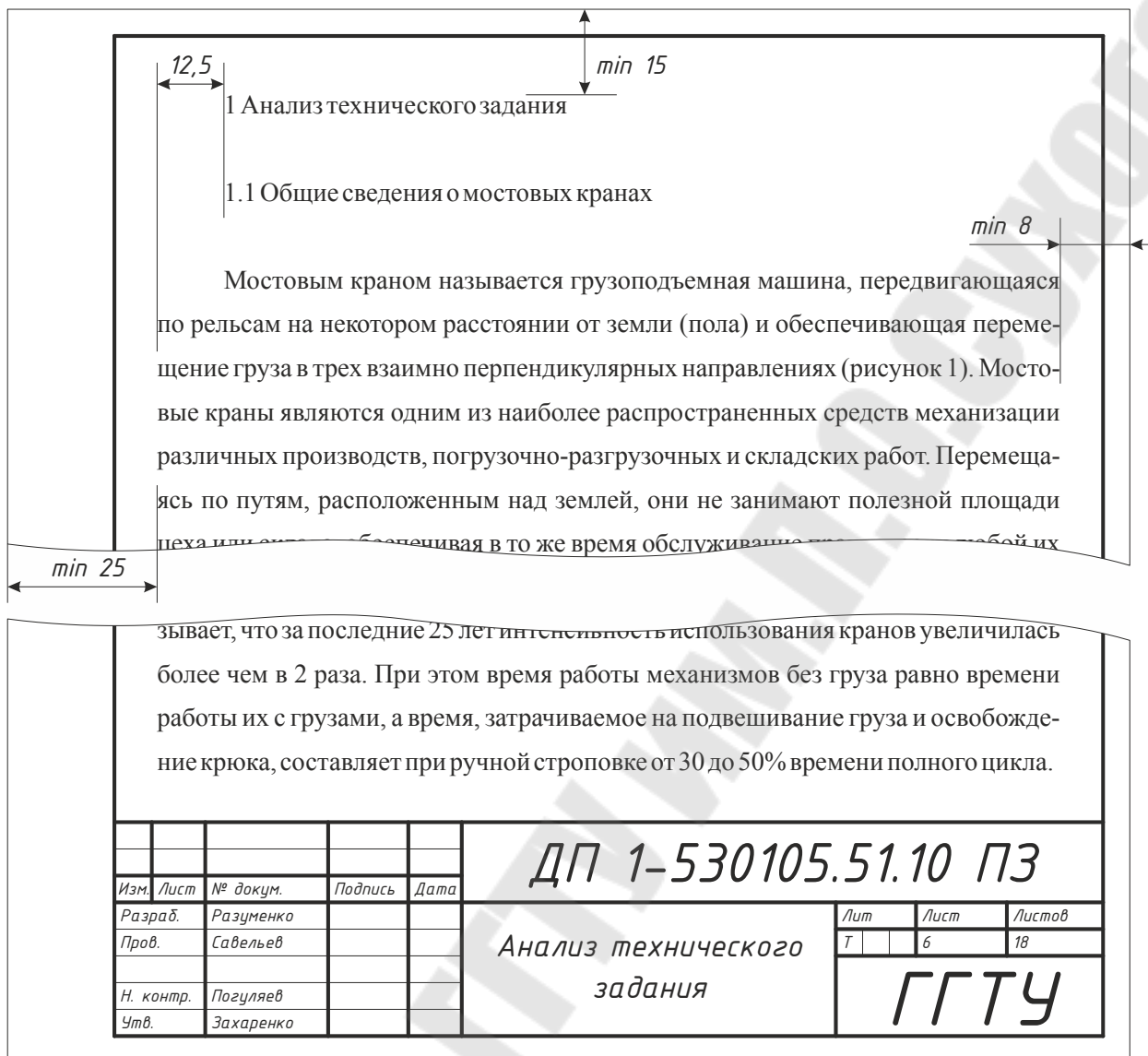


Рис. 3.1. Пример расположения текста пояснительной записки (первый лист раздела).

Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. В конце номера подраздела точка не ставится. Заголовки к подразделам пишутся так же, как заголовки к разделам.

Нумерация пунктов проставляется в пределах подраздела или раздела; номер пункта составляется из номера раздела, подраздела и пункта, разделенных точками. В конце номера пункта точка не ставится (см. рис. 3.1).

Пункты могут быть разбиты на подпункты, которые должны иметь порядковую нумерацию в пределах каждого пункта, например: 3.2.1.1, 3.2.1.2, 3.2.1.3 и т.д.

Внутри пунктов или подпунктов могут быть приведены перечисления.

Перед каждой позицией перечисления следует ставить дефис или **(при необходимости ссылки)** в тексте документа на одно из перечислений) строчную букву, после которой ставится скобка. Для дальнейшей детализации перечислений необходимо использовать арабские цифры, после которых ставится скобка, а запись производится с абзацного отступа (красной строки). Каждый пункт, подпункт и перечисление записывают с абзацного отступа (рис. 3.3).

Вводную часть дипломного проекта помещают перед первым разделом пояснительной записки без нумерации.

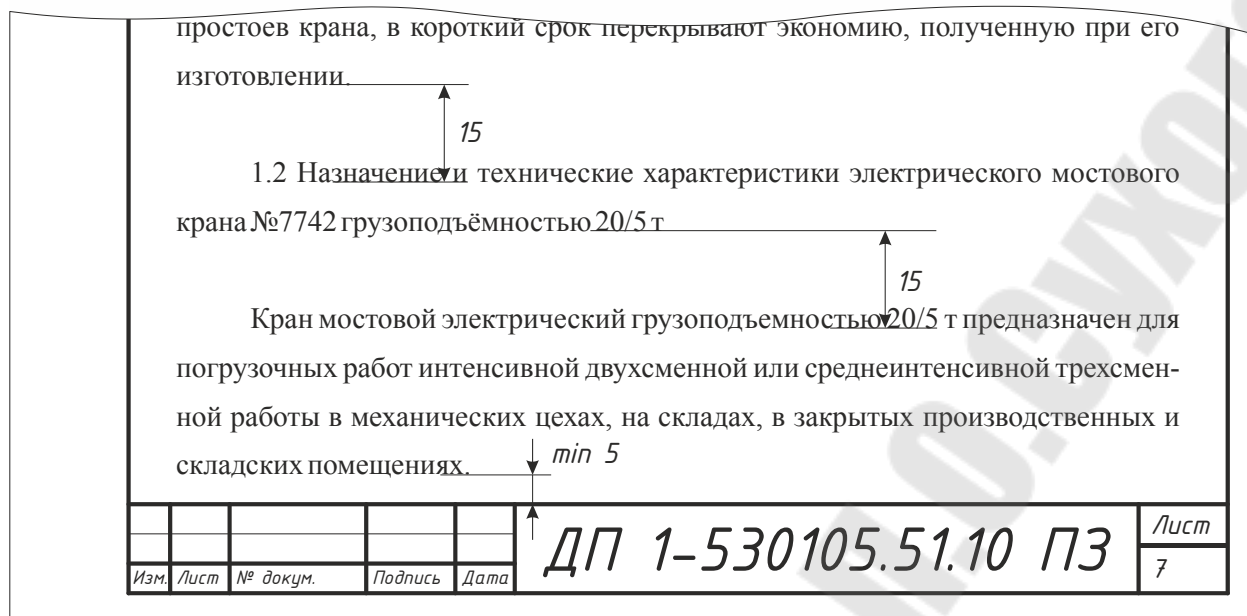


Рис. 3.2. Пример расположения текста пояснительной записки (последующие листы раздела).

Первым листом пояснительной записки является титульный лист, выполняемый типографским способом. Образец титульного листа к дипломному проекту приведен в приложении 1. Далее, после листа задания (печатается с двух сторон одного листа, пример приведен в приложении 2), помещается лист содержания пояснительной записки, на котором указываются номера разделов, подразделов и их наименования, а также проставляются номера листов, соответствующие их началу.

Титульный лист и лист с содержанием включаются в общее число листов пояснительной записки, но на титульном листе его номер (первый) не проставляется. В конце пояснительной записки помещаются листы со списком использованной литературы, который оформляется аналогично списку литературы в данном пособии.

При обращении к тому или иному литературному источнику в тексте пояснительной записки делаются ссылки на прилагаемый список литературы.

Полное наименование изделия на титульном листе, в основной надписи и при первом упоминании в тексте пояснительной записки должно совпадать с наименованием на структурной и принципиальной схемах, на сборочном чертеже и других конструкторских документах.

В последующем тексте порядок слов в наименовании должен быть прямой, т.е. на первом месте должно быть определение (имя прилагательное), а затем – название изделия (имя существительное); при этом допускается употреблять сокращенное наименование изделия. Например, «Каскад предварительного усиления (КПУ) усиливает слабые сигналы до уровня, необходимого для возбуждения выходного каскада. Работает КПУ в режиме класса А, т.е. на линейном участке коллекторных характеристик транзистора».

Наименования, приводимые в тексте документа и на иллюстрациях, должны быть одинаковыми. Изложение содержания пояснительной записки должно быть кратким и четким. В тексте документа не допускается применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы; нельзя также применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии и соответствующими межгосударственными и государственными стандартами (ГОСТ 2.316-68, ГОСТ 7.12-70, РД РБ 0410.42-95).

	<p>- улучшение условий труда обслуживающего персонала.</p> <p>Экономический эффект от внедрения преобразователей частоты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - экономия электрической энергии благодаря оптимизации работы составляет в среднем по объектам 30 - 60 %; ← 12,5 → - увеличение срока службы оборудования в 1,5 - 2 раза: <ul style="list-style-type: none"> ← 12,5 → 1) сроки окупаемости инвестиций не превышают двух лет; 2) частичную или полную автоматизацию работы за счет модульной структуры системы; 3) экономию электроэнергии (в т.ч. полностью исключить потребление реактивной мощности из электросети); - более высокую безопасность и надежность работы - исключение аварийных ситуаций за счет субъективных факторов (нарушение технологий); - резкое сокращение объема эксплуатационных, удельных капитальных и ремонтно-восстановительных затрат. <p>Энергосберегающих технологий много, эффективность их зависит от мно-</p>
	<p>е) улучшение условий труда обслуживающего персонала.</p> <p>Экономический эффект от внедрения преобразователей частоты:</p> <ul style="list-style-type: none"> а) экономия электрической энергии благодаря оптимизации работы составляет в среднем по объектам 30 - 60 %; б) увеличение срока службы оборудования в 1,5 - 2 раза: <ul style="list-style-type: none"> 1) сроки окупаемости инвестиций не превышают двух лет; 2) частичную или полную автоматизацию работы за счет модульной структуры системы; 3) экономию электроэнергии (в т.ч. полностью исключить потребление реактивной мощности из электросети); в) более высокую безопасность и надежность работы - исключение аварийных ситуаций за счет субъективных факторов (нарушение технологий); г) резкое сокращение объема эксплуатационных, удельных капитальных и ремонтно-восстановительных затрат. <p>Энергосберегающих технологий много, эффективность их зависит от мно-</p>

Рис. 3.3. Примеры оформления списков.

Если в документе приводятся поясняющие надписи, наносимые непосредственно на изготавливаемое изделие (например, на планки, таблички к элементам управления и т.п.), их выделяют шрифтом (без кавычек), например, ВКЛ, ОТКЛ, или кавычками, если надпись состоит из цифр и знаков. Наименования команд, режимов, сигналов и т.п. в тексте пояснительной записки следует выделять кавычками, например, «Сигнал +27 включено».

Условные буквенные обозначения механических, химических, математических и других величин, а также условные графические обозначения должны соответствовать

установленным стандартам. В тексте пояснительной записки перед обозначением параметра дают его пояснение.

В пояснительной записке следует применять стандартизованные единицы физических величин, их наименования и обозначения в соответствии с ГОСТ 8.417-81. Если в тексте приводится ряд числовых значений, выраженных в одной и той же единице физической величины, то ее указывают только после последнего числового значения. Так же обозначают и диапазон числовых значений физических величин.

В формулах в качестве символов следует применять обозначения, установленные соответствующими стандартами. Пояснения каждого символа и числовых коэффициентов, входящих в формулу, должны быть приведены непосредственно после формулы. Пояснения каждого символа следует давать с новой строки в той последовательности, в какой они приведены в формуле. Первая строка пояснения должна начинаться со слова «где» без двоеточия после него.

Формулы, следующие одна за другой и не разделенные текстом, разделяют запятой; их нумеруют арабскими цифрами, которые записывают на уровне формулы справа в круглых скобках. Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в скобках, например: «в формуле (1)...».

Допускается нумерация формул в пределах раздела, например, (2.1), как на рис. 3.4.

На основании этих расчётов строим упрощенную скоростную диаграмму механизма передвижения крана (рисунок 2.1). Теперь рассчитаем статическую силу при движении крана с номинальным грузом

$$F_{cl} = \frac{K_p \cdot (m_{кр} + m_{ном}) \cdot g \cdot (\mu \cdot r_{ц} + f + \beta)}{R_k \cdot \eta_{п.ном}}, \quad (2.1)$$

где $K_p = 1,5$ – коэффициент, учитывающий сопротивление от трения реборд о рельсы и от трения токосъёмников о троллеи;

$m_{кр}$ – масса крана без груза, кг;

$m_{ном}$ – масса номинального груза, кг;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

$\mu = 0,01$ – коэффициент трения качения в подшипниках колес;

$r_{ц}$ – радиус цапфы, м;

$f = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – коэффициент трения качения ходовых колес;

Рис. 3.4. Пример оформления формул.

В тексте пояснительной записки должны быть ссылки на используемую литературу, на стандарты и другие документы. Ссылаться необходимо на документ или его разделы и приложения. Ссылки на подразделы, пункты, таблицы и иллюстрации не допускаются, за исключением подразделов, пунктов, таблиц и иллюстраций пояснительной записки дипломного проекта.

3.2. Оформление иллюстраций (рисунков, графиков) и таблиц

Иллюстрации пояснительной записки могут быть расположены как по тексту документа (возможно ближе к соответствующим частям текста), так и в конце его. Для иллюстраций внешнего вида, приемов сборки, монтажа и т.п. разрешается использовать

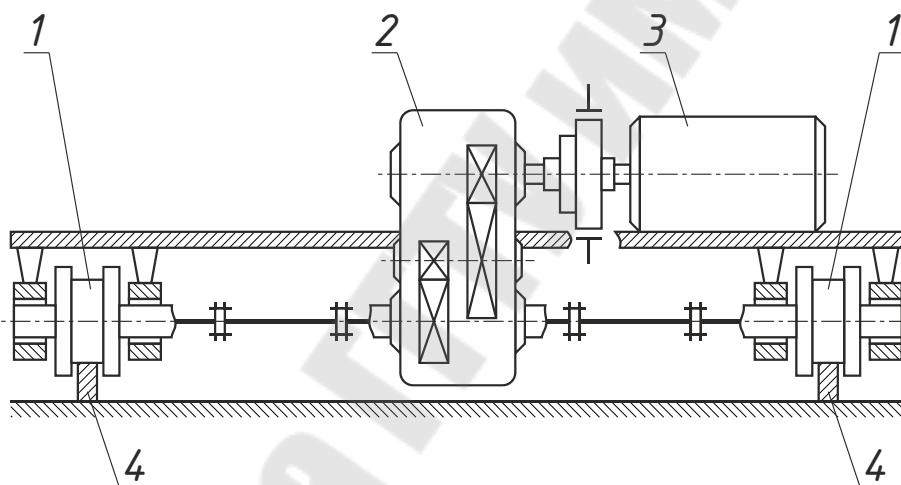
фотоснимки с натуры, которые должны быть приклеены на плотную белую бумагу. В качестве иллюстраций могут быть использованы различного рода рисунки, схемы и графики, выполняемые в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД и ЕСПД карандашом, черными чернилами (тушью) или пастой на бумаге формата А4. Иллюстрации, за исключением иллюстраций приложений, нумеруют арабскими цифрами сквозной нумерацией (Рисунок 1, Рисунок 2). Допускается нумеровать иллюстрации в пределах раздела (Рисунок 1.1, Рисунок 1.2).

Иллюстрации каждого приложения сопровождаются отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначения приложения (Рисунок А.1 и др.).

При ссылках на иллюстрации в пояснительной записке следует писать «... в соответствии с рисунком 2 ...» при сквозной нумерации и «... в соответствии с рисунком 1.2 ...» при нумерации в пределах раздела.

Иллюстрации могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисуночный текст). Слово «Рисунок» и наименование помещают после пояснительных данных и располагают таким образом, как показано на рис. 3.5.

ки по рельсам 4. При движении тележки возникают силы трения между колесами и рельсами, в подшипниках колес и редукторе.



1 – колеса; 2 – редуктор; 3 – двигатель; 4 – рельсы.

Рисунок 1.2 – Кинематическая схема электропривода тележки

Грузовая тележка перемещается по мосту крана. Механизм передвижения тележки по рельсам 4. При движении тележки возникают силы трения между колесами и рельсами, в подшипниках колес и редукторе.

Рис. 3.5. Пример оформления подрисуночной надписи.

Если в тексте записки есть ссылки на составные части изделия, то на иллюстрациях они должны иметь номера позиций, располагающихся в возрастающем порядке, а для электро- и радиоэлементов – позиционные обозначения, установленные в схемах данного изделия. Исключение составляют электро- и радиоэлементы, являющиеся органами регулировки или настройки, для которых (кроме номера позиции) дополнительно указывают в подрисуночном тексте назначение каждой регулировки и настройки, позиционное обозначение и надписи на соответствующей планке или панели.

Требования к оформлению графиков устанавливаются ГОСТ 1.5-93.

На координатных осях графиков указываются буквенные обозначения параметров (K , $\lg f$ и т.д.), их размерность и числовые значения. Числовые значения, их параметры и размерность проставляются на одном уровне. Между параметрами и размерностью ставится запятая.

Как правило, графики вычерчиваются с нанесением координатной сетки, шаг которой лежит в пределах от 5 до 10 мм. Толщина линии сетки равна примерно половине толщины линии оси координат.

Если на поле графика необходимо поместить надпись (например, 1-я цепь, 2-я цепь), то на месте ее расположения координатную сетку не наносят, как на рис. 3.6.

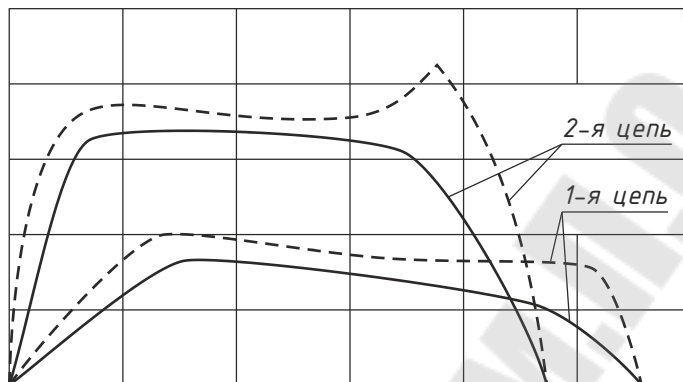


Рис. 3.6. Пример размещения надписи в поле графика.

При невозможности замены названий параметров, записываемых на осях, буквенными обозначениями (символами) вдоль осей записывают полные названия параметров, как на рис. 3.7.

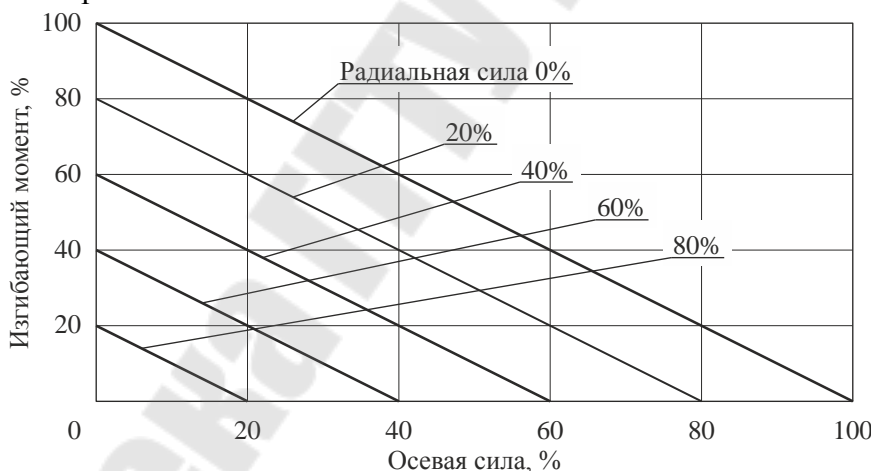


Рис. 3.7. Пример обозначения параметров на графиках.

