

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Кафедра «Автоматизированного электропривода»

ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИКА

Практическое пособие по курсовому проектированию
для студентов, обучающихся по направлениям
13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

ISBN 978-5-7046-3048-7

© Коллектив авторов, 2024

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2024

УДК 621.3
ББК 31.291
Э 45

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»
в качестве учебного издания*

Подготовлено на кафедре автоматизированного электропривода

Рецензенты: д. т. н., проф. А. С. Анучин;
 к. т. н., доц. Г. Л. Демидова

**Авторы: Н. М. Кураев, Д. А. Благодаров, А. Н. Ладыгин, Д. М. Шпак,
Д. И. Савкин, Ю. М. Сафонов**

Э 45 Электропривод и автоматика [Электронный ресурс]: практич. пособие по курсовому проектированию / Н. М. Кураев, Д. А. Благодаров, А. Н. Ладыгин и др. – М.: Издательство МЭИ, 2024. – 1 электрон. опт. диск CD-ROM.

Практическое пособие содержит подробные описания заданий на курсовые проекты и работы, реализуемые по программе «Электропривод и автоматика», а также методические рекомендации по выполнению и оформлению заданий, примеры вариантов и решений, ожидаемые результаты.

Настоящее пособие предназначено для самостоятельного выполнения курсовых проектов и работ студентами института электротехники, обучающимися по направлениям 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также может быть использовано студентами других направлений и программ.

Минимальные системные требования:

Компьютер: процессор x86 с тактовой частотой 500 МГц и выше;

ОЗУ 512 Мб; 20 Мб на жестком диске;

Видеокарта: SVGA 1280x1024 High Color (32 bit);

Операционная система: Windows XP/7/8 и выше;

Дополнительные программные средства: Adobe Acrobat Reader версии 6 и выше.

ISBN 978-5-7046-3048-7

© Коллектив авторов, 2024

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	3
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	5
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
1. КУРСОВОЙ ПРОЕКТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ»	7
1.1. Программа курсового проекта	7
1.2. Исходные данные	7
1.3. Расчет сопротивлений пусковых, тормозных и регулировочных резисторов	9
1.4. Разработка электрической принципиальной схемы системы управления	10
1.5. Проверка работы электропривода с РКСУ	11
1.6. Оформление и порядок защиты проекта	11
2. КУРСОВОЙ ПРОЕКТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА»	14
2.1. Общие положения	14
2.2. Программа курсового проекта	14
2.3. Методические указания по выполнению	15
2.4. Оформление проекта и защита	17
3. КУРСОВАЯ РАБОТА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА»	18
3.1. Методические указания по выполнению	20
3.1.1. Раздел 1.....	20
3.1.2. Раздел 2.....	21
3.1.3. Раздел 3.....	22
3.1.4. Раздел 4.....	22
3.1.5. Раздел 5.....	23
3.1.6. Раздел 6.....	23
3.1.7. Раздел 7.....	23
4. КУРСОВОЙ ПРОЕКТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ»	25

4.1.	Общие положения	25
4.2.	Описание модели.....	25
4.3.	Таблицы двигателей с исходными данными	27
4.4.	Задание.....	29
4.5.	Варианты систем управления.....	30
4.6.	Описание проекта	32
4.7.	Методические указания по определению параметров двигателей	35
4.7.1.	Как формируется напряжение на обмотках двигателей	35
4.7.2.	Формирование напряжения на обмотках двигателя постоянного тока	36
4.7.3.	Формирование напряжений на обмотках трехфазных двигателей переменного тока.....	37
4.7.4.	Расчёт уставок сравнения по известным напряжениям	38
4.7.5.	Отображение времени на графиках в Code Composer Studio	38
4.8.	Какие параметры необходимо определить	41
4.8.1.	Двигатель постоянного тока	41
4.8.2.	Синхронный двигатель с постоянными магнитами	41
4.8.3.	Асинхронный двигатель	41
4.9.	Методика определения параметров двигателей.....	42
4.9.1.	Двигатель постоянного тока	42
4.9.2.	Определение параметров синхронного двигателя.....	44
4.9.3.	Определение параметров асинхронного двигателя.....	46
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	50
	СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	51
	Приложение 1.....	52
	Приложение 2.....	58
	Приложение 3.....	60
	Приложение 4.....	70
	Приложение 5.....	72