Цифровой материал, как правило, оформляют в виде таблиц, которые вычерчивают в соответствии с нижеприведенным образцом.

Таблицы должны быть пронумерованы арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела. В этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой, как показано на рис. 3.8.

Графа «Номер по порядку» в таблицу не включается. При необходимости нумерации показателей, параметров или других данных в боковике таблицы порядковые номера указывают в этой графе перед их наименованием.

Рисунок 1.3 – Чертеж общего вида кранового крана КМ80 г/п 80/20 т

Таблица 1.1 - Основные параметры и характеристики крана

Наименование показателей	Обозначение	Значение
Грузоподъемность номинальная, т	$m_{НОМ1}/m_{НОМ2}$	80/20
Наибольшая высота подъема груза, м	H	11
Скорость подъема груза, м/мин	v_1	13,4±1
Скорость передвижения тележки, м/мин	v_2	19,8±1
Скорость плавной посадки груза, м/мин	v_3	12,0±1
Скорость передвижения крана, м/мин	$v_{МАХ}$	51,0±2

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ДП 1-530105.51.10 ПЗ	Лист
						11

Продолжение таблицы 1.1

Пониженная скорость передвижения крана, м/мин	$v_{ПОН}$	7,2±0,36
Длина пролета, м	l	35
Масса крана, т	$m_{КР}$	30,5

Рис. 3.8. Пример оформления таблицы.

3.3. Оформление графических документов

В зависимости от специфики темы проекта графическая часть может содержать те или иные графические документы, приведенные в таблице 3.1. Кроме документов, перечисленных в этой таблице, графическая часть проекта может включать схемы технологических процессов, графики различных зависимостей, иллюстрации по использованию разрабатываемого оборудования, схемы измерений и контроля конструкции и т.д.

На графических документах выполняется рамка. Слева – поле 20 мм, с остальных сторон – по 5 мм. Основная надпись располагается в правом нижнем углу вплотную к рамке.

Основная надпись графических документов должна соответствовать ГОСТ 2.104-2006. Если конструкторский документ (чертеж, схема) выполнен на одном листе, то основная надпись выполняется по форме 1 (рис. 3.9 а). Если конструкторский документ выполнен на нескольких листах, то на первом листе должна быть основная надпись по форме 1, а на последующих листах – по форме 2а (рис 3.9 б).

Таблица 3.1.

Коды графических документов.

Код документа	Наименование документа
-	Чертеж детали
СБ	Сборочный чертеж
ВО	Чертеж общего вида
ГЧ	Габаритный чертеж
МЧ	Монтажный чертеж
Э1	Схема электрическая структурная
Э2	Схема электрическая функциональная
Э3	Схема электрическая принципиальная
Э4	Схема электрическая соединений
К3	Схема кинематическая принципиальная
-	Спецификация
ВС	Ведомость спецификации
ВП	Ведомость покупных изделий
ПМ	Программа и методика испытаний
ТБ	Таблица
РР	Расчеты
ПЭЗ	Перечень элементов к электрической принципиальной схеме

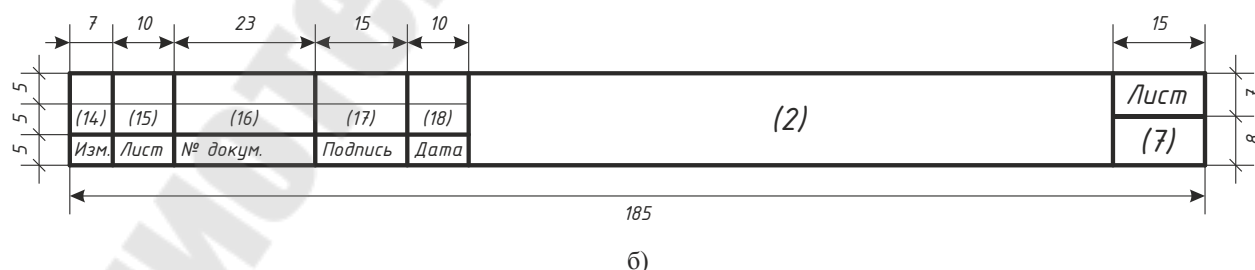
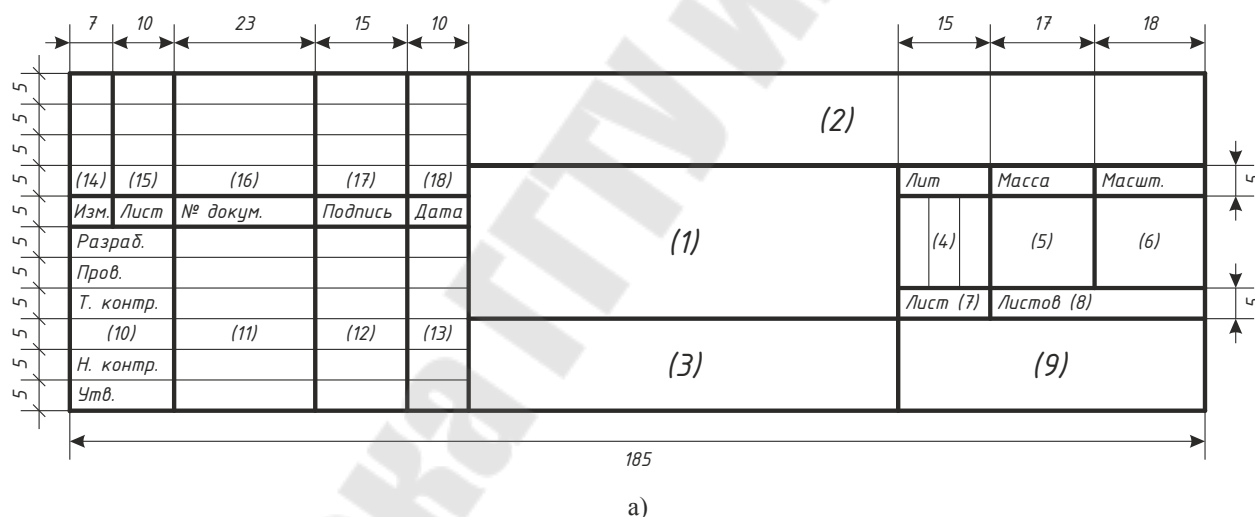


Рис. 3.9. Основная надпись в соответствии с ГОСТ 2.104-2006 по форме 1 (а) и по форме 2а (б).

При заполнении основной надписи в графе 1 (рис. 3.9) указывают наименование изделия (шрифт основной с наклоном, строчными буквами, размер шрифта 5 или 7 по ГОСТ 2.304-81). Под наименованием изделия записывается наименование документа, если документ имеет код (например, схема электрическая принципиальная (Э3), сборочный чертеж (СБ) и т.д.).

В графу 2 заносится обозначение документа. Общая структура обозначения изделия и основного конструкторского документа должна соответствовать ГОСТ 2.201-80 и состоять из тринадцати знаков, разделенных двумя точками. Структура обозначения документа (вместе с кодом документа) приведена на рис 3.10.

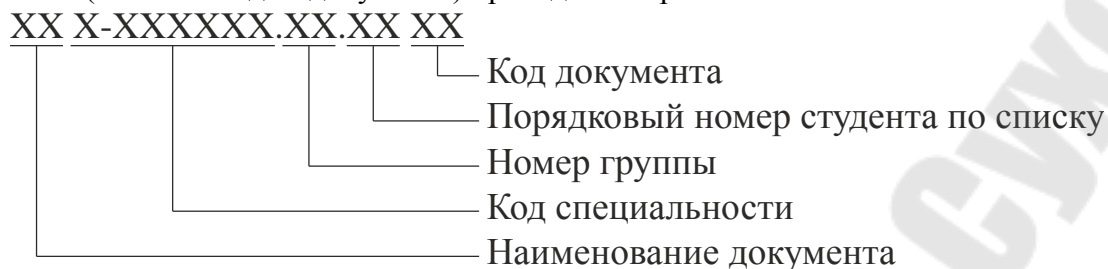


Рис. 3.10. Структура обозначения документа вместе с кодом документа.

Два первых знака из первой группы знаков включают наименование документа, т.е. если разрабатывается курсовой проект, то проставляется КП, если дипломный – ДП.

Следующие 7 знаков включают шифр специальности «Автоматизированные электроприводы», а именно 1-53 01 05.

Далее следуют два знака, указывающие номер учебной группы, например, студент группы ЭП-52 указывает «52».

После этого следует два знака, указывающие порядковый номер учащегося по списку учебной группы.

Два последних знака включают в себя код документа.

Обозначение документа выполняется основным шрифтом, размер 7 или 10, буквы прописные по ГОСТ 2.304-81.

Примеры записей обозначений документов:

- ДП 1-530105.61.01 ЭЗ – обозначение электрической принципиальной схемы, документ выполнен учащимся учебной группы ЗЭП-61, порядковый номер учащегося по учебному журналу – 1;
- ДП 1-530105.51.10 ПЗ – пояснительная записка, выполненная учащимся группы ЭП-51 с порядковым номером по журналу – 10;
- ДП 1-530105.51.10 СБ – сборочный чертеж;
- ДП 1-530105.51.10 – спецификация.

В графе 3 указывают обозначение материалов детали (графу заполняют только на чертежах деталей). Шрифт основной с наклоном, размер 5, буквы строчные по ГОСТ 2.304-81.

Графа 4 содержит литеру документа (Т – литера для дипломного проекта). Шрифт основной с наклоном, размер 7 по ГОСТ 2.304-81.

Графа 5 – масса изделия (кг); шрифт основной с наклоном, размер 5 по ГОСТ 2.304-81.

Графа 6 – масштаб; шрифт основной с наклоном, размер 7 по ГОСТ 2.304-81.

Графа 7 – порядковый номер листа. Если документ выполнен на одном листе, то эта графа не заполняется (ГОСТ 2.104-68).

В графу 8 записывается общее количество листов данного конструкторского документа дипломного проекта. Указывается только на первом листе.

Графа 9 – название учебного заведения; шрифт основной с наклоном, размер 10 по ГОСТ 2.304-81.

В графе 10 указывают характер работы, выполняемой лицом, подписывающим документ (разработал, руководитель, консультант).

В графе 11 – фамилии лиц, подписавших документ. Против графы «Консультант» необходимо указать фамилию консультанта по графической или электрической части в зависимости от содержания чертежа.

В графе 12 – подписи лиц, фамилии которых указаны в графе 11.

В графе 13 – дата подписания документа (состоит из шести цифр, например, 09.01.09).

Графы 14...18 не заполняются.

Наименование граф 4...7, 10 и 11 следует выполнять основным шрифтом с наклоном, размер 3,5, буквы строчные по ГОСТ 2.304-81.

Образец заполнения основной надписи приведен на рис. 3.11.

					<i>ДП 1-530105.61.17 Э1</i>			
					<i>Кран мостовой КМ80 з/п 80/20 т Схема электрическая структурная</i>	<i>Лист</i>	<i>Масса</i>	<i>Масшт.</i>
						Т		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Лист</i>		<i>Листов</i>	
<i>Разраб.</i>	<i>Курчев</i>							
<i>Пров.</i>	<i>Савельев</i>							
<i>Т. контр.</i>								
<i>Н. контр.</i>	<i>Позуляев</i>				<i>ГГТУ</i>			
<i>Утв.</i>	<i>Захаренко</i>							

Рис. 3.11. Образец заполнения основной надписи.

Изображение изделий предпочтительно выполнять в натуральную величину, в масштабе 1:1. Но часто при изображении мелких изделий или размещении на чертежном формате изображения крупного размера (например, испытательной установки) необходимо соответственно увеличивать или уменьшать размеры изделия относительно его натуральной величины. При этом наиболее употребительны следующие масштабы (ГОСТ 2.302-68):

- масштабы уменьшения 1:2; 1:4; 1:10; 1:40;
- масштабы увеличения 2:1; 4:1; 10:1; 40:1.

Масштаб в основной надписи обозначается по типу 1:1, 1:2, 2:1 и т.д., в остальных случаях (например, на поле чертежа) – по типу М1:1, М1:2, М2:1 и т.д.

Независимо от выбранного масштаба на чертежах проставляются действительные размеры в миллиметрах.

3.4. Общие правила выполнения схем

Схема – это графический конструкторский документ, на котором в виде условных изображений или обозначений показаны составные части изделия и связи между ними.

Схемы применяют при изучении принципа действия машин, приборов, аппаратов, при их наладке и ремонте, а также для уяснения связи между отдельными составными частями изделия без уточнения особенностей их конструкций.

Правила выполнения и оформления схем регламентируют стандарты седьмой классификационной группы ЕСКД. Виды и типы схем, общие требования к их выполнению должны соответствовать ГОСТ 2.701-84 «ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению», правила выполнения всех типов электрических схем – ГОСТ 2.702-75 «ЕСКД. Правила выполнения электрических схем». При выполнении электрических схем цифровой вычислительной техники руководствуются ГОСТ 2.709-81 «ЕСКД. Правила выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники». Обозначение цепей в электрических схемах выполняют по ГОСТ 2.709-72 «ЕСКД. Система обозначений цепей в электрических схемах», буквенно-цифровые обозначения в электрических схемах – по ГОСТ 2.710-81 «ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах».

ГОСТ 2.701-84 устанавливает классификацию, обозначение схем и общие требования к их выполнению.

Структурные схемы разрабатывают при проектировании изделий на стадиях, предшествующих разработке схем других типов. Структурными схемами пользуются для общего ознакомления с изделием.

Функциональная схема служит для разъяснения процессов, протекающих в отдельных функциональных узлах изделия или в изделии в целом. Данными схемами пользуются для изучения принципов работы изделия, а также при наладке, контроле и ремонте в процессе эксплуатации.

Принципиальная (полная) схема определяет полный состав элементов и связей между ними и дает всеобъемлющее представление о принципах работы изделия. Принципиальными схемами пользуются для изучения принципов работы изделий, а также при их наладке, контроле и ремонте. Такие схемы служат основанием для разработки других конструкторских документов, например, схем соединений (монтажных) и чертежей.

Схема соединений (монтажная) отражает соединения составных частей изделия и определяет провода, жгуты, кабели или трубопроводы, которыми осуществляются эти соединения, а также места их присоединения и ввода (разъемы, платы, зажимы и т.п.). Схематическими схемами пользуются при разработке других конструкторских документов, в первую очередь чертежей, определяющих прокладку и способы крепления проводов, жгутов, кабелей, а также для осуществления присоединений. Данные схемы используют также при контроле, эксплуатации и ремонте изделий в процессе эксплуатации.

Схема подключений представляет внешние подключения изделия. Схематическими подключениями пользуются при разработке других конструкторских документов, а также для осуществления подключений изделий и при их эксплуатации.

Общая схема определяет составные части комплекса и соединения их между собой на месте эксплуатации. Такими схемами пользуются при ознакомлении с комплексами, а также при их контроле и эксплуатации.

Схема расположения определяет относительное расположение составных частей изделия (установки), а при необходимости также жгутов, проводов, кабелей, трубопроводов и т.п. Данными схемами пользуются при разработке других конструкторских документов, а также при эксплуатации и ремонте изделий.

При выполнении схем действительное пространственное расположение составных частей изделия не учитывают или учитывают приближенно, а размещение условных графических обозначений на схеме определяется удобством чтения и взаимосвязями его составных частей. Поэтому при построении рисунка схемы должны соблюдаться следующие условия: элементы, совместно выполняющие определенные функции, должны быть сгруппированы и расположены соответственно развитию процесса слева направо; расположение элементов внутри функциональных групп должно обеспечивать наиболее простую конфигурацию цепей (с минимальным количеством изломов и пересечений линий связи); дополнительные и вспомогательные цепи (элементы и связи между ними) должны быть выведены из полосы, занятой основными цепями.

Линии связи изображают в виде горизонтальных и вертикальных отрезков, имеющих минимальное количество изломов и взаимных пересечений. Для упрощения рисунка схемы допускается применять наклонные линии, ограничивая, по возможности, их длину. Расстояние (просвет) между двумя соседними параллельными линиями связи должно быть не менее 3,0 мм, между двумя соседними линиями графического обозначения – не менее 1,0 мм, между отдельными условными графическими обозначениями – не менее 2,0 мм.

Если в состав изделия входят устройства, которые могут быть применены самостоятельно или в других изделиях, то на каждое такое устройство рекомендуется выполнять самостоятельные принципиальные схемы. Эти устройства изображают на

схеме в виде прямоугольников сплошной линией, равной по толщине линиям связи, или утолщенной линией.

Электрические элементы и устройства на схеме изображают в виде условных графических обозначений, установленных стандартами ЕСКД.

Кроме условных графических обозначений, на схемах соответствующих типов можно применять другие категории графических обозначений: прямоугольники произвольных размеров, содержащие пояснительный текст; внешние очертания, представляющие собой упрощенные конструктивные изображения изделий.

Стандартные условные графические обозначения элементов выполняют по размерам, указанным в соответствующих стандартах. Если размеры стандартом не установлены, то графические обозначения на схеме должны иметь такие же размеры, как их изображения в стандартах. При выполнении иллюстративных схем на больших форматах можно все условные графические обозначения пропорционально увеличивать по сравнению с приведенными в стандартах.

На схемах допускается увеличивать размеры обозначения отдельных элементов, если необходимо графически выделить особое или важное значение элемента (устройства), а также помещать внутри обозначения предусмотренные стандартами квалифицирующие символы или дополнительную информацию.

При выборе размеров условных графических обозначений схем руководствуются теми же рекомендациями, что и при выборе форматов. Выбранные размеры и толщины линий графических обозначений должны быть выдержаны постоянными во всех схемах одного типа на данное изделие.

Графические обозначения следует выполнять линиями той же толщины, что и линии связи. Рекомендуется выполнять условные графические обозначения в положении, указанном стандартами, или повернутыми на угол, кратный 90°.

При необходимости на схеме помещают следующие данные: наименование или характеристики электрических сигналов; обозначения электрических цепей; технические характеристики изделия, приведенные в виде текста, таблиц, диаграмм и т.п. Расположение и формы текстовых данных на электрических схемах устанавливает ГОСТ 2.701-84, а содержание и назначение определяются типом схемы и устанавливаются в правилах выполнения схем соответствующих типов. Текстовые данные приводят на схеме в тех случаях, когда содержащиеся в них сведения нецелесообразно или невозможно выразить графически или условными обозначениями.

Содержание текста должно быть кратким и точным. В надписях не должны применяться сокращения слов, за исключением общепринятых или установленных в стандартах.

Текстовые данные в зависимости от их содержания и назначения могут располагаться рядом с графическими обозначениями (по возможности справа или сверху) или внутри графических обозначений, рядом с линиями, в разрыве линий или в конце линий, на свободном поле схемы.

В зависимости от назначения текстовые данные на схеме имеют следующие формы записи:

- условные буквенно-цифровые обозначения (номера цепей, обозначения электрических контактов, элементов и т.п.);
- наименования (номера цепей, обозначения электрических контактов, элементов и т.п.);
- наименования (наименования сигналов, функциональных групп и т.п.);
- сплошной текст (технические требования, пояснения и т.п.);
- текст, разбитый на графы (например, таблицы коммутации многопозиционных переключателей);

– таблицы, в которых сочетаются текст и графические обозначения (например, таблицы использования контактов реле).

Текстовые данные, относящиеся к линиям, ориентируют параллельно их горизонтальным участкам, как показано на рис. 3.12; при большой плотности схемы допускается вертикальная ориентация текстовых данных.

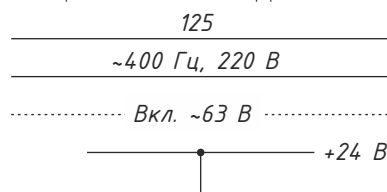


Рис. 3.12. Текстовые данные, относящиеся к линиям.

Таблицы, помещаемые на свободном поле схемы, должны иметь наименования, раскрывающие их содержание, например, «Таблица переключателей».

На схеме около условных графических обозначений элементов, требующих пояснения в условиях эксплуатации (переключатели, регуляторы и т.п.), помещают соответствующие надписи, знаки или графические обозначения.

Надписи, предназначенные для нанесения на само изделие, помещают в кавычках возле соответствующего графического обозначения элемента.

Все надписи на схемах выполняют чертежным шрифтом по ГОСТ 2.304-81.

В перечне элементов электрической принципиальной схемы записываются данные об элементах принципиальной схемы. Связь схемы с условными графическими обозначениями, принятыми в принципиальной схеме, должна осуществляться через позиционные обозначения.

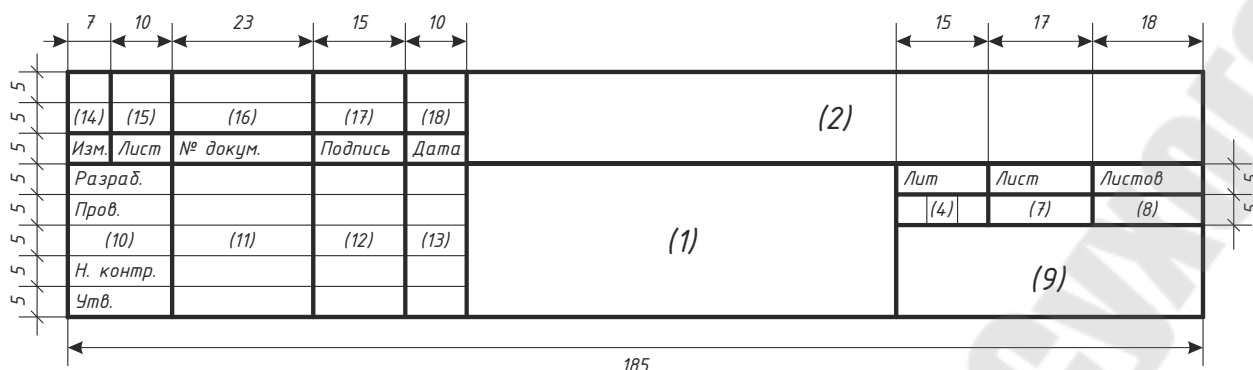
Перечень элементов помещается на первом листе схемы или выполняется в виде самостоятельного документа. В последнем случае его выполняют на листах формата А4, основную надпись к нему – по ГОСТ 2.104-2006, форма 2. На первом листе – как на рис. 3.13 а, на последующих листах – как на рис. 3.13 б. В обозначении документа (графа 2 основной надписи) код перечня элементов должен состоять из буквы П и кода схемы, на которую заполняется перечень. Например, перечень элементов к электрической принципиальной схеме – ПЭЗ.

Перечень элементов записывают в спецификацию после схемы, к которой он относится. Перечень элементов оформляют в виде таблицы (рис. 3.14), заполняемой сверху вниз.

Если перечень элементов помещают на первом листе схемы, то его располагают над основной надписью. Таблица перечня элементов вычерчивается на расстоянии 12 мм от верхней линии штампа, т.е. не соединяется с основной надписью чертежа принципиальной схемы. Продолжение перечня элементов помещают слева от основной надписи. В этом случае головку таблицы перечня элементов повторяют.

Заполнение граф перечня элементов производят следующим образом:

- в графе «Зона» указывают номер зоны, в которой находится записываемый элемент, если поле чертежа разбито на зоны (в сложных чертежах больших размеров);
- в графе «Поз. обозн.» записывают позиционное обозначение элементов;
- в графе «Наименование» помещают наименование элемента в соответствии с документом, на основании которого этот элемент применен, и обозначение этого документа – стандарта или технических условий;
- в графе «Кол.» записывают количество одинаковых элементов, входящих в данную схему;
- в графе «Примечание» указывают, например, технические данные элемента, не содержащиеся в его наименовании.



а)



б)

Рис. 3.13. Основная надпись для спецификации:

а) – первый лист, б) – последующие листы.

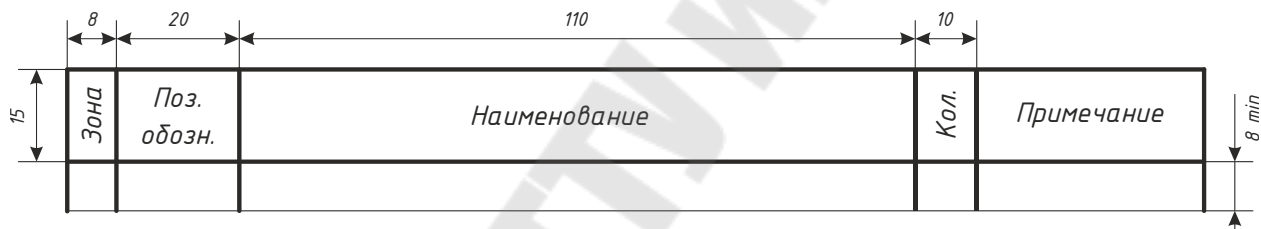


Рис. 3.14. Оформление перечня элементов.

Элементы в перечень записывают в следующем порядке. При буквенно-цифровых позиционных обозначениях элементов (таблица 3.2) – группами в алфавитном порядке. В пределах каждой группы, имеющей одно и то же буквенное позиционное обозначение, элементы располагаются по возрастанию порядковых номеров.

Таблица 3.2.

Некоторые буквенные обозначения элементов.

Буквенный код	Пример элемента (устройства)
А	Устройство
В	Преобразователи неэлектрических величин в электрические (кроме генераторов и источников питания)
ВА	Громкоговоритель
ВЕ	Сельсин-приёмник
ВФ	Телефонный капсюль
ВГ	Сельсин-датчик
ВК	Термопара, тепловой датчик
ВL	Фотоэлемент
ВМ	Микрофон
ВР	Датчик давления
ВQ	Пьезоэлемент
ВR	Датчик частоты вращения
ВV	Датчик скорости
С	Конденсатор
DA	Схема интегральная аналоговая

DD	Схема интегральная цифровая
E	Элементы, для которых не установлено кодов
EK	Нагревательный элемент
EL	Лампа осветительная
F	Предохранители, разрядники
FA	Дискретный элемент защиты по току мгновенного действия
FP	Дискретный элемент защиты по току инерционного действия
FU	Предохранитель плавкий
G	Генераторы, источники питания
GB	Батарея
H	Устройства индикаторные
HA	Прибор звуковой сигнализации
HG	Прибор знаковый и на жидких кристаллах
HL	Прибор световой индикации
K	Реле, контакторы, пускатели
KA	Реле токовое
KK	Реле электротепловое
KM	Контактор, магнитный пускатель
KT	Реле времени
KV	Реле напряжения
L	Катушки индуктивности
M	Двигатели
P	Приборы, измерительное оборудование
PA	Амперметр
PG	Энкодер
PV	Вольтметр
PW	Ваттметр
Q	Выключатели и разъединители в силовых цепях
QF	Выключатель автоматический
QS	Разъединитель
R	Резисторы
RK	Термисторы
RP	Потенциометры
RS	Шунт измерительный
RU	Варистор
S	Устройства коммутационные в цепях управления
SA	Переключатель
SB	Выключатель кнопочный
	Выключатель срабатывающий:
SK	от температуры
SL	от уровня
SP	от давления
SQ	от положения (путевой)
SR	от угловой скорости
T	Трансформаторы
TA	Трансформатор тока
TV	Трансформатор напряжения
U	Преобразователи электрических величин в электрические
UB	Модулятор
UR	Демодулятор
UZ	Преобразователь частоты, инвертор, управляемый выпрямитель
V	Приборы полупроводниковые
VD	Диод
VS	Тиристор
VT	Транзистор
VZ	Стабилитрон
X	Соединительные контакты
XA	Токосъёмник, контакт скользящий

XS	Гнездо
XT	Соединение разъёмное
Y	Устройства механические с электромагнитным приводом
YA	Электромагнит
YB	Тормоз с электромагнитным приводом
YC	Муфта с электромагнитным приводом
Z	Фильтры, ограничители

Для облегчения внесения изменений допускается оставлять несколько незаполненных строк между отдельными группами элементов, а при большом количестве элементов внутри групп – и между элементами.

Элементы одного типа с одинаковыми параметрами, имеющие на схеме последовательные порядковые номера, допускается записывать в перечень в одну строку. В этом случае в графу «Поз. обозн.» вписывают только позиционные обозначения с наименьшим и наибольшим порядковыми номерами, например, R3, R4; C8...C12, а в графу «Кол.» – общее количество таких элементов.

При записи элементов одинакового наименования, отличающихся техническими характеристиками и другими данными и имеющих одинаковое буквенное позиционное обозначение, допускается в графе «Наименование» записывать:

- наименование этих элементов в виде общего наименования;
- в общем наименовании – наименование, тип и обозначение документа (государственный стандарт, техническое условие или основной конструкторский документ), на основании которого эти элементы применены.

Пример оформления перечня элементов приведен на рис. 3.15.

Зона	Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
	A1	Блок управления VDF-150-B	1	
	A2	Тормозной прерыватель VFD-B-5055	1	
	FU1.. FU3	Предохранители VFD075B43A	3	
	L1	Входной фильтр EA-IC-50A	1	
	L3	Выходной дроссель ED3S-2,0/32	1	
	M1	Электродвигатель 4MTKF112LB6	1	
	PG1	Энкодер E6B2C	1	
	QF1	Выключатель автоматический AE2043	1	

Рис. 3.15. Пример оформления перечня элементов.

4. Требования к спецразделам дипломных проектов

В ряде случаев по заказу предприятия, где выбиралась тема дипломного проекта, или по заданию кафедры в тему проекта может быть включен специальный раздел, требующий специальной углубленной проработки или теоретического, или конструкторско-технологического, или экспериментального характера.

Этот раздел включается по согласованию с заведующим кафедрой взамен одного из типовых разделов, кроме разделов по экономике и охране труда (п. 2). Он обязательно иллюстрируется в расчетно-пояснительной записке и на чертежах (или плакатах) результатами теоретического анализа, численных расчетов на ЭВМ, фотографиями

изготовленных студентом макетных образцов и их экспериментальными характеристиками и т.д.

5. Требования к дипломным проектам по специальным темам

Студентам, которым предложено продолжить обучение в магистратуре, и другим, хорошо успевающим студентам, может быть предложена разработка проектов научно-исследовательского характера по узким специальным темам автоматизированных электроприводов, автоматизации промышленных установок, управления технологическими комплексами (процессами) и электрооборудования транспорта.

Это могут быть темы по вопросам теоретического исследования и изобретательских задач, создания программного обеспечения, численного анализа на ЭВМ, разработки и экспериментального исследования как специфических систем автоматики, так и лабораторных стендов по спецкурсам специальности 1-53 01 05.

Содержание расчетно-пояснительной записки и графического материала таких проектов должно быть согласовано с заведующим кафедрой. Их объем не должен быть меньше объема типовых проектов, основные разделы должны сохраняться (электротехнический, экономики и охраны труда) и тематика обязательно должна совпадать с содержанием специальности 1-53 01 05 по образовательному стандарту.

Оформление спецпроектов производится так же, как и оформление спецразделов в проектах (п. 4).

6. Теоретические сведения

6.1. Выбор электродвигателя и расчет его параметров

При известных скоростной и нагрузочной диаграммах механизма производится расчет эквивалентной мощности двигателя за цикл работы. Выбор электродвигателя осуществляется по номинальной мощности и частоте вращения. Номинальная мощность и скорость вращения должны превышать заданные (рассчитанные). При необходимости надо пересчитать мощность к номинальной продолжительности включения. При значительном отличии заданной и номинальной частоты вращения необходимо завышать мощность двигателя. При этом требуемая мощность пересчитывается через требуемый момент и номинальную частоту вращения. При выборе необходимо учитывать вид рабочей машины и исполнение двигателя по способу вентиляции и защиты от воздействия окружающей среды. После выбора электродвигателя, из справочника выписываются все имеющиеся для него параметры.

6.1.1. Расчет параметров двигателя постоянного тока

Недостающие можно рассчитать по следующим формулам:

– активное сопротивление якоря (Ом)

$$R_{\text{яд}} = \frac{U_{\text{н}}}{2 \cdot I_{\text{н}}} \cdot (1 - \eta_{\text{н}}) \quad (6.1)$$

где: $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение якоря двигателя (В),

$I_{\text{н}}$ – номинальный ток якоря двигателя (А),

$\eta_{\text{н}}$ – номинальный КПД двигателя (о.е.);

– индуктивность якоря (Гн)

$$L_{\text{яд}} = \beta_{\text{к}} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{p_{\text{д}} \cdot \omega_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}} \quad (6.2)$$

где: β_k – коэффициент, учитывающий наличие компенсационной обмотки ($\beta_k = 0,2$ – при наличии компенсационной обмотки, $\beta_k = 0,6$ – при отсутствии и для серии Д, $\beta_k = 0,4$ – для серии 2П),
 p_d – число пар полюсов двигателя,
 ω_H – номинальная угловая скорость вращения двигателя ($^{\text{рад/с}}$);
– конструктивная постоянная двигателя

$$k = \frac{p_d \cdot N}{\pi \cdot 2a} \quad (6.3)$$

где: N – число активных проводников якоря,
 $2a$ – число параллельных ветвей обмотки якоря;
– произведение конструктивной постоянной на номинальный магнитный поток
(Вб)

$$k\Phi_H = \frac{U_H - R_{\text{яд}} \cdot I_H}{\omega_H}; \quad (6.4)$$

– номинальный электромагнитный момент (Н·м)

$$M_H = k\Phi_H \cdot I_H; \quad (6.5)$$

– активное сопротивление обмотки возбуждения (Ом)

$$R_B = \frac{U_{\text{BH}}}{I_{\text{BH}}} \quad (6.6)$$

где: U_{BH} – номинальное напряжение обмотки возбуждения (В),
 I_{BH} – номинальный ток обмотки возбуждения (А);
– коэффициент от I_B до $k\Phi$ (Вб/А)

$$k \cdot k_{\Phi} \cdot w_B = \frac{k\Phi_H}{I_{\text{BH}}} \quad (6.7)$$

В справочниках сопротивления, как правило, приводятся для температуры 15 °С или 20 °С. Его необходимо привести к рабочей температуре

$$R_{\text{яд}} = R_{\text{яд}}' (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (6.8)$$

где: α – температурный коэффициент (для меди $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3}$),
 Δt – разница между допустимой температурой обмотки (выбирается по классу изоляции двигателя из таблицы 6.1) и температурой, для которой приведено сопротивление в справочнике.

Величину сопротивления, полученную по приближенной формуле, приводить к рабочей температуре не следует.

Таблица 6.1.

Допустимая расчетная температура обмотки.

Класс изоляции	В	F	H
$\Delta t, ^{\circ}\text{C}$	120	140	160

Величину постоянной времени цепи возбуждения T_B можно приблизительно оценить по рис. 6.1. Постоянная времени вихревых токов принимается $T_{\text{BT}} = 0,1 \cdot T_B$.

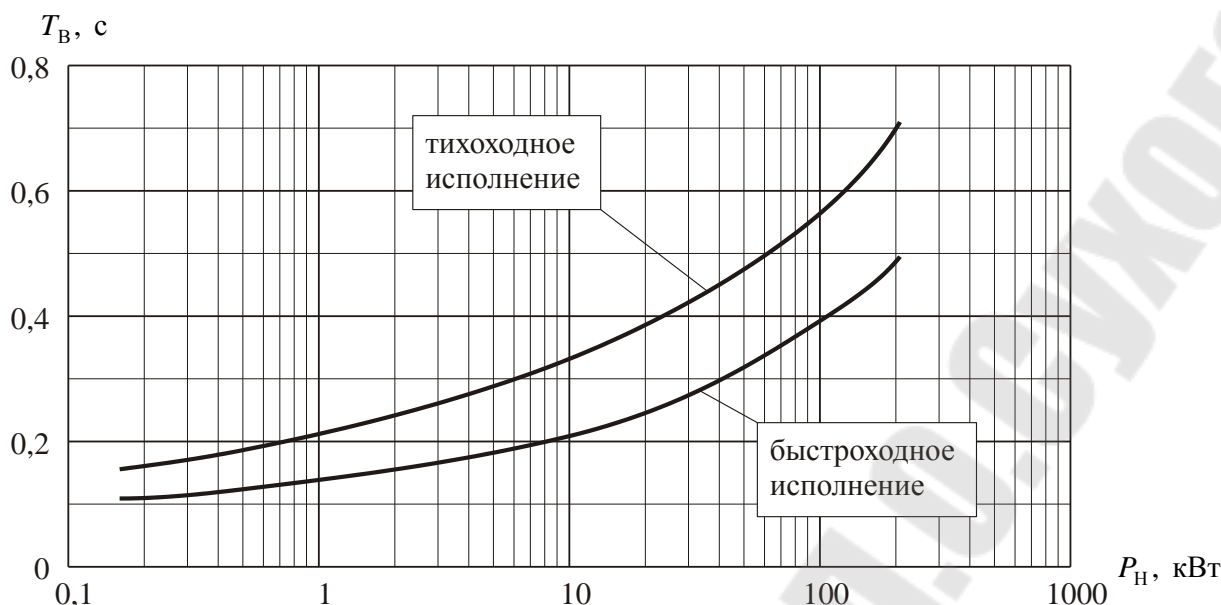


Рис. 6.1. Зависимость постоянной времени возбуждения от номинальной мощности двигателя.

6.1.2. Расчет параметров асинхронного электродвигателя

Если в справочнике параметры схемы замещения приведены в относительных единицах, то необходимо их привести к абсолютным

$$x = x^o \cdot \frac{U_H}{I_H}, R = R^o \cdot \frac{U_H}{I_H} \quad (6.9)$$

где: I_H — номинальный ток (А)

$$I_H = \frac{P_H}{3 \cdot U_H \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H}, \quad (6.10)$$

U_H — номинальное фазное напряжение (В),

η_H — номинальный КПД — КПД при нагрузке 100 % (о.е.),

$\cos \varphi_H$ — номинальный коэффициент мощности — при нагрузке 100 % (о.е.).

Активные сопротивления схемы замещения соответствуют активным сопротивлениям обмотки фазы, а индуктивности статора и ротора следует рассчитывать по соотношениям

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_{12}, L_2 = L_{\sigma 2} + L_{12} \quad (6.11)$$

где: $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ — индуктивности рассеяния статора и ротора, соответственно

$$L_{\sigma 1} = \frac{x_1}{\omega_C}, L_{\sigma 2} = \frac{x_2}{\omega_C}, \quad (6.12)$$

ω_C — угловая скорость вращения напряжения сети (рад/с)

$$\omega_C = 2 \cdot \pi \cdot f_C,$$

f_C — частота напряжения сети (50 Гц).

L_{12} — взаимоиндуктивность между обмотками статора и ротора

$$L_{12} = \frac{x_{\mu}}{\omega_C}. \quad (6.13)$$

Индуктивность рассеяния двигателя для моделей скалярного (частотного) и векторного управления, соответственно

$$L'_\sigma = \frac{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2}{L_1}, \quad L''_\sigma = \frac{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2}{L_2} \quad (6.14)$$

($L'_\sigma \approx L''_\sigma \approx L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}$).

Коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора, соответственно

$$K_1 = \frac{L_{12}}{L_1}, \quad K_2 = \frac{L_{12}}{L_2}. \quad (6.15)$$

Номинальные параметры двигателя определяются следующим образом:

– номинальная угловая скорость вращения (рад/с)

$$\omega_H = \omega_{0H} \cdot (1 - s_H), \quad \omega_{\text{ЭЛН}} = \omega_{0\text{ЭЛН}} \cdot (1 - s_H) = \omega_H \cdot p_d \quad (6.16)$$

где: s_H – номинальное скольжение (о.е.),

ω_{0H} – синхронная скорость при номинальной частоте напряжения (рад/с)

$$\omega_{0H} = \frac{\omega_{0\text{ЭЛН}}}{p_d}, \quad (6.17)$$

$\omega_{0\text{ЭЛН}}$ – номинальная синхронная скорость поля статора ($\omega_{0\text{ЭЛН}} = \omega_c$);

– номинальный момент (Н·м)

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}; \quad (6.18)$$

– номинальное потокосцепление статора (Вб)

$$\Psi_{1H} = \frac{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_H}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s_H}\right)^2 + \left[\frac{R_1}{x_m} \cdot \frac{R_2}{s_H} - (x_1 + x_2)\right]^2}} \cdot \frac{U_H}{\omega_{0\text{ЭЛ}}}; \quad (6.19)$$

– номинальное потокосцепление ротора (Вб)

$$\Psi_{2H} = \frac{\frac{R_2}{s_H}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_H}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}} \cdot \Psi_{1H}. \quad (6.20)$$

Следует также помнить, что номинальные параметры: напряжение, ток, потокосцепление, следует привести от трехфазной к двухфазной модели, используя коэффициент согласования

$$k_c = \sqrt{\frac{3}{2}}. \quad (6.21)$$

В данном пособии в моделях систем скалярного и векторного управления асинхронным электродвигателем коэффициент согласования учтен, поэтому при их использовании для расчетов приводить номинальные параметры не следует.