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АД – асинхронный двигатель

АДФР – асинхронный двигатель с фазным ротором

АДКЗ – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

ДПТНВ – двигатель постоянного тока независимого возбуждения

СД – синхронный двигатель

ПЧ – преобразователь частоты

РКСУ – релейно-контакторная система управления

КПД – коэффициент полезного действия

ЭМП – электромеханическое преобразование энергии

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное практическое пособие было написано авторами, чтобы систематизировать всю необходимую обучающимся информацию по курсовым работам и проектам, реализующим учебный план по программе «Электропривод и автоматика» направлений подготовки 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Каждый раздел содержит задание на курсовой проект/работу, программу, указания к выполнению, примеры вариантов и решений. Для каждого раздела так же есть дополнительные материалы, необходимые для выполнения указанного задания. Все дополнительные материалы сведены в приложения к пособию и содержат ссылки для доступа к ним. Ссылки представлены в виде QR-кодов, на которые можно нажать, для доступа к материалам, либо отсканировать мобильным устройством.

Для оформления пояснительных записок к курсовым работам/проектам авторы рекомендуют пользоваться шаблоном, представленным в [Приложении 1](#) и доступным для скачивания по ссылке из приложения.

1. КУРСОВОЙ ПРОЕКТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ»

1.1. Программа курсового проекта

Целью курсового проекта является закрепление знаний по релейно-контакторным системам управления (РКСУ) электроприводов постоянного и переменного тока, а также приобретение навыков синтеза таких систем и проектирования на основе реального оборудования.

1. Для заданного варианта выбрать двигатель, построить пусковые и тормозные диаграммы, рассчитать величины сопротивлений пусковых, тормозных и регулировочных резисторов.

2. Составить принципиальную схему системы управления, которая обеспечивает выбор направления вращения, пуск, торможение и защитное отключение двигателя.

3. Составить полную принципиальную схему системы управления, которая дополнительно к функциям п. 2 обеспечивает заданный цикл перемещения рабочего органа механизма. Провести маркировку всех участков цепей схемы.

4. Реализовать схему системы управления в среде моделирования SimInTech с использованием библиотеки релейно-контакторных элементов (по желанию студента логика схемы может быть реализована на базе логических элементов или программным способом в SimInTech [1]). Произвести настройку и наладку системы. Построить траекторию перемещения, скорость и момент электропривода во времени, зафиксировать сигналы, необходимые для пояснения алгоритма работы схемы.

5. В соответствии с предложенной схемой системы управления выбрать в современных каталогах всю необходимую аппаратуру (контакты, реле и др.), а также шкаф НКУ для размещения оборудования. Составить спецификацию выбранных элементов (с указанием кодов для заказа).

6. Представить в разумном масштабе чертеж смонтированной в шкафу системы управления электроприводом (вид спереди) с учетом габаритных и установочных размеров выбранных приборов. Выполнить схему соединений цепей управления. Провести маркировку проводов согласно разработанной принципиальной схеме.

1.2. Исходные данные

Каждый студент получает индивидуальное задание, характеризующееся следующими данными:

- ✓ типом двигателя (двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТНВ) или асинхронный двигатель с фазным ротором (АДФР));
- ✓ примерной номинальной мощностью двигателя;
- ✓ видом торможения (динамическое или противовключением);
- ✓ принципом управления пуском и торможением (по времени, по току или по скорости);
- ✓ способом управления электроприводом (с помощью кнопок «Пуск» и «Стоп» или с помощью командоконтроллера);
- ✓ типом цикла перемещения производственного механизма.

Примеры вариантов индивидуальных заданий приведены в табл. 1.1.

Типы циклов работы механизма, изображенные на рис. 1.1 и рис. 1.2, представляют собой возвратно-поступательное движение рабочего органа механизма с различными скоростями и с паузами в различных точках траектории движения. Предполагается, что представленные циклы повторяются указанное число раз с паузой 3 с. между ними. В конце каждого цикла осуществляется механическое торможение двигателя, в остальных случаях – в соответствии с заданием. Число повторений и отношения повышенной скорости к рабочей и к промежуточной указаны в задании.

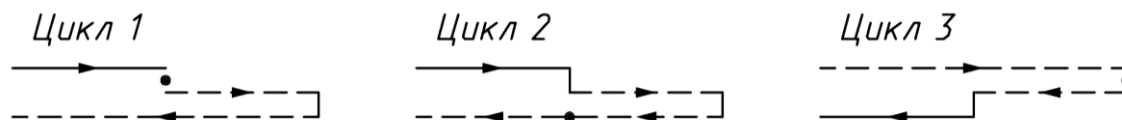


Рис. 1.1. Варианты циклов перемещения механизма с двумя скоростями

Обозначения на циклограммах (рис. 1.1):

- сплошная горизонтальная линия – перемещение с рабочей скоростью;
- штриховая горизонтальная линия – перемещение на повышенной скорости;
- вертикальная линия – изменение скорости по величине и/или направлению;
- точка – пауза 1 с.