6.2. Выбор силового оборудования и расчет параметров силовой цепи

Выбор комплектного электропривода производится исходя из вида рабочей машины, для которой проектируется электропривод. Номинальный ток и напряжение должны быть не менее соответствующих параметров электродвигателя. Здесь также, при необходимости, производится выбор других элементов силовой части: трансформатора или коммутационных реакторов, дросселей, входного и выходного фильтров, блока динамического торможения и т.д. Выбор производится также по требуемым номинальным току и напряжению. Например, трансформатор для тиристорного электропривода постоянного тока выбирается по требуемым напряжению и току преобразователя.

6.2.1. Расчет параметров силовой цепи электропривода постоянного тока

Для трансформатора рассчитываются параметры обмотки фазы, приведенные к вторичной обмотке:

– полное сопротивление (Ом)

$$Z_T = \frac{u_K \cdot U_{2\text{нф}}}{I_2} \quad (6.22)$$

где: u_K – напряжение короткого замыкания (о.е.),
 $U_{2\text{нф}}$ – номинальное фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора (В),
 I_2 – номинальный ток вторичной обмотки трансформатора (А);
– активное сопротивление (Ом)

$$R_T = \frac{P_{\text{кз}}}{3 \cdot I_2^2} \quad (6.23)$$

где $P_{\text{кз}}$ – потери короткого замыкания (Вт);
– реактивное сопротивление (Ом) и индуктивность (Гн)

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}, \quad L_T = \frac{X_T}{\omega_c} \quad (6.24)$$

Расчет параметров якорной цепи двигателя производится по следующим формулам:

– активное сопротивление при нулевой или мостовой силовой схеме тиристорного преобразователя, соответственно

$$\begin{aligned} R_{\text{я}} &= R_{\text{яд}} + R_T + R_K, \\ R_{\text{я}} &= R_{\text{яд}} + 2 \cdot R_T + R_K \end{aligned} \quad (6.25)$$

где R_K – коммутационное сопротивление

$$R_K = \frac{p \cdot X_T}{2 \cdot \pi} \quad (6.26)$$

где p – количество пульсаций выпрямленного напряжения за период сети ($p = 2$ для однофазной мостовой, $p = 3$ для трехфазной нулевой и $p = 6$ для трехфазной мостовой схемы выпрямления);

– индуктивность при нулевой или мостовой силовой схеме тиристорного преобразователя, соответственно

$$\begin{aligned} L_{\text{я}} &= L_{\text{яд}} + L_T, \\ L_{\text{я}} &= L_{\text{яд}} + 2 \cdot L_T. \end{aligned} \quad (6.27)$$

– постоянная времени якорной цепи

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}. \quad (6.28)$$

6.2.2. Расчет параметров силовой цепи электропривода переменного тока

В современных промышленных электроприводах с частотным либо векторным управлением с инвертором на основе IGBT-модулей с управлением за счет широтно-импульсной модуляции, процессы, протекающие в промежуточной цепи постоянного тока и в инверторе не оказывают влияния на динамику электропривода. Возникает только необходимость учета дросселей, применяемых для сглаживания высокочастотных пульсаций. Их параметры включаются в соответствующие параметры обмоток статора двигателя $R_1, x_1, L_{\sigma 1}, L_1$.

6.3. Синтез функциональной и структурной схем

Синтез функциональной и структурной схем производится не только с учетом заданных требований к электроприводу, но и с учетом возможностей выбранного серийного электропривода. Допускается за счет разработки собственных узлов внесение дополнений и изменений в состав системы управления, предусмотренной в серийном электроприводе.

На рис. 6.2...6.5 представлены структурные схемы двухзонного электропривода постоянного тока, электроприводов переменного тока с частотным и векторным управлением. На их основе можно составить структурную схему проектируемого электропривода с учетом построения системы управления в выбранном серийном электроприводе (наличие узлов компенсации нелинейностей характеристик преобразователя и обратной связи двигателя по ЭДС в электроприводах постоянного тока, наличие контура регулирования напряжения в частотном электроприводе).

После синтеза функциональной и структурной схем, выбора элементов (датчиков и т.д.) производится расчет недостающих параметров.

6.3.1. Расчет параметров электропривода постоянного тока.

Коэффициент передачи преобразователя можно найти по наклону касательной к регулировочной характеристике в рабочей точке. Уравнение регулировочной характеристики

$$E_d = E_{d0} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi \cdot u_y}{2 \cdot U_{\text{опmax}}}\right), \quad (6.29)$$

где: E_{d0} – максимальное значение ЭДС преобразователя

$$E_{d0} = k_{\text{сх}} \cdot U_{2\text{нф}} \quad (6.30)$$

$k_{\text{сх}}$ – схемный коэффициент силовой цепи преобразователя (для однофазной мостовой схемы $k_{\text{сх}} = 0,9$, для трехфазной нулевой $k_{\text{сх}} = 1,17$ и для трехфазной мостовой $k_{\text{сх}} = 2,34$).

u_y – напряжение управления преобразователем,

$U_{\text{опmax}}$ – амплитуда пилообразного опорного напряжения СИФУ.

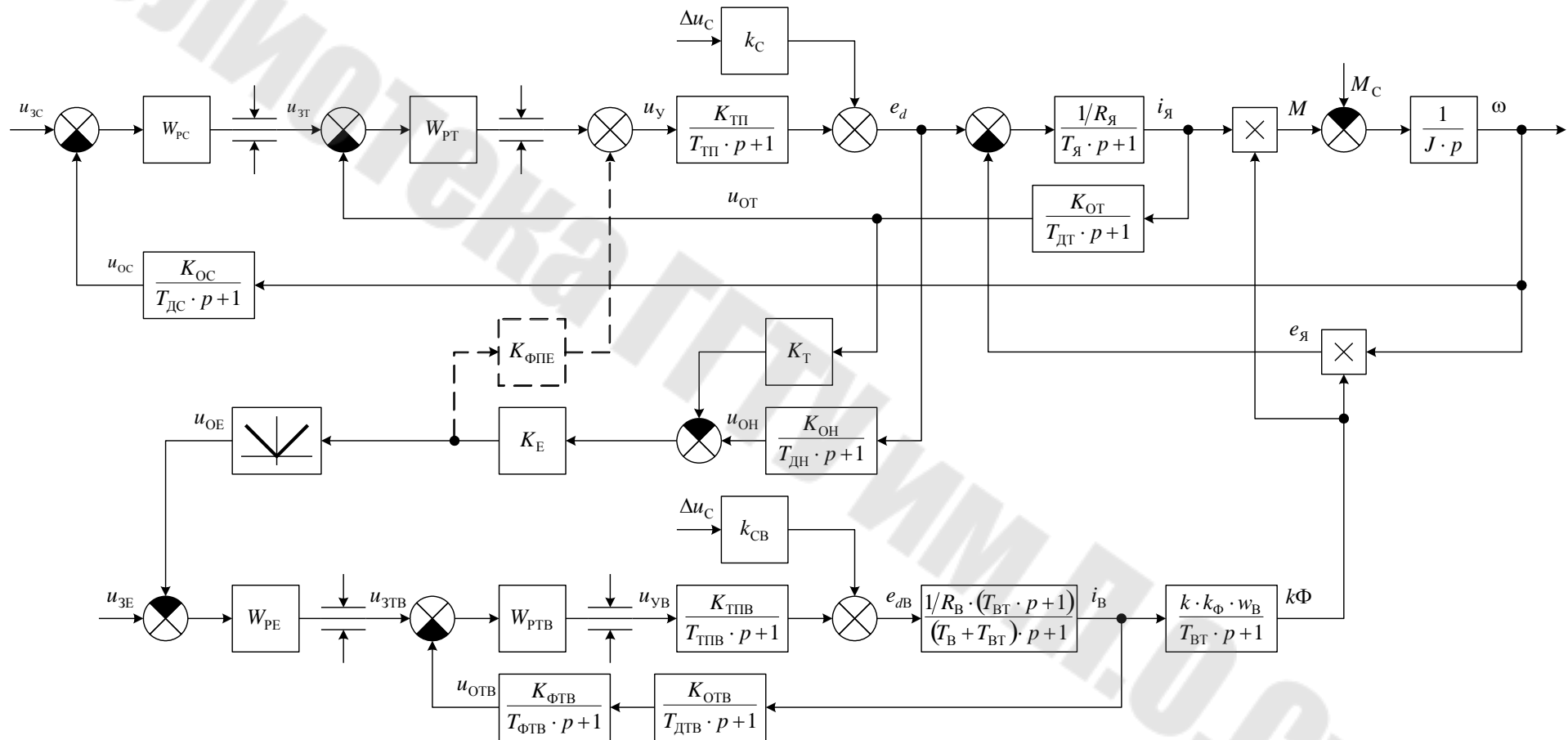


Рис. 6.2. Полная структурная схема преобразованной нелинейной модели всей двухзонной системы управления скоростью двигателя постоянного тока. Звено $K_{ФПЕ}$, показанное штриховой линией, учитывается при наличии в составе системы управления блока ФПЕ (функциональный преобразователь ЭДС)

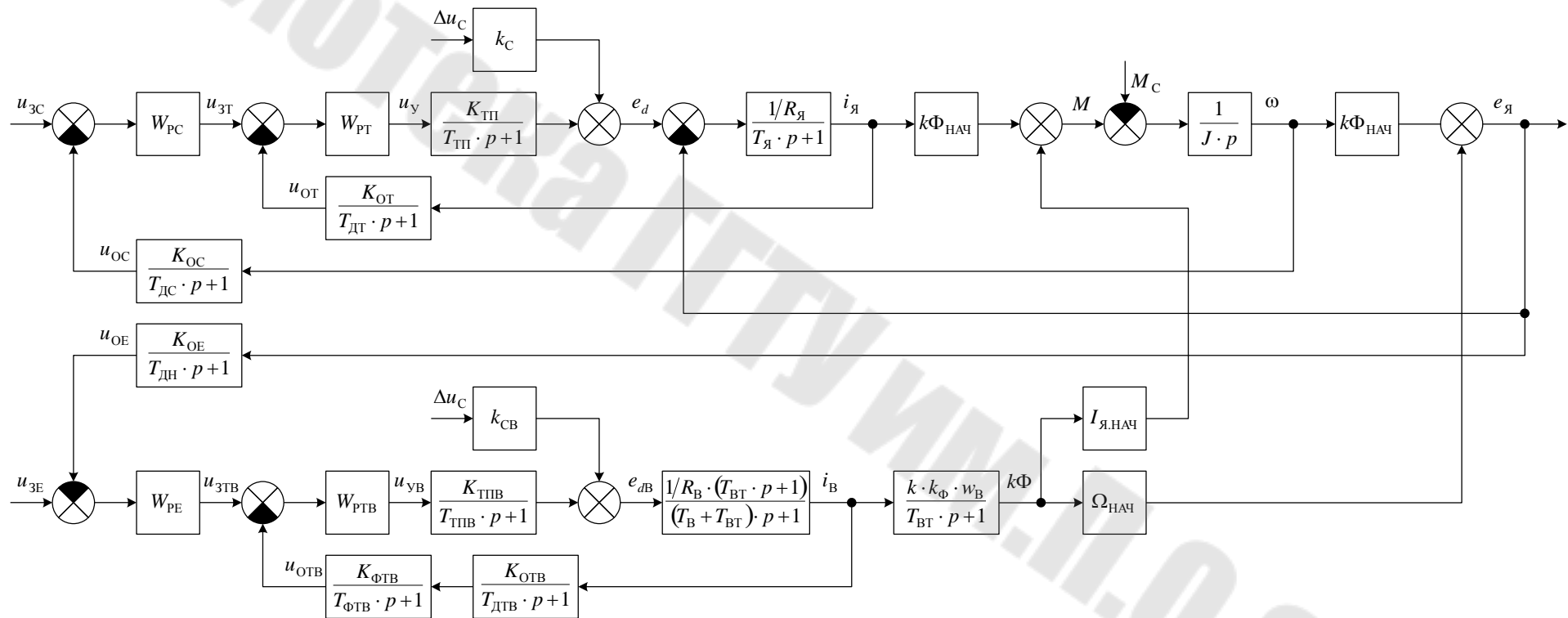


Рис. 6.3. Полная структурная схема линейризованной модели всей двухзонной системы управления скоростью двигателя постоянного тока.

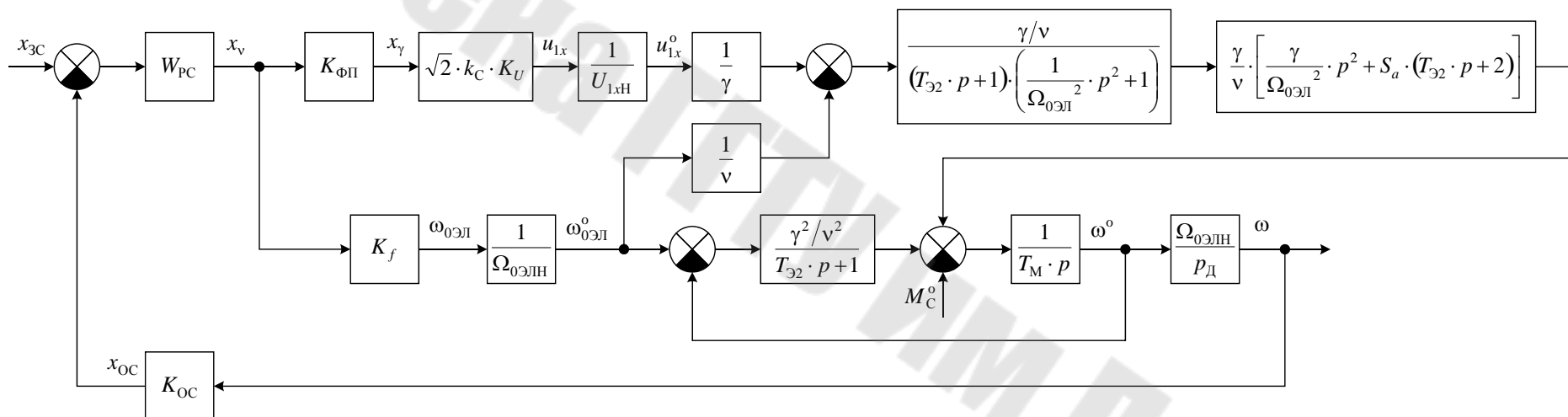


Рис. 6.4. Структурная схема линейризованной упрощенной модели системы частотного управления.

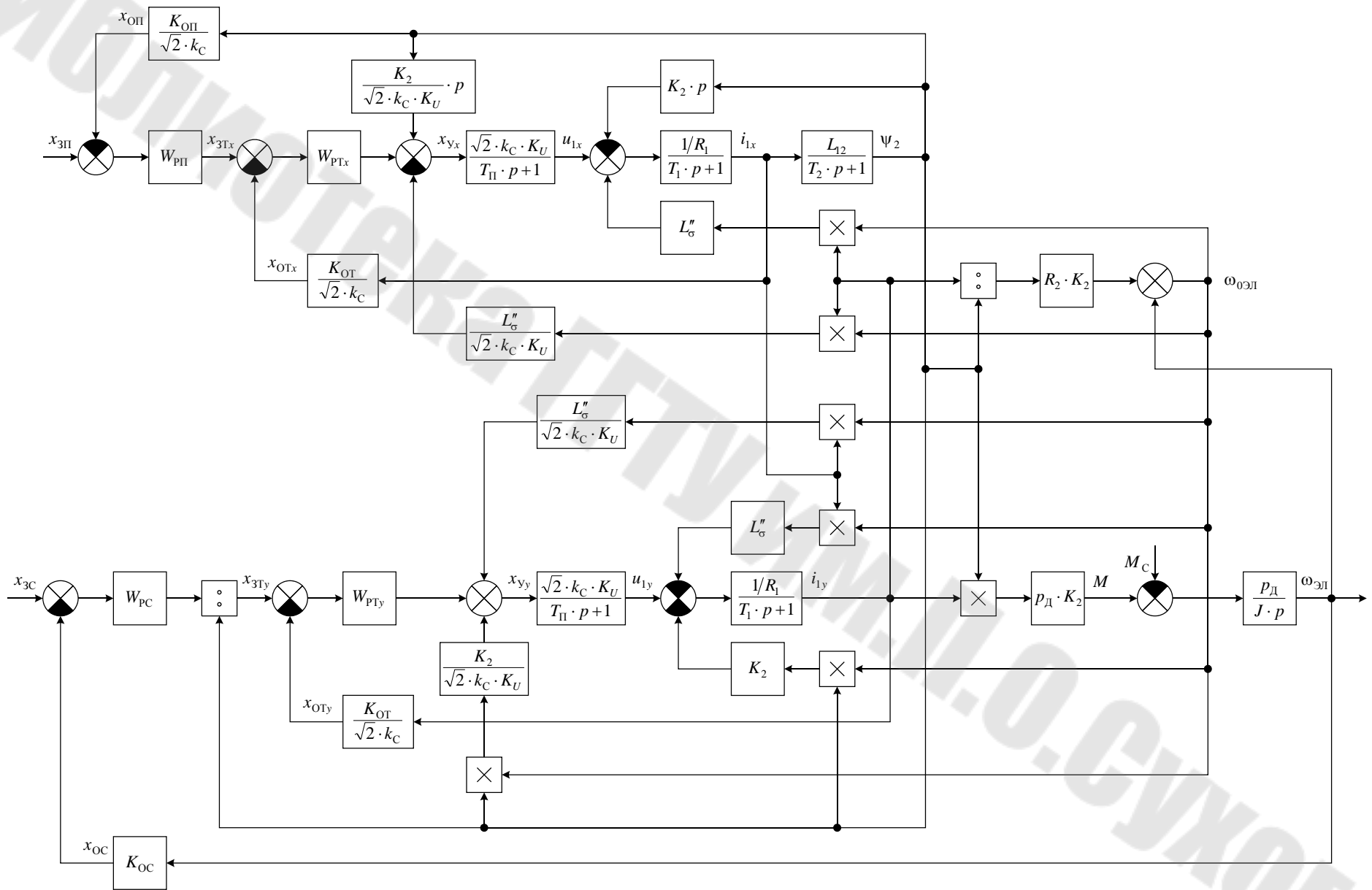


Рис. 6.5. Структурная схема модели системы векторного управления.

Либо можно найти коэффициент передачи по формуле

$$K_{\text{П}} = \frac{E_{d0} \cdot \pi}{2 \cdot U_{\text{ОП МАХ}}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{U_{\text{Н}}}{E_{d0}}\right)^2}. \quad (6.31)$$

Постоянная времени преобразователя равна сумме среднестатистического запаздывания и постоянной времени фильтра на входе СИФУ T_{Φ}

$$T_{\text{П}} = \frac{1}{p \cdot f_c} + T_{\Phi}. \quad (6.32)$$

Коэффициенты влияния сетевого напряжения определяются видом силовой схемы соответствующего преобразователя и имеют значение, обратное схемному коэффициенту

$$K_c = \frac{1}{k_{\text{СХ}}}. \quad (6.33)$$

Выбираем вначале номинальные значения сигналов задания всех регулируемых переменных: скорости $U_{\text{ЗСН}}$, тока якоря $U_{\text{ЗТН}}$, ЭДС якоря $U_{\text{ЗЕН}}$, тока возбуждения $U_{\text{ЗТВН}}$. Выбирать номинальные значения следует так, чтобы максимально возможное значение сигнала не превышало напряжения насыщения операционного усилителя. Т.е. для двухзонной системы управления максимальное значение сигнала задания скорости соответствует максимальной скорости двигателя $\omega_{\text{МАХ}}$. Максимальное значение напряжения задания тока якоря соответствует допустимому току двигателя с учетом его перегрузочной способности. Исходя из принципа двухзонного регулирования, в канале возбуждения переменные ограничены на уровне номинальных значений.