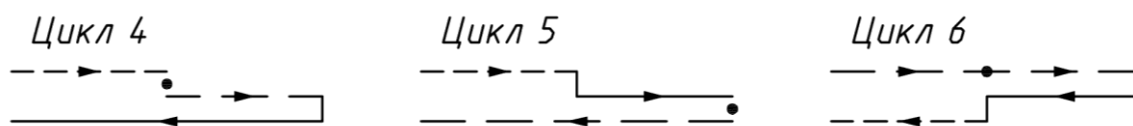


Рис. 1.2. Варианты циклов перемещения механизма с тремя скоростями

Обозначения на циклограммах (рис. 1.2):

- сплошная горизонтальная линия – перемещение с рабочей скоростью;
- штриховая горизонтальная линия (с частыми штрихами) – перемещение на повышенной скорости;
- штриховая горизонтальная линия (с редкими штрихами) – перемещение на промежуточной скорости;
- вертикальная линия – изменение скорости по величине и/или направлению;
- точка – пауза 1 с.

Для двигателя постоянного тока рабочая скорость соответствует естественной характеристике, повышенная скорость достигается путем ослабления поля. Для асинхронного двигателя с фазным ротором повышенная скорость соответствует его естественной характеристике, а рабочая и промежуточная (промежуточная скорость больше рабочей) – реостатным.

Выбор двигателя осуществляется по мощности нагрузки, указанной в задании для повышенной скорости.

1.3. Расчет сопротивлений пусковых, тормозных и регулировочных резисторов

При расчете сопротивлений пусковых резисторов принимаются следующие условия:

- пуск и работа происходят с постоянным реактивным моментом сопротивления M_c , рассчитываемым исходя из мощности нагрузки, заданной для повышенной скорости;
- максимальные значения токов и моментов не должны превышать допустимых значений;
- число пусковых и тормозных ступеней принимается минимально возможным.

Двигатель постоянного тока не имеет насыщения и $k\Phi$ линейно зависит от тока возбуждения. Для асинхронного двигателя с фазным ротором сопротивления пусковых резисторов должны быть рассчитаны таким образом, чтобы получающиеся при этом реостатные характеристики проходили через точки с координатами ω_r, M_c и $\omega_{пр}, M_c$ (ω_r – рабочая скорость, $\omega_{пр}$ – промежуточная скорость).

1.4. Разработка электрической принципиальной схемы системы управления

Система управления должна обеспечивать автоматическую работу электропривода по заданному циклу с указанными принципами управления в режимах пуска и торможения. Управление движением механизма (реверс в крайних точках, переход с одной скорости на другую и обратно, остановки в заданных положениях) осуществляется по сигналам с конечных выключателей или с командоконтроллера.

Разработку принципиальной схемы следует начинать с составления схем силовой части, где будут предусмотрены требуемое число ступеней пусковых и тормозных резисторов, а также главные контакты контакторов для подключения двигателя к сети, его реверсирования и управления пусковыми, регулировочными и тормозными резисторами.

После силовой схемы разрабатывается система управления. Эту работу следует разбить на два этапа. Вначале составить часть схем, осуществляющих пуск, остановку, реверс и т.д. электропривода, а затем ее вторую часть, учитывающую заданный технологический цикл работы механизма.

Для составления первой части схемы можно воспользоваться методом типовых узлов. Работа по объединению типовых узлов в общую схему облегчится, если предварительно составить словесное описание алгоритма ее функционирования. Составление второй части схемы может быть выполнено с помощью простого и наглядного метода циклограмм. В принципиальную схему должны быть добавлены узлы, обеспечивающие необходимые виды защит и блокировок.

Запуск и остановку привода следует делать по командам с кнопок «Пуск» и «Стоп» или с командоконтроллера. При управлении приводом от кнопок «Пуск» и «Стоп» следует предусмотреть кнопки ручного перемещения механизма на пониженной скорости с остановкой по конечным выключателям с целью возможности приведения электропривода в исходное состояние перед началом работы.