Требуемые коэффициенты передачи обратных связей определяются выбранными номинальными значениями сигналов задания и номинальными значениями соответствующих переменных

$$K_{\text{ОТ}} = \frac{U_{\text{ЗТН}}}{I_{\text{Н}}}, K_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ЗСН}}}{\omega_{\text{Н}}}, \\ K_{\text{ОТВ}} = \frac{U_{\text{ЗТВН}}}{I_{\text{ВН}}}, K_{\text{ОН}} = \frac{U_{\text{ЗЕН}}}{U_{\text{Н}}}, K_{\text{ОЕ}} = \frac{U_{\text{ЗЕН}}}{E_{\text{ЯН}}} = \frac{U_{\text{ЗЕН}}}{k\Phi_{\text{Н}} \cdot \omega_{\text{Н}}}, K_{\text{ФПЕ}} = \frac{1}{K_{\text{П}} \cdot K_{\text{ОЕ}}}. \quad (6.34)$$

Коэффициенты передачи в канале обратной связи по ЭДС определяются следующим образом:

- коэффициент согласования в канале обратной связи по току

$$K_{\text{T}} = \frac{K_{\text{ОН}} \cdot R_{\text{Я}}}{K_{\text{ОТ}}}, \quad (6.35)$$

- согласующий коэффициент передачи

$$K_{\text{Е}} = \frac{K_{\text{ОЕ}}}{K_{\text{ОН}}}. \quad (6.36)$$

Определение постоянных времени датчика напряжения $T_{\text{ДН}}$ и фильтра в цепи обратной связи по току возбуждения T_{Φ} будут рассмотрены позднее, при рассмотрении синтеза соответствующих контуров регулирования. Остальные постоянные: $T_{\text{ДС}}$, $T_{\text{ДТ}}$, $T_{\text{ДТВ}}$ – определяются реализацией соответствующих датчиков в выбранном комплектном электроприводе. При отсутствии фильтра в канале обратной связи соответствующая постоянная времени принимается равной нулю.

Выбор начальных значений координат в рабочей точке $k\Phi_{\text{НАЧ}}$ и $\Omega_{\text{НАЧ}}$, принимаемых для настройки, будет рассмотрен позже, при рассмотрении синтеза контуров регулирования.

6.3.2. Расчет параметров электропривода с частотным управлением

Для определения начальных значений переменных в рабочей точке U_1 , Ω_0 необходимо решить систему уравнений, состоящей из выражения электромагнитного момента двигателя и закона частотного управления. Для механизмов с сухим трением требуется постоянство критического момента, что обеспечивается при $U_1^2/\omega_0 = \text{const}$. Тогда система уравнений будет иметь вид

$$\begin{cases} M_p = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot \frac{R_2 \cdot \Omega_0}{\Omega_0 - \omega_p}}{\Omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2 \cdot \Omega_0}{\Omega_0 - \omega_p} \right)^2 + \left(\frac{\Omega_0}{\omega_{0H}} \right)^2 \cdot (x_1 + x_2)^2 \right]}, \\ \frac{U_1^2}{\Omega_0} = \frac{U_H^2}{\omega_{0H}}, \end{cases} \quad (6.37)$$

где ω_p , M_p – значения скорости и момента в рабочем режиме.

Для механизмов с вентиляторной нагрузкой закон управления $U_1/\omega_0 = \text{const}$. Тогда

$$\begin{cases} M_p = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot \frac{R_2 \cdot \Omega_0}{\Omega_0 - \omega_p}}{\Omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2 \cdot \Omega_0}{\Omega_0 - \omega_p} \right)^2 + \left(\frac{\Omega_0}{\omega_{0H}} \right)^2 \cdot (x_1 + x_2)^2 \right]}, \\ \frac{U_1}{\Omega_0} = \frac{U_H}{\omega_{0H}}. \end{cases} \quad (6.38)$$

Теперь определим параметры модели двигателя для частотного управления:

- электромагнитная постоянная времени ротора двигателя (с)

$$T_{\Sigma 2} = \frac{L'_\sigma}{R_2}; \quad (6.39)$$

- величина напряжения по оси x при номинальном напряжении (В)

$$U_{1xH} = \sqrt{2} \cdot k_C \cdot U_H; \quad (6.40)$$

- относительное напряжение (о.е.)

$$\gamma = \frac{U_{1x}}{U_{1xH}} = \frac{U_1}{U_H}; \quad (6.41)$$

- относительная частота (о.е.)

$$\nu = \frac{\Omega_{0ЭЛ}}{\Omega_{0ЭЛН}} \quad (6.42)$$

где $\Omega_{0ЭЛ}$ – начальное значение скорости поля статора в рабочей точке (рад/с)

$$\Omega_{0ЭЛ} = p_d \cdot \Omega_0,$$

$$\Omega_{0ЭЛН} = \omega_{0ЭЛН};$$

- фиктивный момент короткого замыкания при номинальных частоте и напряжении (Н·м)

$$M_{кзФН} = \frac{P_D \cdot K_1^2 \cdot (\sqrt{2} \cdot U_H \cdot k_c)^2}{\Omega_{0ЭЛН} \cdot R_2}; \quad (6.43)$$

- электромеханическая постоянная времени (с)

$$T_M = \frac{J \cdot \Omega_{0ЭЛН}}{M_{кзФН}}; \quad (6.44)$$

- абсолютное скольжение (о.е.)

$$S_a = \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_{0Н}} \quad (6.45)$$

где: $\Omega = \omega_p$, $\Omega_{0Н} = \omega_{0Н}$.

После выбора номинальных значений сигналов управления напряжением $X_{\gammaН}$, управления частотой $X_{\nuН}$ и задания скорости $X_{3СН}$ определим:

- коэффициент передачи инвертора по каналу управления напряжением (о.е.)

$$K_U = \frac{U_H}{X_{\gammaН}}; \quad (6.46)$$

- коэффициент передачи по каналу управления частотой ($\text{рад/В}\cdot\text{с}$)

$$K_f = \frac{\omega_{0ЭЛН}}{X_{\nuН}}; \quad (6.47)$$

- коэффициент обратной связи по скорости ($\text{В}\cdot\text{с/рад}$)

$$K_{OC} = \frac{X_{3СН}}{\omega_H}. \quad (6.48)$$

6.3.3. Расчет параметров электропривода с векторным управлением

Недостающие параметры модели двигателя:

- электромагнитная постоянная времени статора (с)

$$T_1 = \frac{L''_{\sigma}}{R_1}; \quad (6.49)$$

- постоянная времени ротора (с)

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2}; \quad (6.50)$$

Постоянная времени инвертора определяется частотой модуляции. Ее можно принять равной $T_{\Pi} = 1 \dots 2$ мс.

После выбора номинальных значений сигналов задания потокосцепления $X_{3ПН}$, скорости $X_{3СН}$, токов $X_{3ТН}$ и сигнала управления напряжением $X_{\gammaН}$ определим коэффициенты передачи:

- коэффициент передачи обратной связи по потокосцеплению (В/Вб)

$$K_{OP} = \frac{X_{3ПН}}{\Psi_{2Н}}; \quad (6.51)$$

- коэффициент передачи обратной связи по скорости ($B^{\cdot c}/\text{рад}$)

$$K_{OC} = \frac{X_{3CH}}{\omega_{ЭЛН}}; \quad (6.52)$$

- коэффициент передачи обратной связи по току (B/A)

$$K_{OT} = \frac{X_{3TH}}{I_H}; \quad (6.53)$$

- коэффициент передачи инвертора по напряжению (о.е.)

$$K_U = \frac{U_H}{X_{UH}}. \quad (6.54)$$

6.4. Синтез регуляторов

6.4.1. Метод стандартных настроек контуров

Для синтеза контуров регулирования систем подчиненного управления используются 2 критерия оптимизации: технический и симметричный оптимумы.

При настройке на технический оптимум передаточная функция разомкнутого контура регулирования приводится к виду

$$W(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)} \quad (6.55)$$

где T_{μ} – эквивалентная малая постоянная времени контура регулирования, определяемая либо суммированием малых постоянных, имеющих в контуре, либо по формуле Д.С. Ямпольского

$$T_{\mu} = \frac{1}{2} \cdot \left[\sum T_{\mu\Pi} + \sum T_{\mu O} + \sqrt{(\sum T_{\mu\Pi} + \sum T_{\mu O})^2 + \sum T_{\mu O}^2} \right] \quad (6.56)$$

где: $T_{\mu\Pi}$ – малые постоянные времени звеньев в прямом канале регулирования,
 $T_{\mu O}$ – малые постоянные времени звеньев в канале обратной связи.

При такой настройке контур имеет переходную характеристику, представленную на рис. 6.6, которая характеризуется следующими показателями:

- время переходного процесса $t_{\text{ПП}} = 8,43 \cdot T_{\mu}$,
- перерегулирование $\sigma = 4,3\%$.

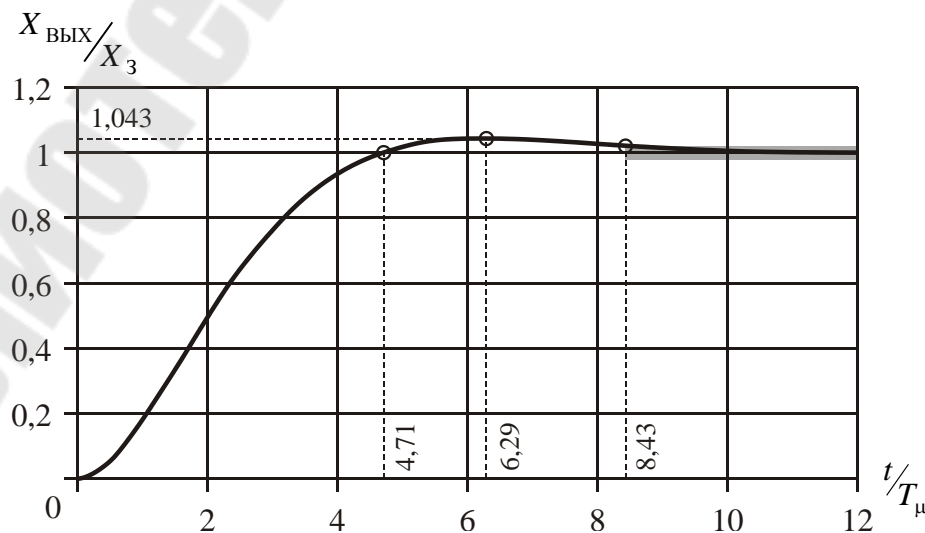


Рис. 6.6. Переходная характеристика контура, настроенного на ТО.

При двухконтурном канале регулирования скорости и настройке на технический оптимум контура скорости система имеет статическую ошибку по моменту сопротивления. Если величина ошибки недопустимо большая, то можно применить настройку на симметричный оптимум. Для этого в регулятор, настроенный на технический оптимум добавляется ПИ-звено

$$\frac{4 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1}{4 \cdot T_{\mu} \cdot p} \quad (6.57)$$

При этом передаточная функция разомкнутого контура имеет вид

$$W(p) = \frac{4 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1}{8 \cdot T_{\mu}^2 \cdot p^2 \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)} \quad (6.58)$$

При такой настройке контур имеет переходную характеристику, представленную на рис. 6.7 (сплошная линия), которая характеризуется следующими показателями:

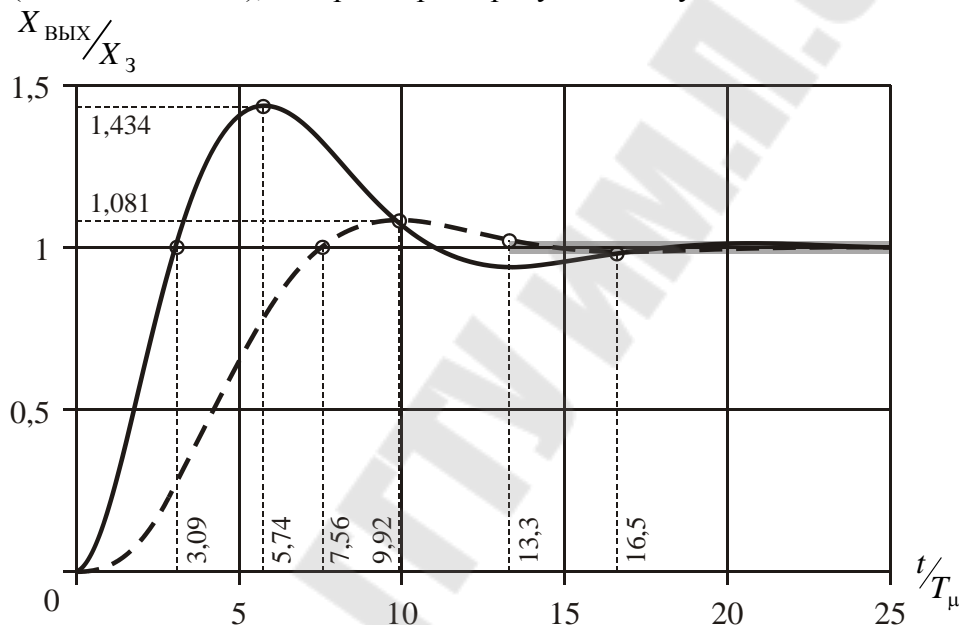


Рис. 6.7. Переходная характеристика контура, настроенного на СО.

- время переходного процесса $t_{\text{ПН}} = 16,5 \cdot T_{\mu}$,
- перерегулирование $\sigma = 43,4 \%$.

Для улучшения динамических показателей (штриховая линия на рис. 6.7):

- время переходного процесса $t_{\text{ПН}} = 13,3 \cdot T_{\mu}$,
- перерегулирование $\sigma = 8,1 \%$.

на вход контура включается апериодический фильтр с передаточной функцией

$$\frac{1}{4 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1} \quad (6.59)$$

6.4.2. Частотный метод (по желаемой логарифмической частотной характеристике)

Данный метод синтеза обычно применяется когда метод стандартных настроек контуров дает достаточно сложную структуру регуляторов, либо при сложной структуре объекта управления (например при двухмассовой схеме механической части). При этом по передаточной функции некомпенсированного разомкнутого контура (без учета регулятора) строится асимптотическая логарифмическая амплитудная характеристика контура. Затем по желаемым динамическим и статическим показателям строится

желаемая логарифмическая амплитудная характеристика контура. Логарифмическая характеристика регулятора определяется путем геометрического вычитания характеристики некомпенсированного контура из желаемой. Вид полученной характеристики однозначно определяет передаточную функцию регулятора, а частоты сопряжения – его параметры.

При определении вида желаемых характеристик контуров необходимо исходить из следующего:

1. Частоты среза подчиненных контуров должны отличаться как минимум в 2 раза.

2. Частота среза контура выбирается по требуемому быстродействию. Причем, частота среза контура скорости для тиристорного электропривода постоянного тока из-за особенностей динамики тиристорного преобразователя должна быть не более $10 \dots 20 \text{ с}^{-1}$.

3. Среднечастотная область характеристики (в области частоты среза) должна иметь наклон -20 db/дек .

4. Низкочастотная область должна иметь наклон от 0 db/дек до -40 db/дек (причем, при наклоне 0 db/дек значение коэффициента передачи контура должно быть достаточно велико, чтобы быстродействие контура определялось частотой среза контура и можно было пренебречь ошибкой контура по управлению).

5. Высокочастотная область характеристики должна выбираться так, чтобы характеристика регулятора получилась как можно более простая (т.е. по возможности должна иметь изломы там, где они есть у характеристики некомпенсированного контура).

6. Для обеспечения достаточного запаса устойчивости по фазе соотношение частоты среза контура к частотам ближайших к ней точек излома характеристики должно быть не менее, чем 2.

При соблюдении указанных условий для синтеза внешнего контура внутренний можно представить эквивалентным апериодическим звеном

$$\Phi(p) = \frac{1/K_0}{T_3 \cdot p + 1} \quad (6.60)$$

где: K_0 – коэффициент передачи обратной связи контура,

T_3 – эквивалентная постоянная времени контура, равная

$$T_3 = \frac{1}{\omega_{\text{ср}}} \quad (6.61)$$

где $\omega_{\text{ср}}$ – частота среза контура.

6.4.3. Синтез по желаемому распределению корней

Суть данного способа оптимизации состоит в приведении характеристического уравнения замкнутого контура (знаменатель передаточной функции замкнутого контура) к стандартному виду. Передаточная функция регулятора подставляется в передаточную функцию контура и, в результате структурных преобразований, получают передаточную функцию замкнутого контура. Затем выполняется нормирование уравнения. Пусть общий вид уравнения

$$a_n \cdot p^n + a_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + a_1 \cdot p + a_0 = 0,$$

в котором коэффициенты $a_n \dots a_0$ являются функциями параметров регулятора. Для нормирования вводится оператор s

$$s = p \cdot \sqrt[n]{\frac{a_n}{a_0}}, \quad p = s \cdot \sqrt[n]{\frac{a_0}{a_n}} \quad (6.62)$$

и подставляется в уравнение

$$a_n \cdot \left(\frac{a_0}{a_n}\right)^{\frac{n}{n}} \cdot s^n + a_{n-1} \cdot \left(\frac{a_0}{a_n}\right)^{\frac{n-1}{n}} \cdot s^{n-1} + \dots + a_1 \cdot \left(\frac{a_0}{a_n}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot s + a_0 = 0.$$

После деления на a_0 , получим уравнение в нормированном виде

$$s^n + \frac{a_{n-1}}{a_0} \cdot \left(\frac{a_0}{a_n}\right)^{\frac{n-1}{n}} \cdot s^{n-1} + \dots + \frac{a_1}{a_0} \cdot \left(\frac{a_0}{a_n}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot s + 1 = 0,$$

$$s^n + b_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + b_1 \cdot s + 1 = 0. \quad (6.63)$$

Коэффициенты нормированного характеристического уравнения приравниваются к коэффициентам стандартного уравнения в соответствии с выбранным критерием оптимизации. В результате решения полученной системы уравнений определяются параметры регулятора. В таблице 6.2 приведен вид уравнений для разложения по Баттерворту.

Таблица 6.2.

Нормированные характеристические уравнения.

Название способа оптимизации	Порядок уравнения n	Нормированное уравнение	$\sigma, \%$	Длительность переходного процесса tпп
Разложение по Баттерворту (максимально гладкая АЧХ)	2	$s^2 + \sqrt{2} \cdot s + 1$	4,3	2,8
	3	$s^3 + 2 \cdot s^2 + 2 \cdot s + 1$	7,1	5,9
	4	$s^4 + 2,6 \cdot s^3 + 3,4 \cdot s^2 + 2,6 \cdot s + 1$	12	6,9
	5	$s^5 + 3,24 \cdot s^4 + 5,24 \cdot s^3 + 5,24 \cdot s^2 + 3,24 \cdot s + 1$	9,5	7,8

Нормирование подобным образом характеристического уравнения равносильно применению нормирующей базовой частоты

$$\omega_B = \sqrt[n]{\frac{a_0}{a_n}}. \quad (6.64)$$

Относительное время при этом $\tau = \omega_B \cdot t$.

Применение данного способа оптимизации в ряде случаев при более простой структуре регулятора, чем при стандартных настройках, может дать лучшие динамические показатели контура.

6.4.4. Синтез регуляторов систем автоматического регулирования скорости электропривода постоянного тока

Рассмотрим подробно настройку каждого из контуров системы управления.

Структурная схема контура тока якоря представлена на рис. 6.8.

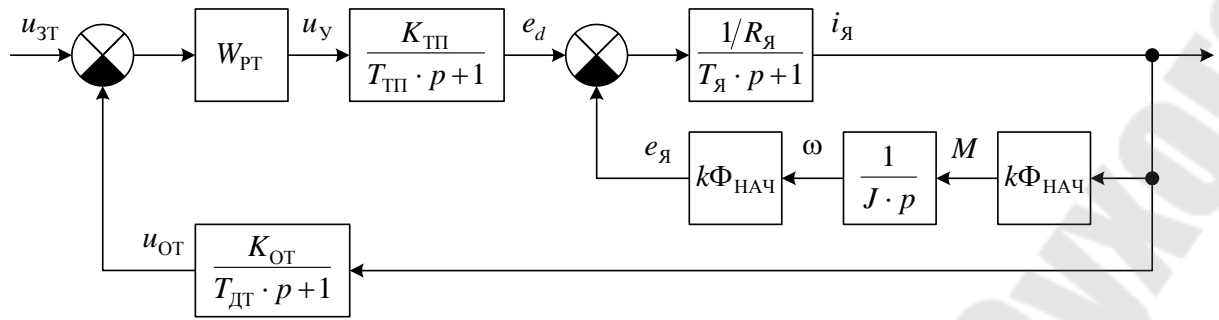


Рис. 6.8. Структурная схема контура тока якоря.