При механическом торможении используется электромагнитный тормоз, тормозной момент которого должен в несколько раз превышать момент сопротивления M_c . При отсутствии напряжения на катушке

электромагнита тормоз создает на валу двигателя дополнительный тормозной момент, при наличии напряжения – тормозной момент не создается.

Для реализации заданного числа повторений цикла перемещения механизма должен использоваться разработанный на релейно-контакторной аппаратуре (или другим способом) счетчик числа циклов.

1.5. Проверка работы электропривода с РКСУ

Проверка работы схемы электропривода осуществляется в среде моделирования SimInTech [1] с использованием библиотеки релейно-контакторных элементов и адаптированных для нее стандартных двигателей библиотеки «ЭЦ – Динамика». Более подробное описание библиотеки, а также ссылка для доступа к ней, представлены в [Приложении 2](#).

Реализованная система управления должна воспроизводить заданную циклограмму. Проверяется как отработка циклограммы, так и отключение электропривода во время работы с возвращением в исходную позицию на пониженной скорости.

Строятся графики положения и скорости перемещения электропривода, а также всех ключевых переменных состояния системы управления, которые могут потребоваться для проверки адекватности работы и наладки системы.

В процессе наладки системы управления следует уделить внимание точкам переключения реостатных характеристик и при необходимости подстроить времена, токи и/или напряжения срабатывания реле. Если процесс пуска происходит очень быстро и не позволяет отследить системой управления сильно колебательные процессы, следует увеличивать момент инерции механизма с соответствующей корректировкой уставок выдержки времени.

1.6. Оформление и порядок защиты проекта

Выполненный курсовой проект представляется в форме расчетно-пояснительной записки. Записка должна включать в себя:

- титульный лист;
- задание с указанием выбранного варианта и исходные данные;
- выбор двигателя;
- расчет сопротивлений пусковых, регулировочных и тормозных резисторов;

- расчет уставок срабатывания аппаратуры;
- синтез системы управления с пояснением алгоритма ее функционирования;
- принципиальную электрическую схему с описанием ее работы (схема составляется в среде моделирования SimInTech [1]);
- протоколы отладки и испытаний электропривода;
- выбор оборудования;
- спецификацию выбранного оборудования;
- чертеж полной принципиальной электрической схемы с маркировкой всех участков цепей схемы;
- чертеж смонтированной в шкафу системы управления электроприводом;
- заключение.

Правильно выполненный и аккуратно оформленный проект подлежит защите. Защита производится путем собеседования со специально собранной комиссией по разделам проекта с проставлением оценки на титульном листе за подписью преподавателя.

Таблица 1.1. Примеры вариантов индивидуальных заданий

Тип двигателя	Количество циклов	Мощность нагрузки на повышенной скорости, кВт	Тип цикла	Соотношение скоростей	Принципы работы			
					Пуск по принципу времени	Торможение по принципу времени	Торможение динамическое	Кнопки «Пуск» и «Стоп»
АДФР	6	2	6	2 и 1,3	Пуск по принципу времени	Торможение по принципу времени	Торможение динамическое	Кнопки «Пуск» и «Стоп»
ДПТНВ	7	3	1	1,5	Пуск по принципу тока	Торможение по принципу скорости	Торможение противовключением	Командоконтроллер
АДФР	8	4	5	1,6 и 1,2	Пуск по принципу времени	Торможение по принципу скорости	Торможение противовключением	Командоконтроллер
ДПТНВ	9	5	2	2,5	Пуск по принципу времени	Торможение по принципу скорости	Торможение динамическое	Кнопки «Пуск» и «Стоп»
АДФР	10	6	4	1,7 и 1,1	Пуск по принципу времени	Торможение по принципу скорости	Торможение динамическое	Кнопки «Пуск» и «Стоп»
ДПТНВ	11	7	3	1,5	Пуск по принципу тока	Торможение по принципу времени	Торможение противовключением	Командоконтроллер

[К началу раздела](#)

[К содержанию](#)

2. КУРСОВОЙ ПРОЕКТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА»

2.1. Общие положения

Студенты получают от преподавателя индивидуальный вариант задания на проектирование электропривода механизма в соответствии с его кинематической схемой. Привязка кинематической схемы к конкретному рабочему механизму и формулировка технологических требований производится студентом самостоятельно. Моделирование динамических режимов работы электропривода рекомендуется выполнять на имитационных моделях в среде динамического моделирования технических систем SimInTech [1].

2.2. Программа курсового проекта

1. Для заданной кинематической схемы определить тип механизма, сформулировать технологические требования к электроприводу механизма.
2. Выполнить приведение всех параметров к валу двигателя.
3. В соответствии с технологическими требованиями составить тахограмму движения.
4. Построить упрощенную нагрузочную диаграмму.
5. Выбрать подходящий двигатель, построить уточненную нагрузочную диаграмму.
6. Выполнить проверку выбора двигателя по нагреву и перегрузочной способности.
7. Выбрать необходимый силовой преобразователь.
8. Выполнить расчет разомкнутой системы. Построить механические характеристики в разомкнутой системе. Оценить диапазон регулирования скорости.
9. Рассчитать переходный процесс в разомкнутой системе; оценить динамические показатели электропривода.
10. Выполнить синтез контура регулирования момента (тока).

11. Оценить статические и динамические характеристики контура регулирования момента (тока).
12. Выполнить синтез контура регулирования скорости.
13. Оценить статические и динамические характеристики контура регулирования скорости.
14. Рассчитать энергетические показатели, которые, на Ваш взгляд, наиболее полно характеризуют синтезированный Вами электропривод механизма.

Варианты заданий со схемами и табличными данными представлены в [Приложении 3](#).

2.3. Методические указания по выполнению

Как объект проектирования электропривод представляет собой электромеханическую систему, электрическая часть которой состоит из электромеханического преобразователя энергии (ЭМП), силового преобразователя и информационной части электропривода. Механическая часть включает в себя все движущиеся массы привода и рабочей установки, в том числе ротор двигателя, передаточный механизм и исполнительный механизм.

Студенту задается кинематическая схема конкретного механизма. Студент должен разобраться в принципе работы этого механизма и сформулировать основные требования к выбору двигателя. Приведение параметров механической части электропривода было также рассмотрено в курсе «Электрический привод». Основные параметры задаются преподавателем в форме варианта, недостающие параметры студент должен уметь найти в соответствующих справочниках. При построении тахограммы движения студент имеет также некоторую свободу, главное при выборе тахограммы движения – это удовлетворение сформулированным требованиям. Построив упрощенную нагрузочную диаграмму механизма, студент самостоятельно осуществляет выбор типа электропривода и предварительный выбор двигателя, пользуясь любым доступным справочником по электрическим машинам. После предварительного выбора двигателя студент строит уточненную нагрузочную диаграмму, обосновывает и выполняет соответствующие проверки по нагреву и перегрузочной способности.

Для силовой части системы электропривода используются силовые полупроводниковые преобразователи. Выбор преобразователя, кроме согласования по мощности, напряжению и току, осуществляется на основе критериев и требований, уточненных с преподавателем-консультантом,

учитывая, что перегрузочная способность преобразователя не всегда совпадает с перегрузочной способностью двигателя. Исходя из схемы и параметров преобразователя, необходимо оценить вносимое преобразователем сопротивление и построить механические и электромеханические характеристики в разомкнутой системе. По заданной преподавателем точности регулирования определить возможный диапазон регулирования скорости.

Студент самостоятельно предлагает варианты регулирования момента и скорости электропривода в разомкнутом варианте, рассчитывает переходный процесс в разомкнутой системе, соответствующий заданному преподавателем участку тахограммы, оценивает динамические показатели, проводит анализ этих вариантов на соответствие заданным требованиям, и делает вывод о необходимости перехода к замкнутому электроприводу.

В замкнутой системе обычно рассчитывается система подчиненного регулирования координат с настройкой регуляторов на технический оптимум. Расчет переходных процессов в замкнутой системе осуществляется в любом из известных студенту математических пакетов. Обязательным является инженерная оценка основных динамических показателей и сравнение их с полученными результатами моделирования.

В заключении рассчитываются энергетические показатели, которые наиболее полно характеризуют синтезированный электропривод. Это могут быть потери энергии за цикл, средневзвешенный КПД, средневзвешенный $\cos\phi$, расход энергии на изготовление единицы продукции и т.д.

Пример выбора рабочего механизма для схемы рис. 2.1. Это может быть механизм передвижения тележки мостового крана. Тогда формулируются следующие основные технологические требования: момент сопротивления нагрузки реактивный; реверсивный характер движения; повторно-кратковременный режим работы; продолжительность включения двигателя (ПВ) в диапазоне 25–60%; перемещение на расстояние 15–30 м с линейной скоростью 0,1–0,5 м/с; время разгона/торможения 2–4 с. Тахограмма движения механизма задается студентом самостоятельно, и она должна быть обоснована и соответствовать выбранному механизму.