После сворачивания обратной связи по ЭДС якоря получим передаточную функцию объекта регулирования контура тока

$$W_{oi}(p) = \frac{1/R_я \cdot T_M \cdot p}{T_M \cdot p \cdot (T_я \cdot p + 1) + 1} \quad (6.65)$$

где T_M – электромеханическая постоянная времени

$$T_M = \frac{J \cdot R_я}{(k\Phi_{НАЧ})^2}. \quad (6.66)$$

При $T_M < 4 \cdot T_я$ знаменатель представляет собой апериодическое звено 2-го порядка с постоянной времени

$$T_d = \sqrt{T_M \cdot T_я} \quad (6.67)$$

и коэффициентом затухания

$$\xi = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{T_M}{T_я}}. \quad (6.68)$$

Для упрощения синтеза регулятора и наладки системы апериодическое звено второго порядка заменяют на два апериодических звена первого порядка

$$W_{oi}(p) = \frac{1/R_я \cdot T_M \cdot p}{(T_d \cdot p + 1)^2}. \quad (6.69)$$

При $T_M \geq 4 \cdot T_я$ знаменатель раскладывается на два апериодических звена с постоянными времени

$$T_{d1} = T_d \cdot (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}), \quad T_{d2} = T_d \cdot (\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}), \quad (6.70)$$

$$W_{oi}(p) = \frac{1/R_я \cdot T_M \cdot p}{(T_{d1} \cdot p + 1) \cdot (T_{d2} \cdot p + 1)}. \quad (6.71)$$

Если постоянные времени двигателя достаточно велики по сравнению с постоянными времени преобразователя и датчика тока, то малая постоянная времени контура определяется $T_{\mu} = T_{ТП} + T_{DT}$, или по формуле (6.56). Тогда, при точной настройке на технический оптимум необходим ПИД-И-регулятор

$$W_{PT}(p) = K_{PT} \cdot \frac{(T_{PT1} \cdot p + 1) \cdot (T_{PT2} \cdot p + 1)}{T_{PT1} \cdot p^2}, \quad (6.72)$$

$$K_{PT} = \frac{R_я \cdot T_{PT1}}{K_{ТП} \cdot K_{OT} \cdot T_M} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu}}, \quad (6.73)$$

$$T_{PT1} = T_{d1}, \quad T_{PT2} = T_{d2} \quad (\text{при } T_M \geq 4 \cdot T_я), \quad \text{или}$$

$$T_{PT1} = T_{PT2} = T_d \quad (\text{при } T_M < 4 \cdot T_я). \quad (6.74)$$

При выполнении условия $T_M > 20 \cdot T_{\mu}$ или при наличии в составе системы управления блока ФПЕ внутренней обратной связи двигателя по ЭДС якоря можно пренебречь. Тогда

$$W_{OI}(p) = \frac{1/R_{\text{я}}}{T_{\text{я}} \cdot p + 1}. \quad (6.75)$$

И, для настройки на технический оптимум, необходим ПИ-регулятор

$$W_{PT}(p) = K_{PT} \cdot \frac{T_{PT} \cdot p + 1}{T_{PT} \cdot p}, \quad (6.76)$$

$$T_{PT} = T_{\text{я}}, \quad K_{PT} = \frac{R_{\text{я}} \cdot T_{PT}}{K_{\text{П}} \cdot K_{\text{ОТ}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu}}. \quad (6.77)$$

Для однозонного электропривода в качестве $k\Phi_{\text{НАЧ}}$ берется номинальное значение $k\Phi_{\text{Н}}$. Для двухзонного необходимо условие пренебрежения обратной связью по ЭДС анализируется для номинального значения потока возбуждения. Если условие не выполняется, то для расчетов следует взять значение, при котором коэффициент передачи контура максимален (в процессе работы системы управления коэффициент передачи контура может уменьшаться, снижая частоту среза и быстродействие контура, но увеличивая запас устойчивости контура по фазе). Поскольку, при учете обратной связи по ЭДС, в знаменателе передаточной функции объекта управления присутствует T_M , то максимальное значение коэффициента передачи контура будет при минимальном значении потока возбуждения

$$k\Phi_{\text{MIN}} = k\Phi_{\text{Н}} \cdot \frac{\omega_{\text{Н}}}{\omega_{\text{МАХ}}}. \quad (6.78)$$

Для синтеза внешнего контура контур тока заменяется эквивалентным апериодическим звеном

$$\Phi_I(p) \approx \frac{1/K_{\text{ОТ}}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1}. \quad (6.79)$$

С учетом замены контура тока якоря эквивалентным звеном структурная схема контура скорости, при двухконтурном якорном канале системы управления, будет иметь вид, представленный на рис. 6.9.

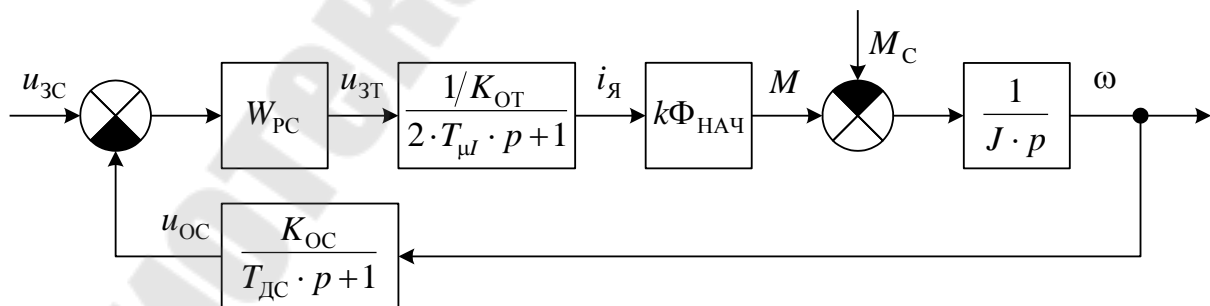


Рис. 6.9. Структурная схема контура скорости двухконтурной по якорному каналу системы управления.

Передаточная функция объекта регулирования контура скорости

$$W_{\omega\omega}(p) = \frac{k\Phi_{\text{НАЧ}}}{J \cdot p}. \quad (6.80)$$

Тогда для настройки на технический оптимум необходим П-регулятор

$$W_{PC}(p) = K_{PC} = \frac{K_{OT} \cdot J}{K_{OC} \cdot k\Phi_{НАЧ}} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\omega}}, \quad (6.81)$$

а малая постоянная времени контура скорости определяется постоянной времени контура тока и постоянной времени датчика скорости $T_{\mu\omega} = 2 \cdot T_{\mu i} + T_{ДС}$ (или по формуле (6.56)).

В однозонной системе управления поток возбуждения постоянен и равен номинальному, поэтому для расчетов берем $k\Phi_{НАЧ} = k\Phi_H$. При синтезе двухзонной выбираем значение, которое даст максимальный коэффициент передачи – $k\Phi_H$.

Для получения значения статической ошибки контура по моменту сопротивления запишем передаточную функцию замкнутого контура скорости по возмущению

$$\Phi_B(p) = -\frac{1}{J \cdot p} \cdot \frac{1}{1 + W_{\omega}(p)} = -\frac{2 \cdot T_{\mu\omega} \cdot (T_{\mu\omega} \cdot p + 1)}{2 \cdot T_{\mu\omega} \cdot p \cdot (T_{\mu\omega} \cdot p + 1) + 1}.$$

Тогда величина ошибки составит

$$\Delta\omega = \Phi_B(p) \Big|_{p=0} \cdot \Delta M_C = -\frac{2 \cdot T_{\mu\omega}}{J} \cdot \Delta M_C. \quad (6.82)$$

Обычно допустимая величина отклонения скорости при скачке момента от нуля до номинального значения не превышает 5...10 % от установившегося значения. Если полученное значение $\Delta\omega$ превышает допустимое, то следует перейти к настройке контура скорости на симметричный оптимум.

Рассмотрим настройку контура скорости для одноконтурной по якорному каналу системы. Структурная схема контура представлена на рис. 6.10.

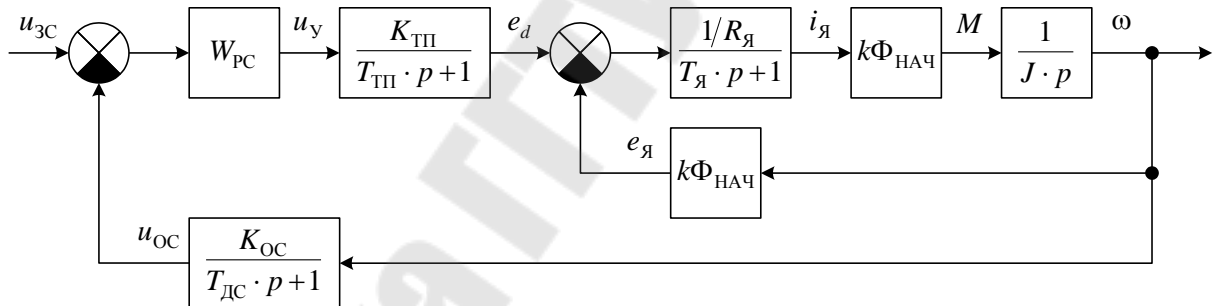


Рис. 6.10. Структурная схема контура скорости одноконтурной по якорному каналу системы управления.

После структурного преобразования получим передаточную функцию объекта регулирования контура скорости

$$W_{O\omega}(p) = \frac{1/k\Phi_{НАЧ}}{T_M \cdot p \cdot (T_я \cdot p + 1) + 1}. \quad (6.83)$$

В зависимости от соотношения T_M и $T_я$ получим передаточную функцию объекта

$$W_{O\omega}(p) = \frac{1/k\Phi_{НАЧ}}{(T_д \cdot p + 1)^2}, \text{ или} \quad (6.84)$$

$$W_{O\omega}(p) = \frac{1/k\Phi_{НАЧ}}{(T_{д1} \cdot p + 1) \cdot (T_{д2} \cdot p + 1)} \quad (6.85)$$

где $T_д$, $T_{д1}$, $T_{д2}$ определяются по (6.67) и (6.70).

Для такого объекта регулирования при настройке на технический оптимум необходим ПИД-регулятор

$$W_{PC}(p) = K_{PC} \cdot \frac{(T_{PC1} \cdot p + 1) \cdot (T_{PC2} \cdot p + 1)}{T_{PC1} \cdot p}, \quad (6.86)$$

$$K_{PC} = \frac{k\Phi_{НАЧ} \cdot T_{PC1}}{K_{ПН} \cdot K_{OC}} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\omega}}, \quad (6.87)$$

$$T_{PC1} = T_{Д1}, T_{PC2} = T_{Д2} \text{ (при } T_M \geq 4 \cdot T_{Я}), \text{ или} \\ T_{PC1} = T_{PC2} = T_{Д} \text{ (при } T_M < 4 \cdot T_{Я}). \quad (6.88)$$

Малая постоянная времени контура при этом определяется постоянными времени преобразователя и датчика скорости $T_{\mu\omega} = T_{ПН} + T_{ДС}$ (или по формуле (6.56)).

Если $T_{Д1}$ достаточно велика и выполняется условие $T_{Д1} > 4 \cdot T_{\mu\omega}$, то выбор параметров регулятора можно произвести следующим образом

$$T_{PC1} = T_{Д2}, T_{PC2} = 4 \cdot T_{\mu\omega}, K_{PC} = \frac{k\Phi_{НАЧ} \cdot T_{PC1}}{K_{ПН} \cdot K_{OC}} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\omega}} \cdot \frac{T_{Д1}}{4 \cdot T_{\mu\omega}}. \quad (6.89)$$

При такой настройке характеристика близка к симметричному оптимуму. И будет тем ближе, чем больше будет соотношение $T_{Д1}/(4 \cdot T_{\mu\omega})$.

Если $T_{Д2}$ достаточно мала, чтобы отнести ее к малым постоянным времени, то $T_{\mu\omega} = T_{ПН} + T_{ДС} + T_{Д2}$ (или по формуле (6.56)). Тогда для настройки на технический оптимум необходим ПИ-регулятор

$$W_{PC}(p) = K_{PC} \cdot \frac{T_{PC} \cdot p + 1}{T_{PC} \cdot p}, T_{PC} = T_{Д1}, K_{PC} = \frac{k\Phi_{НАЧ} \cdot T_{PC}}{K_{ПН} \cdot K_{OC}} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\omega}}. \quad (6.90)$$

Для синтеза однозонной системы управления берем $k\Phi_{НАЧ} = k\Phi_{Н}$. Для двухзонной – $k\Phi_{MIN}$ и соответствующее ему T_M .

Структурная схема контура регулирования тока возбуждения представлена на рис. 6.11.

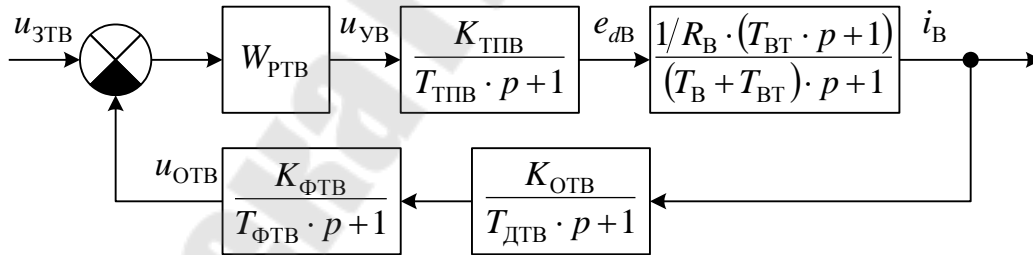


Рис. 6.11. Структурная схема контура тока возбуждения.

Объектом регулирования данного контура является комбинация аperiodического и форсирующего звеньев

$$W_{ОВ}(p) = \frac{1/R_B \cdot (T_{ВТ} \cdot p + 1)}{(T_В + T_{ВТ}) \cdot p + 1}. \quad (6.91)$$

Для компенсации форсирующего звена в канале обратной связи устанавливается аperiodический фильтр с параметрами

$$K_{ФТВ} = 1, T_{ФТВ} = T_{ВТ}. \quad (6.92)$$

Тогда произведение передаточных функций объекта и фильтра

$$W_{ОВ}(p) \cdot W_{Ф}(p) = \frac{1/R_B}{(T_В + T_{ВТ}) \cdot p + 1}. \quad (6.93)$$

Включим в малую постоянную времени контура постоянные времени преобразователя и датчика тока возбуждения $T_{\mu B} = T_{\text{ПВ}} + T_{\text{ДТВ}}$ (или по формуле (6.56)). Теперь для настройки на технический оптимум необходим ПИ-регулятор

$$W_{\text{РТВ}}(p) = K_{\text{РТВ}} \cdot \frac{T_{\text{РТВ}} \cdot p + 1}{T_{\text{РТВ}} \cdot p} \quad (6.94)$$

с параметрами

$$T_{\text{РТВ}} = T_{\text{В}} + T_{\text{ВТ}}, \quad K_{\text{РТВ}} = \frac{R_{\text{В}} \cdot T_{\text{РТВ}}}{K_{\text{ПВ}} \cdot K_{\text{ОТВ}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu B}}. \quad (6.95)$$

Поскольку в канале обратной связи присутствует аperiodическое звено, постоянная времени которого не входит в малую постоянную времени контура, то передаточная функция замкнутого контура тока возбуждения будет иметь вид

$$\Phi_{\text{В}}(p) \approx \frac{1/K_{\text{ОТВ}} \cdot (T_{\text{ФТВ}} \cdot p + 1)}{2 \cdot T_{\mu B} \cdot p + 1}. \quad (6.96)$$

Структурная схема контура ЭДС приведена на рис. 6.12.

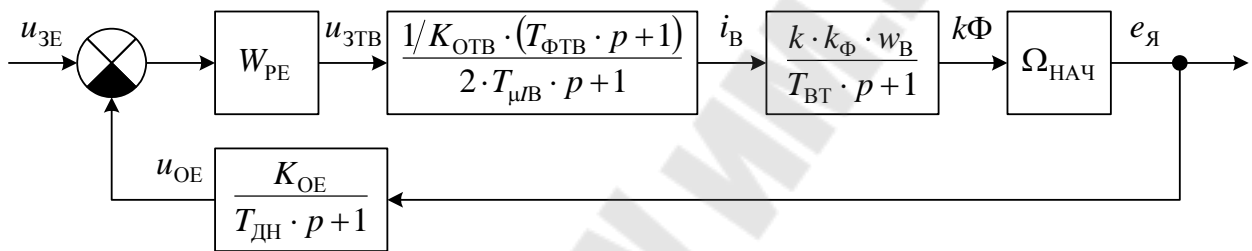


Рис. 6.12. Структурная схема контура ЭДС.

Выражение для ЭДС в операторной форме, из уравнения электрического равновесия якорной цепи

$$e_{\text{Я}} = u_{\text{Я}} - i_{\text{Я}} \cdot R_{\text{Я}} \cdot (T_{\text{Я}} \cdot p + 1) = (T_{\text{Я}} \cdot p + 1) \cdot \left(u_{\text{Я}} \cdot \frac{1}{T_{\text{Я}} \cdot p + 1} - i_{\text{Я}} \cdot R_{\text{Я}} \right).$$

По полной структурной схеме (рис. 6.2) напряжение обратной связи по ЭДС равно

$$u_{\text{ОЕ}} = K_{\text{ВМ}} \cdot \left(u_{\text{Я}} \cdot \frac{K_{\text{ОН}}}{T_{\text{ДН}} \cdot p + 1} - i_{\text{Я}} \cdot \frac{K_{\text{Т}} \cdot K_{\text{ОТ}}}{T_{\text{ДТ}} \cdot p + 1} \right).$$

Умножив и разделив на $T_{\text{ДН}} \cdot p + 1$ и учтя, что $T_{\text{ДН}} \gg T_{\text{ДТ}}$, получим

$$u_{\text{ОЕ}} = \frac{1}{T_{\text{ДН}} \cdot p + 1} \cdot K_{\text{ВМ}} \cdot (T_{\text{ДН}} \cdot p + 1) \cdot \left(u_{\text{Я}} \cdot \frac{K_{\text{ОН}}}{T_{\text{ДН}} \cdot p + 1} - i_{\text{Я}} \cdot K_{\text{Т}} \cdot K_{\text{ОТ}} \right).$$

Теперь, сравнив полученное выражение с выражением для ЭДС, можно заметить, что постоянную времени датчика напряжения надо выбирать равной $T_{\text{ДН}} = T_{\text{Я}}$. При этом

$$u_{\text{ОЕ}} = \frac{K_{\text{ОЕ}}}{T_{\text{ДН}} \cdot p + 1} \cdot e_{\text{Я}} = \frac{K_{\text{ОЕ}}}{T_{\text{Я}} \cdot p + 1} \cdot e_{\text{Я}}.$$

Передаточная функция объекта управления контура ЭДС имеет вид

$$W_{\text{ОЕ}}(p) = \frac{k \cdot k_{\text{Ф}} \cdot w_{\text{В}} \cdot \Omega_{\text{НАЧ}}}{T_{\text{ВТ}} \cdot p + 1} \quad (6.97)$$

Но в передаточной функции замкнутого контура тока возбуждения (6.96) имеется форсирующее звено с постоянной времени $T_{\text{ФТВ}} = T_{\text{ВТ}}$ (6.92). В результате в прямом канале контура получим

$$W_{\text{ОЕ}}(p) \cdot \Phi_{\text{В}}(p) = \frac{k \cdot k_{\text{Ф}} \cdot w_{\text{В}} \cdot \Omega_{\text{НАЧ}} \cdot 1/K_{\text{ОТВ}}}{2 \cdot T_{\text{МВ}} \cdot p + 1}.$$

Т.о. объект регулирования – безинерционный и, для настройки на технический оптимум необходим И-регулятор. При этом малая постоянная времени контура определяется малой постоянными времени контура тока возбуждения и датчика напряжения $T_{\text{МЕ}} = 2 \cdot T_{\text{МВ}} + T_{\text{ДН}}$ (или по формуле (6.56)).

$$W_{\text{РЕ}}(p) = \frac{1}{T_{\text{РЕ}} \cdot p}, \quad (6.98)$$

$$T_{\text{РЕ}} = \frac{k \cdot k_{\text{Ф}} \cdot w_{\text{В}} \cdot \Omega_{\text{НАЧ}} \cdot K_{\text{ОЕ}}}{K_{\text{ОТВ}}} \cdot 2 \cdot T_{\text{МЕ}}. \quad (6.99)$$

В качестве $\Omega_{\text{НАЧ}}$ необходимо взять значение, которое даст максимальный коэффициент передачи контура, т.е. $\Omega_{\text{НАЧ}} = \omega_{\text{МАХ}}$.

В малую постоянную времени контура ЭДС входит $T_{\text{ДН}} = T_{\text{Я}}$, которая обычно больше малых постоянных времени. Это, в большинстве случаев, позволяет разделить по быстрдействию контура регулирования скорости и ЭДС, для исключения их взаимного влияния. Если малые постоянные времени контуров скорости и ЭДС оказываются соизмеримыми, то необходимо искусственно снизить быстрдействие контура ЭДС.

Ограничение регуляторов тока якоря и возбуждения выбирается так, чтобы максимальное значение управляющего напряжения было равным максимальному значению опорного напряжения СИФУ соответствующих преобразователей

$$\begin{aligned} U_{\text{РТ ОГР}\pm} &= \pm U_{\text{ОП МАХ}} \text{ (при отсутствии ФПЕ), или} \\ U_{\text{РТ ОГР}\pm} &= \pm \frac{R_{\text{Я}} \cdot I_{\text{Н}} \cdot \lambda_{\text{I}}}{K_{\text{П}}} \text{ (при наличии ФПЕ),} \\ U_{\text{РТВ ОГР-}} &= 0, U_{\text{РТВ ОГР+}} = U_{\text{ОП МАХ В}}, \end{aligned} \quad (6.100)$$

где λ_{I} – перегрузочная способность двигателя (кратковременная).

Уровень ограничения регулятора скорости должен соответствовать заданию максимально допустимого тока якоря для двухконтурной системы или максимальному значению опорного напряжения СИФУ – для одноконтурной

$$U_{\text{РС ОГР}} = \pm K_{\text{ОТ}} \cdot I_{\text{Н}} \cdot \lambda_{\text{I}}, \text{ или } U_{\text{РС ОГР}} = \pm U_{\text{ОП МАХ}}. \quad (6.101)$$

Поскольку по принципу действия двухзонной системы управления ток возбуждения не должен превышать номинального значения, уровень ограничения регулятора ЭДС должен быть равным

$$U_{\text{РЕ ОГР-}} = 0, U_{\text{РЕ ОГР+}} = K_{\text{ОТВ}} \cdot I_{\text{ВН}}. \quad (6.102)$$

6.4.5. Синтез системы управления скоростью с частотным управлением

При синтезе системы частотного управления следует выбирать быстрдействие контура меньше длительности электромагнитных переходных процессов в двигателе. Только в этом случае обеспечивается допущение о постоянстве потокосцепления, на основании которого получена упрощенная модель двигателя для частотного управления. Следствием этого допущения является то, что двигатель постоянно работает на устойчивой части механической характеристики. Попытка реализовать высокое

быстродействие приводит к неустойчивым колебаниям системы и опрокидыванию двигателя. Кроме того, в электроприводах с частотным управлением обязательно используется задатчик интенсивности. С учетом сказанного влиянием канала управления напряжением на процессы в контуре скорости пренебрегают. Тогда структурная схема контура скорости примет вид, показанный на рис. 6.13.

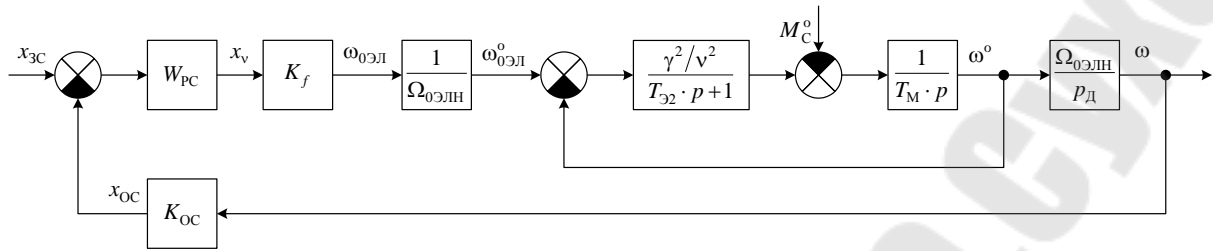


Рис. 6.13. Структурная схема контура регулирования скорости.

Передаточная функция объекта управления контура имеет вид

$$W_{\text{О}\omega}(p) = \frac{1/p_D}{\frac{v^2}{\gamma^2} \cdot T_M \cdot p \cdot (T_{\text{Э}2} \cdot p + 1) + 1}.$$

Обозначим

$$T'_M = \frac{v^2}{\gamma^2} \cdot T_M. \quad (6.103)$$

Тогда

$$W_{\text{О}\omega}(p) = \frac{1/p_D}{T'_M \cdot p \cdot (T_{\text{Э}2} \cdot p + 1) + 1}. \quad (6.104)$$

В зависимости от соотношения T'_M и $T_{\text{Э}2}$ объект управления представляется одним апериодическим звеном второго порядка или двумя апериодическими звеньями первого порядка, параметры которых T_D , ξ или $T_{\text{Д}1}$, $T_{\text{Д}2}$ рассчитываются по формулам (6.67), (6.68), (6.70) при замене T_M на T'_M и $T_{\text{Я}}$ на $T_{\text{Э}2}$. При настройке на технический оптимум с выбором малой постоянной времени контура $T_{\mu\omega} = T_{\text{Д}2}$ (или $T_{\mu\omega} = T_D$ при $\xi \leq 1$) быстродействие контура может оказаться слишком высоким по отношению к электромагнитным процессам в двигателе. В этом случае следует перейти к синтезу частотным методом и снижать частоту среза контура $\omega_{\text{СР}}$. При синтезе на технический оптимум необходим ПИ-регулятор

$$W_{\text{РС}}(p) = K_{\text{РС}} \cdot \frac{T_{\text{РС}} \cdot p + 1}{T_{\text{РС}} \cdot p} \quad (6.105)$$

его параметры должны быть выбраны следующим образом

$$T_{\text{РС}} = T_{\text{Д}1} \text{ (или } T_{\text{РС}} = T_D \text{ при } \xi \leq 1), K_{\text{РС}} = \frac{p_D \cdot T_{\text{РС}}}{K_f \cdot K_{\text{ОС}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\omega}}. \quad (6.106)$$

6.4.6. Синтез регуляторов системы управления скоростью электропривода с векторным управлением

При рассмотрении контура тока i_{1x} учтем компенсацию обратной связи по производной потокосцепления и компенсацию перекрестной связи между каналами

регулирования ($L_{\sigma}'' \cdot \omega_{0ЭЛ} \cdot i_{1y}$). Тогда структурная схема контура тока i_{1x} будет иметь вид, представленный на рис. 6.14.

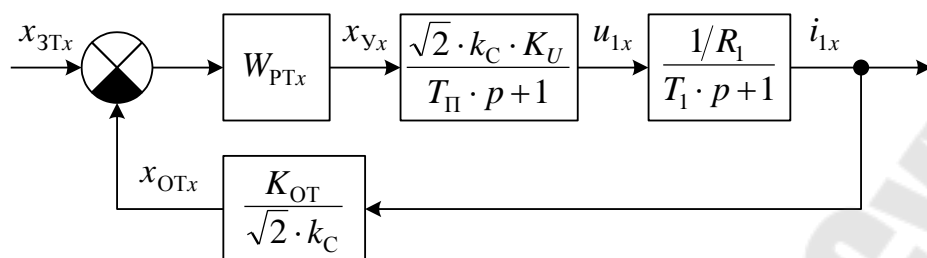


Рис. 6.14. Структурная схема контура регулирования тока i_{1x} .

Объектом регулирования контура тока i_{1x} является аperiodическое звено

$$W_{Olx}(p) = \frac{1/R_1}{T_1 \cdot p + 1}. \quad (6.107)$$

И для настройки на технический оптимум необходим ПИ-регулятор

$$W_{PTx}(p) = K_{PTx} \cdot \frac{T_{PTx} \cdot p + 1}{T_{PTx} \cdot p}. \quad (6.108)$$

Выбрав в качестве малой постоянной времени контура постоянную времени инвертора $T_{\mu x} = T_{II}$ определим параметры регулятора

$$T_{PTx} = T_1, \quad K_{PTx} = \frac{R_1 \cdot T_{PTx}}{K_U \cdot K_{OT}} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu x}}. \quad (6.109)$$

Для синтеза внешнего контура регулирования потокосцепления представим передаточную функцию замкнутого контура регулирования тока i_{1x} в виде

$$\Phi_{ix}(p) \approx \frac{\sqrt{2} \cdot k_C / K_{OT}}{2 \cdot T_{\mu x} \cdot p + 1}. \quad (6.110)$$

Тогда структурная схема контура потокосцепления ротора примет вид, представленный на рис. 6.15.

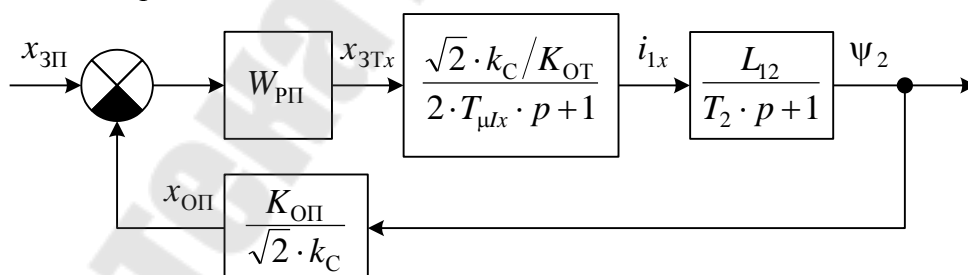


Рис. 6.15. Структурная схема контура регулирования потокосцепления.

Объектом регулирования контура потокосцепления является аperiodическое звено

$$W_{OP}(p) = \frac{L_{12}}{T_2 \cdot p + 1}. \quad (6.111)$$

При таком объекте регулирования для настройки на технический оптимум необходим ПИ-регулятор

$$W_{ПП}(p) = K_{ПП} \cdot \frac{T_{ПП} \cdot p + 1}{T_{ПП} \cdot p}. \quad (6.112)$$

При выборе малой постоянной времени контура $T_{\mu\Pi} = 2 \cdot T_{\mu x}$ параметры регулятора

$$T_{\text{ПИ}} = T_2, K_{\text{ПИ}} = \frac{K_{\text{ОТ}} \cdot T_{\text{ПИ}}}{L_{12} \cdot K_{\text{ОП}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\text{ПИ}}} \quad (6.113)$$

В контуре регулирования тока i_{1y} вводится компенсирующая положительная обратная связь перекрестной связи между каналами управления ($L_{\sigma}'' \cdot \omega_{\text{ЭЛ}} \cdot i_{1x}$) и по ЭДС. С учетом этого структурная схема контура имеет вид, показанный на рис. 6.16. Поскольку контур с учетом компенсационных связей полностью идентичен контуру i_{1x} , то и выбор регулятора и его параметров производится так же, по выражениям (6.108) и (6.109).

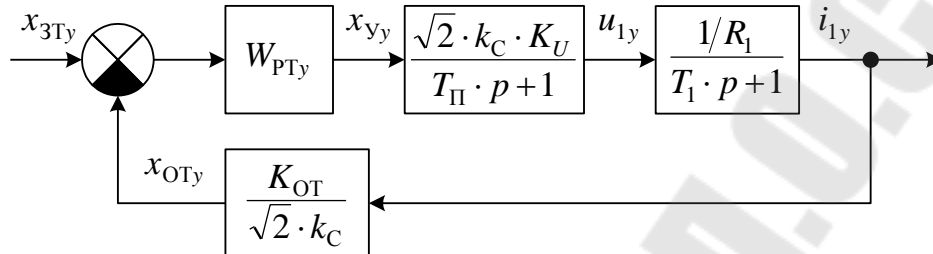


Рис. 6.16. Структурная схема контура регулирования тока i_{1y} .

Заменим контур регулирования тока i_{1y} эквивалентным апериодическим звеном, аналогично контуру i_{1x} (6.110). Получим структурную схему контура регулирования скорости, показанную на рис. 6.17. На ней учтено, что для компенсации изменения потока на выходе регулятора скорости стоит делитель. Объект регулирования контура – интегрирующий

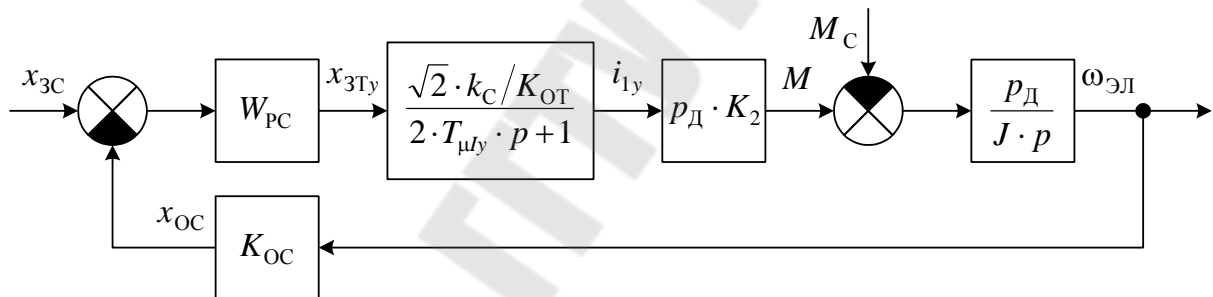


Рис. 6.17. Структурная схема контура регулирования скорости.

$$W_{\text{Ов}}(p) = \frac{p_{\text{Д}}^2 \cdot K_2}{J \cdot p} \quad (6.114)$$

И для настройки на технический оптимум необходим П-регулятор

$$W_{\text{PC}}(p) = K_{\text{PC}} = \frac{K_{\text{ОТ}} \cdot J}{\sqrt{2} \cdot k_C \cdot p_{\text{Д}}^2 \cdot K_2 \cdot K_{\text{ОС}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\omega}} \quad (6.115)$$

где малая постоянная времени контура скорости определяется эквивалентной постоянной времени контура тока $T_{\mu\omega} = 2 \cdot T_{\mu y}$.

Для получения значения статической ошибки контура по моменту сопротивления запишем передаточную функцию замкнутого контура скорости по возмущению

$$\Phi_{\text{В}}(p) = -\frac{\frac{p_{\text{Д}}}{J \cdot p}}{1 + W_{\text{Ов}}(p)} = -\frac{\frac{2 \cdot T_{\mu\omega} \cdot p_{\text{Д}}}{J} \cdot (T_{\mu\omega} \cdot p + 1)}{2 \cdot T_{\mu\omega} \cdot p \cdot (T_{\mu\omega} \cdot p + 1) + 1}$$

Тогда величина ошибки составит

$$\Delta\omega = \frac{\Delta\omega_{\text{ЭД}}}{P_{\text{Д}}} = \frac{\Phi_{\text{В}}(p)|_{p=0} \cdot \Delta M_{\text{С}}}{P_{\text{Д}}} = -\frac{2 \cdot T_{\mu\omega}}{J} \cdot \Delta M_{\text{С}}. \quad (6.116)$$

Если полученное значение $\Delta\omega$ превышает допустимое, то следует перейти к настройке на симметричный оптимум.

6.5. Анализ динамики

6.5.1. Анализ динамики электропривода постоянного тока

Переходные процессы следует рассчитывать по полной не преобразованной структурной схеме (с учетом ограничения регуляторов), приведенной на рис. 6.2. Переходные процессы, рассчитываемые для однозонного электропривода приведены в табл. 6.3, для двухзонного – в табл. 6.4. Если в переходных процессах «в малом» регуляторы войдут в ограничения, то следует уменьшить величину скачка входного сигнала. Кроме указанных процессов производится расчет процессов за один цикл работы.

Таблица 6.3.

Переходные процессы для однозонной системы управления.

№	Процесс, величина изменяемого сигнала	Начальные условия
1	По управлению «в малом», $u_{3\text{С}} = 0,01 \cdot U_{3\text{СН}}$	Нулевые
2	По моменту сопротивления «в малом», $M_{\text{С}} = 0,01 \cdot M_{\text{Н}}$	
3	По напряжению сети «в малом», $U_{\text{С}} = 0,01 \cdot U_{2\text{НФ}}$	
4	Пуск на холостом ходу, $u_{3\text{С}} = U_{3\text{СН}}$, $M_{\text{С}} = 0,1 \cdot M_{\text{Н}}$	
5	По моменту сопротивления, $M_{\text{С}} = M_{\text{Н}}$	п. 4
6	По напряжению сети, $U_{\text{С}} = 0,1 \cdot U_{2\text{НФ}}$	

Таблица 6.4.

Переходные процессы для двухзонной системы управления.

№	Процесс, величина изменяемого сигнала	Начальные условия
1	Подача возбуждения, $u_{3\text{Э}} = U_{3\text{ЭН}}$	Нулевые
2	По заданию скорости «в малом», $u_{3\text{С}} = 0,01 \cdot U_{3\text{СН}}$	п. 1
3	По моменту сопротивления «в малом», $M_{\text{С}} = 0,01 \cdot M_{\text{Н}}$	
4	По напряжению сети «в малом», $U_{\text{С}} = 0,01 \cdot U_{2\text{НФ}}$	
5	Пуск на холостом ходу, $u_{3\text{С}} = 0,9 \cdot U_{3\text{СН}}$, $M_{\text{С}} = 0,1 \cdot M_{\text{Н}}$	
6	По моменту сопротивления, $M_{\text{С}} = M_{\text{Н}}$	п. 5
7	По напряжению сети, $U_{\text{С}} = 0,1 \cdot U_{2\text{НФ}}$	
8	Переход во 2-ую зону, $u_{3\text{С}} = 1,2 \cdot U_{3\text{СН}}$	
9	По заданию скорости «в малом», $u_{3\text{С}} = 1,3 \cdot U_{3\text{СН}}$	п. 8
10	По заданию ЭДС «в малом», $u_{3\text{Э}} = 0,9 \cdot U_{3\text{ЭН}}$	
11	По моменту сопротивления «в малом», $M_{\text{С}} = 0,1 \cdot M_{\text{Н}}$	
12	По напряжению сети «в малом», $U_{\text{С}} = 0,1 \cdot U_{2\text{НФ}}$	

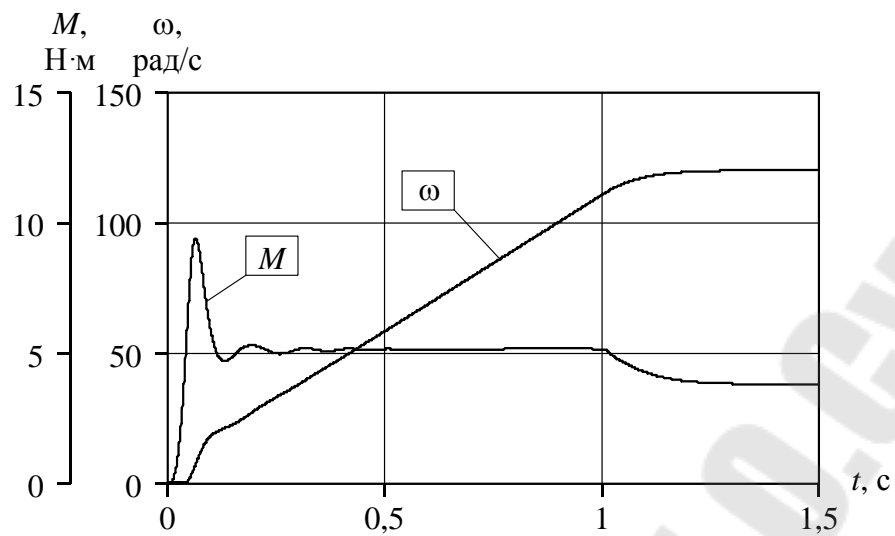
6.5.2. Анализ динамики электропривода с частотным управлением

Рассчитывать переходные процессы в системе частотного управления следует по системе уравнений