Расчетную часть курсового проекта рекомендуется выполнять по представленным в источнике [2] методиками. При выборе типа приводного электродвигателя и преобразователя (постоянного или переменного тока) необходимо ориентироваться на доступные каталоги с необходимыми параметрами, например [3,4].

Моделирование динамических режимов работы электропривода по пунктам 9,11,13 рекомендуется выполнять на имитационных моделях в среде динамического моделирования технических систем SimInTech [1].

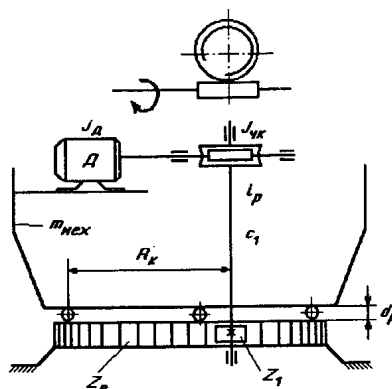


Рис. 2.1. Кинематическая схема механизма

2.4. Оформление проекта и защита

Проект должен быть оформлен по правилам ЕСКД в виде расчетно-пояснительной записки объемом 30÷40 стр. печатного текста и 1,5 ÷ 2 листа графического материала для иллюстрации доклада во время защиты проекта (при наличии раздаточного материала допускается применение фольги). Записка должна содержать титульный лист, задание на курсовой проект, аннотацию, оглавление, основной текст, заключение и список использованной литературы. Нумерация страниц расчетно-пояснительной записки делается сквозной, включая листы с рисунками. Все расчеты в курсовом проекте выполняются в системе СИ. При расчетах сначала записывается формула в общем виде, затем подставляются соответствующие числовые значения и в конце записывается результат с соответствующей размерностью. При записи формул в общем виде желательно давать расшифровку буквенных обозначений. Структурные схемы и другие рисунки приводятся с указанием конкретных значений величин, а не в общем виде. Электрические схемы должны быть приведены с изображением всех элементов в соответствии с ГОСТом.

Выполненный и подписанный руководителем курсовой проект подлежит защите в комиссии, состоящей, как минимум, из 2-х преподавателей с участием руководителя проекта, и оценивается дифференцированно по 5-балльной системе.

[К началу раздела](#)

[К содержанию](#)

3. КУРСОВАЯ РАБОТА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА»

Курсовая работа заключается в проведении анализа определенных аспектов экономики конкретного предприятия с целью дать характеристику особенностей его хозяйственной деятельности и сделать собственное заключение о степени успешности бизнеса, его перспективности и привлекательности этого предприятия для возможного трудоустройства. Тема работы для всех студентов группы формулируется следующим образом: АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ – с указанием юридического названия анализируемого предприятия. При этом титульный лист отчета по работе должен выглядеть, как показано в [Приложении 4](#).

Выбор конкретного предприятия для анализа выполняется студентом самостоятельно, исходя из следующих требований:

- ✓ анализируемое предприятие должно относиться к «реальному сектору» и самостоятельно выпускать электротехническую продукцию на базе собственных производственных мощностей (т.е. не рассматриваются: управляющие компании, холдинги, концерны и проч. формы коммерческих объединений);
- ✓ предприятие должно являться российским юридическим лицом (это требование не обязательно для иностранных студентов);
- ✓ при выборе необходимо руководствоваться личной заинтересованностью в более глубоком знакомстве с данным предприятием на предмет возможного трудоустройства с непосредственным использованием получаемой в МЭИ квалификации (см. требования к разделу ЗАКЛЮЧЕНИЕ);
- ✓ при выборе следует позаботиться о наличии достаточных источников информации (Интернет, публикации, знакомые сотрудники, личное сотрудничество и т.п.);
- ✓ не должно быть дублирования предприятий в студенческой группе (одно предприятие – один исполнитель работы).

При выполнении анализа все студенты должны следовать одинаковому для всех алгоритму, создавая отчет строго по разделам и пунктам, перечень которых представлен в табл. [3.1](#).

Таблица 3.1. Содержание разделов курсовой работы

№ раздела	Наименование раздела
1	ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДПРИЯТИЯ
1.1	Миссия
1.2	Юридическая форма
1.3	Номенклатура продукции
1.4	Ключевые технологии производства
1.5	Масштабы предприятия и производства
1.6	Рыночное окружение предприятия
2	ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ МАРКЕТИНГА ПРЕДПРИЯТИЯ
2.1	Товарная политика
2.2	Ценовая политика
2.3	Политика сбыта
2.4	Политика коммуникаций
2.5	Вывод о базовой конкурентной стратегии предприятия
3	ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И РЕСУРСЫ ПРЕДПРИЯТИЯ
3.1	Характеристики продукции и особенности технологии её производства
3.2	Процессы жизненного цикла продукции и их ресурсы
3.3	Процессы вспомогательные
4	ПРОЦЕССНАЯ И ОРГАНИЗАЦИОННАЯ СТРУКТУРЫ ПРЕДПРИЯТИЯ
4.1	Процессная структура предприятия, учитывающая требования ИСО-9001...
4.2	Организационная структура управления предприятием
5	ЗАКЛЮЧЕНИЕ
6	АЛГОРИТМ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ИНВЕСТИЦИЙ В РАЗРАБОТКУ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ
6.1	Миссия предприятия, инвестирующего в разработку
6.2	Разрабатываемый продукт
6.3	Тип коммерческой ситуации
6.4	Алгоритм экономического обоснования инвестиций
7	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

3.1. Методические указания по выполнению

Рассмотрим далее короткие указания по выполнению всех разделов и пунктов курсовой работы. Разумеется, подробный разбор тематики разделов дается преподавателем в процессе изложения теории предмета и в рамках соответствующих аудиторных консультаций. Очередность изложения предмета на лекциях точно соответствует порядку следования разделов курсовой работы.

3.1.1. Раздел 1

В разделе 1 (в 6-и его пунктах) дается общая характеристика предприятия на основании доступной официальной информации. Личное творчество может быть проявлено при написании миссии предприятия на основе собственных знаний и доступной информации.

В п.1.3 номенклатура продукции должна быть представлена в самом общем виде, посредством перечисления групп продукции предприятия, что должно иллюстрировать миссию предприятия. В данном пункте подробный анализ ассортимента продукции делать не следует, он потребуется в разделе 2.1.

В п.1.4 перечисляются технологии производства, которые для данного предприятия являются ключевым фактором обеспечения результативности своих процессов разработки и изготовления продукции, формирующим конкурентные преимущества. Технологии должны быть представлены в виде четкого перечня (перечислены списком).

В п.1.6 должны быть перечислены предприятия, составляющие рыночное окружение, в виде 3-х списков:

- потребители;
- поставщики и партнеры;
- конкуренты.

Каждая позиция, каждого из названных списков, должна иметь комментарий, раскрывающий причину, по которой данное предприятие попало в соответствующий список. То есть должно быть ясно – «Что потребляет» или «Что поставляет, в чем сотрудничает» или «В чем конкурирует».

ВАЖНО!!! Текст раздела 1 должен завершаться пунктом «Примечание», в котором автор указывает, какие источники информации были им использованы при написании данного раздела, т.е. приводятся ссылки на позиции списка источников информации, который содержится в разделе 7 курсовой работы. Таким образом, составление списка источников

(создание раздела 7) должно начинаться одновременно с написанием раздела 1, а затем продолжаться при написании следующих разделов работы.

3.1.2. Раздел 2

В разделе 2 должны быть представлены следующие ниже пункты.

П.2.1, в котором проводится анализ номенклатуры продукции предприятия. Анализ производится на основе структурированных автором данных о товарном портфеле. Выводы об особенностях его товарной политики, какие типовые решения по управлению ассортиментом применяются и какими известными автору данными это подтверждается. Выводы о влиянии рассмотренных решений на стратегию предприятия в борьбе с конкурентами (должно согласовываться с данными, приведенными автором в п. 1.6);

П.2.2, в котором проводится анализ ключевых аспектов ценовой политики маркетинга предприятия. Указывается: какие типовые решения используются, как эти решения согласуются с известными автору данными об ассортименте и конъюнктуре рыночной ниши предприятия, а также с выводами п. 2.1.

П.2.3, в котором проводится анализ политики сбыта предприятия, включая особенности сервиса.

П.2.4, в котором проводится анализ политики маркетинговых коммуникаций с соответствующими выводами об особенностях этих политик.

Каждый из пунктов (2.1 – 2.4) раздела должен содержать суждение автора о типе соответствующей политики маркетинга с обоснованием этих суждений, сделанных на основе и с приведением соответствующей информации.

В заключительном пункте раздела (п. 2.5) требуется привести развернутый вывод о типе базовой стратегии предприятия, выбранной им для конкурентной борьбы. Этот вывод должен быть обоснован развернутыми суждениями, которые должны отражать понимание автором необходимости принципиального соответствия между избранной конкурентной стратегией и реализующими ее политиками маркетинга, которые автор проанализировал в предыдущих пунктах.