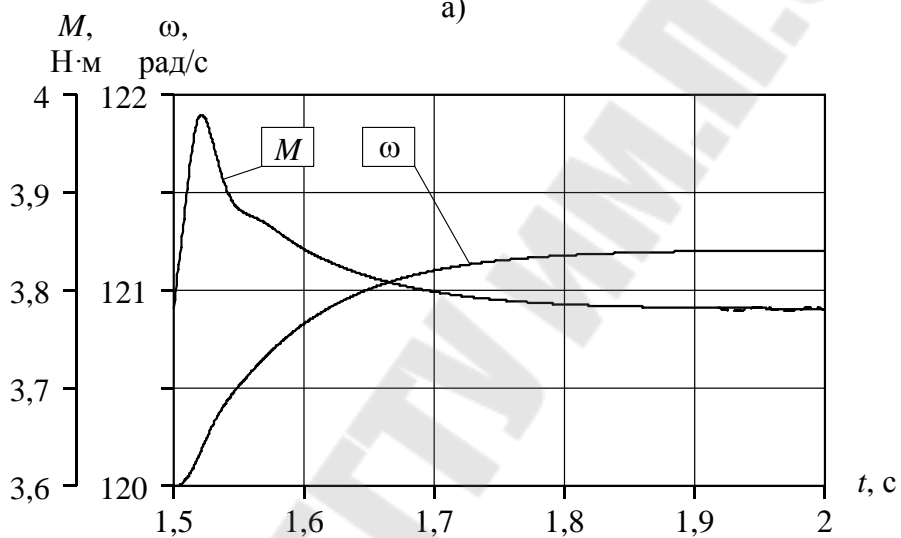
$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{dx_v}{dt} = \frac{K_{PC}}{T_{PC}} \cdot \left(T_{PC} \cdot \frac{dx_{3C}}{dt} + x_{3C} - T_{PC} \cdot K_{OC} \cdot \frac{d\omega}{dt} - K_{OC} \cdot \omega \right), \\
 x_\gamma = f(x_v), \\
 \omega_{0ЭЛ} = K_f \cdot x_v, \\
 u_{1x} = \sqrt{2} \cdot k_C \cdot K_U \cdot x_\gamma, \\
 \frac{d\psi_{1x}}{dt} = u_{1x} - R_1 \cdot i_{1x} + \omega_{0ЭЛ} \cdot \psi_{1y}, \\
 \frac{d\psi_{1y}}{dt} = -R_1 \cdot i_{1y} - \omega_{0ЭЛ} \cdot \psi_{1x}, \\
 \frac{d\psi_{2x}}{dt} = -R_2 \cdot i_{2x} + (\omega_{0ЭЛ} - \omega_{ЭЛ}) \cdot \psi_{2y}, \\
 \frac{d\psi_{2y}}{dt} = -R_2 \cdot i_{2y} - (\omega_{0ЭЛ} - \omega_{ЭЛ}) \cdot \psi_{2x}, \\
 i_{1x} = \frac{L_2 \cdot \psi_{1x} - L_{12} \cdot \psi_{2x}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2}, \\
 i_{1y} = \frac{L_2 \cdot \psi_{1y} - L_{12} \cdot \psi_{2y}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2}, \\
 i_{2x} = \frac{L_1 \cdot \psi_{2x} - L_{12} \cdot \psi_{1x}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2}, \\
 i_{2y} = \frac{L_1 \cdot \psi_{2y} - L_{12} \cdot \psi_{1y}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2}, \\
 M = \frac{p_D \cdot L_{12}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2} \cdot (\psi_{1y} \cdot \psi_{2x} - \psi_{1x} \cdot \psi_{2y}), \\
 \frac{d\omega_{ЭЛ}}{dt} = \frac{p_D}{J} \cdot (M - M_C), \\
 \omega = \frac{\omega_{ЭЛ}}{p_D}.
 \end{array} \right. \quad (6.117)$$

При этом, поскольку система – смешанная система алгебраических и дифференциальных уравнений, то удобнее всего воспользоваться средствами программирования в MathCAD.

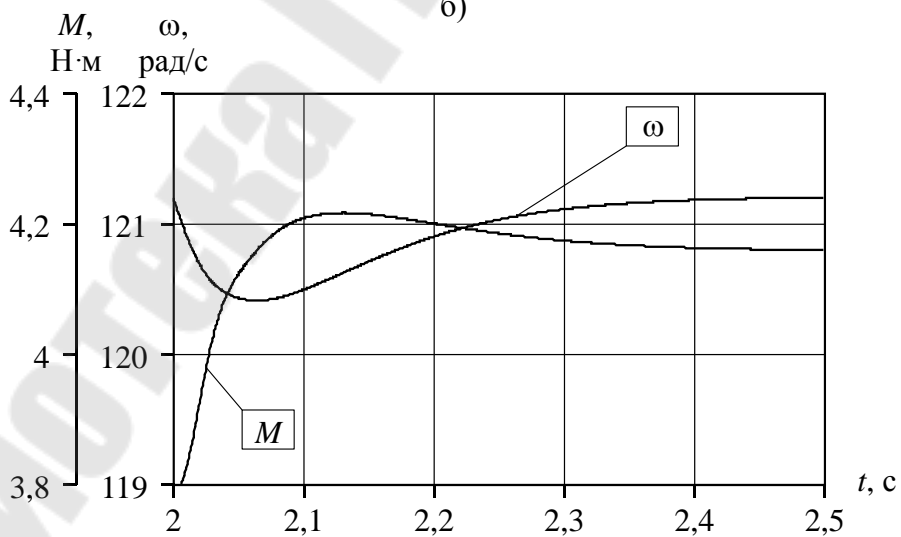
Рассчитываемые переходные процессы приведены в табл. 6.5. Причем функцию для определения сигнала задания скорости для переходного процесса пуска следует задать с учетом задатчика интенсивности. Задатчик интенсивности в электроприводах с частотным управлением работает следующим образом: вначале сигнал задания скачком увеличивается до 10 % от номинального (величина скачка регулируется), а затем линейно возрастает за заданный интервал времени до номинального значения. На рис. 6.18 показан пример диаграмм переходных процессов (синтез частотным методом). Кроме указанных в табл. 6.5 рассчитываются процессы за цикл работы.



а)



б)



в)

Рис. 6.18. Переходные процессы в системе частотного регулирования асинхронного электродвигателя: а) пуск под нагрузкой с учетом задатчика интенсивности, б) по заданию, в) по моменту сопротивления.

Переходные процессы для системы частотного управления.

№	Процесс, величина изменяемого сигнала	Начальные условия
1	Пуск под нагрузкой, $x_{3C} = f(t)$, $M_C = 0,5 \cdot M_H$	Нулевые
2	По заданию, $x_{3C} = 1,01 \cdot U_{3CH}$	п. 1
3	По моменту сопротивления, $M_C = M_H$	п. 2

6.5.3. Анализ динамики электропривода с векторным управлением

Для данной системы управления, как показывают расчеты, переходные процессы в упрощенной и точной моделях различаются только в начальный момент времени в переходном процессе подачи сигнала задания потокосцепления. Поэтому допустимо рассчитывать переходные процессы по упрощенной модели, представленной на рис. 6.5. При расчетах в Matlab Simulink делители для исключения деления на ноль следует реализовывать в виде подсистемы, как показано на рис. 6.19. Также следует учесть ограничение регуляторов. При переходе во 2-ую зону необходимо снижать сигнал задания потокосцепления. Для учета этого можно использовать подсистему, аналогичную показанной на рис. 6.20, и подав на ее вход сигнал обратной связи по скорости.

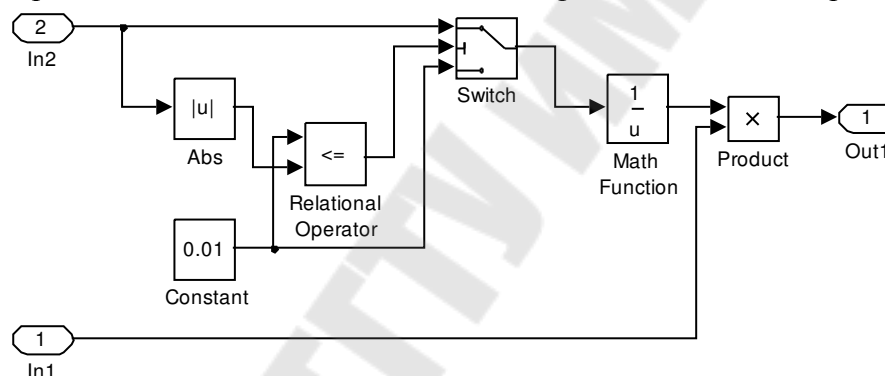


Рис. 6.19. Реализация делителя в Matlab Simulink.

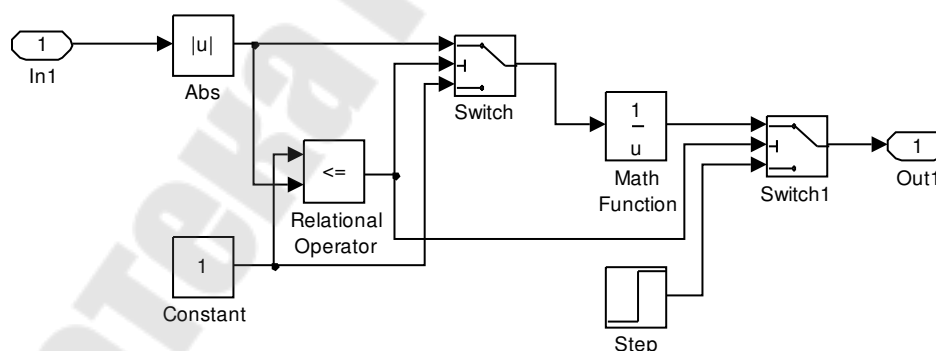


Рис. 6.20. Реализация формирователя сигнала задания потокосцепления.

Рассчитываемые переходные процессы приведены в табл. 6.6. В первом переходном процессе, если выбранный электропривод не имеет функции предварительного подмагничивания двигателя постоянным током, то при подаче сигнала задания потокосцепления необходимо одновременно подать сигнал задания скорости 1...5 % от X_{3CH} (стартовая скорость электроприводов с векторным управлением в зависимости от изготовителя составляет 0,5...2 Гц). Для процесса пуска сигнала задания скорости необходимо формировать с учетом задатчика интенсивности. Также следует рассчитать процессы за цикл работы.

Таблица 6.6.

Переходные процессы для системы векторного управления.

№	Процесс, величина изменяемого сигнала	Начальные условия
1	Подача сигнала задания потокосцепления, $x_{зп} = X_{зпн}, x_{зс} = 0,01 \cdot X_{зсн},$ либо $x_{зп} = X_{зпн}$	Нулевые
2	Пуск, $x_{зс} = 0,9 \cdot X_{зсн}, M_C = 0,1 \cdot M_H$	п. 1
3	По заданию скорости «в малом», $x_{зс} = 0,91 \cdot X_{зсн}$	п. 2
4	По моменту сопротивления, $M_C = M_H$	
5	Переход во 2-ую зону, $x_{зс} = 1,2 \cdot X_{зсн}$	п. 5
6	По заданию скорости «в малом», $x_{зс} = 1,21 \cdot X_{зсн}$	
7	По моменту сопротивления, $M_C = M_H$	

Приложение 1

Министерство образования республики Беларусь

Учреждение образования Гомельский государственный технический
университет им. П.О. Сухого

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к дипломному проекту

на тему «Модернизация электропривода рольганга-ускорителя
на ОАО «Гомельстекло».

Разработал студент гр. ЭП-51 _____ Савченко В.М.

Консультант по экономической части _____ Котова С.Н.

Консультант по ОТ и ТБ _____ Шапоров В.В.

Руководитель проекта _____ Погуляев М.Н.

Дипломный проект (_____ 92 _____ стр., _____ 8 _____ листов) допущен к защите в
Государственной экзаменационной комиссии

Зав. каф. АЭП _____ Луковников В.И.

Гомель 2006

Приложение 2

Форма №17

Учреждение образования

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

Факультет Автоматизированных
и информационных систем

Кафедра «Автоматизированный
электропривод»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой _____
подпись

« 5 » _____ апреля 2006 г.

ЗАДАНИЕ ПО ДИПЛОМНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ

Студенту Савченко Василию Михайловичу

1. Тема проекта Модернизация электропривода рольганга-ускорителя
на ОАО «Гомельстекло»

Утверждена приказом по ВУЗу от 24.03.2006 г. № 236-С

2. Сроки сдачи студентом законченного проекта _____

3. Исходные данные к проекту _____

1. Линейная скорость перемещения стекла «медленно» – 1200 м/ч.

2. Линейная скорость перемещения стекла «быстро» – 4800 м/ч.

3. Время разгона – 1,5 с.

4. Время торможения – 1,5 с.

4. Содержание расчётно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов _____)

Введение.

1. Анализ технического задания.

2. Описание технологического процесса.

3. Выбор системы электропривода.

4. Выбор силового оборудования.

5. Синтез и анализ электропривода.

6. Схема выбора размера листа.

7. Мероприятия по обеспечению техники безопасности.

8. Экономическая проработка проекта.

Заключение.

Спецификация.

Литература.

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей и графиков) _____

1. *Общий вид рольганга-ускорителя, 1 лист.*

2. *Функциональная схема электропривода, 1 лист.*

3. *Структурная схема системы автоматического управления, 1 лист.*

4. *Схема выбора размера листа, 1 лист.*

5. *Принципиальная электрическая схема электропривода, 1 лист.*

6. *Диаграммы переходных процессов, 1 лист.*

7. *Технико-экономические показатели электропривода, 1 лист.*

6. Консультанты по проекту (с указанием относящихся к ним разделов проекта)

1. *Руководитель и консультант дипломного проекта к.т.н., доцент Погуляев М.Н.*

2. *Консультант по разделу охраны труда и технике безопасности ст. преподаватель Шапоров В.В.*

3. *Консультант по экономической части ассистент Котова С.Н.*

7. Дата выдачи задания « 5 » апреля 2006 г.

8. Календарный график работы над проектом на весь период проектирования (с указанием сроков выполнения и трудоемкости отдельных этапов) _____

Пункты 1, 2, 3, 4 – 05.04.2006 – 24.04.2006 г.

Пункты 5, 6, 7 – 24.04.2006 – 15.05.2006 г.

Пункт 8, оформление проекта – 15.05.2006 – 16.06.2006 г.

Руководитель _____

подпись

Задание принял к исполнению (дата) « 5 » апреля 2006 г.

Подпись студента _____

Литература

1. Единая система конструкторской документации: Справочное пособие. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 351 с.
2. Единая система технологической документации: Справочное пособие. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 325 с.
3. Усатенко С.Т. и др. Выполнение электрических схем по ЕСКД. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 316 с.
4. Александров К.К., Кузьмина Е.Г. Электротехнические чертежи и схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 286 с.
5. Клюев А.С. Техника чтения схем автоматического управления и технического контроля. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 430 с.
6. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / Под ред. В.И. Круповича и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 416 с.
7. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / Под ред. В.М. Перельмутера. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 318 с.
8. Чернов Е.А., Кузьмин В.П. Комплектные электроприводы станков с ЧПУ: Справочное пособие. – Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1989. – 320 с.
9. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.
10. Марголин Ш.М. Электропривод машин непрерывного литья заготовок. – М.: Металлургия, 1987. – 279 с.
11. Корытин А.М. и др. Автоматизация типовых технологических процессов и установок. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 432 с.
12. Лещинский Л.Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с.
13. Коровин Б.Г. и др. Системы программного управления промышленными установками и робототехническими комплексами. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
14. Лебедев А.М. и др. Следящие электроприводы станков с ЧПУ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 221 с.
15. Сазонов А.А. Микроэлектронные устройства автоматики. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 384 с.
16. Башарин А.В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 512 с.
17. Солодовников В.В. и др. Микропроцессорные автоматические системы регулирования: Основы теории и элементы. – М.: Высшая школа, 1991. – 254 с.
18. Дроздов В.Н. и др. Системы автоматического управления с микро-ЭВМ. – Л.: Машиностроение, 1989. – 283 с.
19. Сосонкин В.Л. Программное управление технологическим оборудованием. – М.: Машиностроение, 1991. – 223 с.
20. Фираго Б.И. Теория электропривода: Учеб. пособие для вузов. – Минск: Техноперспектива, 2004. – 527 с.
21. Фираго Б.И. Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов: учеб. пособие. – Минск: Техноперспектива, 2012. – 639 с.
22. ГОСТ 2.105-95. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам. – Минск: Изд. стандартов, 1996. – 36 с.
23. Правила оформления пояснительных записок и графической части курсовых и дипломных проектов. – М.: Российская гос. корп. по производству ЛБП, ОК и УЗ, УМК, 1991. – 47 с.

Содержание

Введение.....	3
1. Организация дипломного проектирования.....	3
1.1. Цель и задачи дипломного проектирования.....	3
1.2. Тематика дипломного проекта.....	3
1.3. Порядок работы над проектом.....	4
1.3.1. Выбор темы, составление плана работы.....	4
1.3.2. Сбор материалов к проекту.....	4
1.3.3. Работа над проектом.....	5
1.4. Руководство и консультации при дипломном проектировании.....	5
1.5. Рецензирование и защита дипломного проекта.....	6
2. Содержание дипломных проектов.....	7
2.1. Объем расчетно-пояснительной записки и графического материала.....	7
2.2. Содержание расчетно-пояснительной записки.....	7
2.2.1. Введение.....	7
2.2.2. Анализ технического задания на дипломное проектирование.....	7
2.2.3. Выбор системы основного электропривода главного механизма рабочей машины.....	7
2.2.4. Выбор силового электрооборудования электропривода.....	8
2.2.5. Синтез и анализ системы электропривода.....	8
2.2.6. Выбор систем вспомогательных электроприводов рабочей машины.....	9
2.2.7. Синтез функциональной схемы управления рабочей машиной.....	9
2.2.8. Конструкторская разработка узла с электрооборудованием рабочей машины.....	9
2.2.9. Мероприятия по обеспечению техники безопасности.....	9
2.2.10. Экономическая проработка проекта.....	9
2.2.11. Мероприятия по ресурсо- и энергосбережению.....	9
2.2.12. Принципиальная электрическая схема электрооборудования и спецификация ее элементов.....	10
2.2.13. Заключение.....	10
2.2.14. Литература.....	10
2.3. Содержание графического материала.....	10
3. Оформление дипломных проектов.....	10
3.1. Общие требования к оформлению пояснительной записки.....	10
3.2. Оформление иллюстраций (рисунков, графиков) и таблиц.....	15
3.3. Оформление графических документов.....	18
3.4. Общие правила выполнения схем.....	21
4. Требования к спецразделам дипломных проектов.....	27
5. Требования к дипломным проектам по специальным темам.....	28
6. Теоретические сведения.....	28
6.1. Выбор электродвигателя и расчет его параметров.....	28
6.1.1. Расчет параметров двигателя постоянного тока.....	28
6.1.2. Расчет параметров асинхронного электродвигателя.....	30
6.2. Выбор силового оборудования и расчет параметров силовой цепи.....	32
6.2.1. Расчет параметров силовой цепи электропривода постоянного тока.....	32
6.2.2. Расчет параметров силовой цепи электропривода переменного тока.....	33
6.3. Синтез функциональной и структурной схем.....	33
6.3.1. Расчет параметров электропривода постоянного тока.....	33
6.3.2. Расчет параметров электропривода с частотным управлением.....	39
6.3.3. Расчет параметров электропривода с векторным управлением.....	40
6.4. Синтез регуляторов.....	41

6.4.1. Метод стандартных настроек контуров	41
6.4.2. Частотный метод (по желаемой логарифмической частотной характеристике)	42
6.4.3. Синтез по желаемому распределению корней	43
6.4.4. Синтез регуляторов систем автоматического регулирования скорости электропривода постоянного тока	44
6.4.5. Синтез системы управления скоростью с частотным управлением	50
6.4.6. Синтез регуляторов системы управления скоростью электропривода с векторным управлением	51
6.5. Анализ динамики.....	54
6.5.1. Анализ динамики электропривода постоянного тока	54
6.5.2. Анализ динамики электропривода с частотным управлением	55
6.5.3. Анализ динамики электропривода с векторным управлением.....	57
Приложение 1	59
Приложение 2	60
Литература	62

ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
для студентов специальности 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»
специализации 1-53 01 05 01 «Автоматизированный
электропривод промышленных и транспортных
установок» дневной и заочной форм обучения

Составители: **Захаренко Владимир Сергеевич**
Савельев Вадим Алексеевич
Погуляев Михаил Никифорович

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 05.11.15.

Пер. № 5Е.

<http://www.gstu.by>