ВАЖНО!!! Каждый пункт раздела 2 должен завершаться «Примечанием», в котором автор указывает, какие источники информации были им использованы при написании данного пункта, ссылаясь на соответствующие позиции списка из раздела 7 курсовой работы.

3.1.3. Раздел 3

Раздел 3 выполняется применительно к одному из видов продукции из ассортимента предприятия (по выбору автора).

В п.3.1 приводится перечень *показателей качества* выбранной продукции и рассматриваются особенности технологии ее производства (обязательно приводятся ссылки на источник информации).

Содержание этого пункта должно отразиться на содержании п.3.2 и п.3.3., кроме того, оно будет востребовано при выполнении одной из контрольных работ по курсу.

3.1.4. Раздел 4

Раздел 4 выполняется применительно к тем материалам, которые были представлены в разделе 3. В этом разделе автор должен продемонстрировать глубину понимания тесной взаимной увязки процессной и организационной структур бизнеса предприятия. При этом важно помнить о связи этих структур с базовой конкурентной стратегией бизнеса предприятия.

Содержание разделов 3 и 4 должны в значительной степени представлять собой результат *личного творчества* автора, т.к., как правило, он не имеет достаточно полной информации о конкретном предприятии. Однако, важно чтобы в тексте присутствовали данные, на основе которых сделаны выводы о процессах и ресурсах. Тем самым автор должен продемонстрировать понимание того факта, что проводимый анализ опирается на исходные данные, приведенные в первом разделе. При этом необходимо помнить о логической увязке приводимых исходных данных с выводами о процессах, ресурсах и структурах предприятия.

По содержанию этих разделов преподавателем проверяется не столько достоверность конкретных данных об экономике предприятия, сколько:

- ✓ полнота понимания системы задач менеджмента предприятия и знания современных вариантов их решения;
- ✓ знание основ системного подхода к обеспечению качества продукции;
- ✓ логика рассуждений и выводов автора, сделанных на основе приведенных им в работе данных.

ВАЖНО!!! Каждый из разделов 3 и 4 должен завершаться «Примечанием», в котором автор указывает, какие источники информации были им использованы при написании данного раздела, ссылаясь на соответствующие позиции списка из раздела 7 курсовой работы.

3.1.5. Раздел 5

Раздел 5 должен отражать мнение автора об успешности и перспективах бизнеса анализируемого предприятия, о его привлекательности для возможного трудоустройства.

Обязательно должно быть приведен ответ на вопрос – в каких отделах (подразделениях) и в каких процессах предприятия мог бы работать автор с наибольшим эффектом для предприятия и себя лично благодаря компетенциям, получаемым в МЭИ.

3.1.6. Раздел 6

Раздел 6 может выполняться без привязки к предприятию, анализируемому в предыдущих разделах. Предприятие может быть вымышленным, но его образ должен логически соответствовать содержанию всех пунктов раздела.

Однако суть объекта разработки на этом предприятии должна быть достаточно реальной, поскольку при выполнении требуется использовать информацию из реальной учебной разработки, выполненной (выполняемой) автором в рамках курсовой или выпускной работы по электроприводу и автоматике. Содержание объекта разработки, рассматриваемой в этом разделе, может быть уточнено индивидуально на консультации с преподавателем.

В п.6.1 должна быть сформулирована *миссия* предприятия, инвестирующего в свою разработку. Разумеется, поскольку предприятие может быть вымышленным, автор дает формулировку на основе своих знаний и логики соответствия ситуации.

В п.6.2. совсем коротко раскрывается суть объекта рассматриваемой разработки.

В п.6.3 формулируется (одним предложением) тип коммерческой ситуации, который определяется на основе классификации, рассмотренной в лекциях по дисциплине.

В п.6.4 алгоритм экономического обоснования инвестиций в процесс разработки должен быть представлен в виде блок-схемы. Требуется, чтобы действия в каждом блоке сопровождались соответствующими комментариями, исчерпывающими по содержанию и адекватными по формату представления на схеме.

3.1.7. Раздел 7

Раздел 7 курсовой работы должен представлять собой список источников используемой автором информации. Этот список может включать указания (ссылки) на изученные сайты, публикации и прочие источники,

включая «беседы» с источниками информации. При составлении списка не требуется соблюдение стандартных правил его оформления.

ВАЖНО!!! Список, как и сам раздел 7, необходимо начать создавать одновременно с работой над разделом 1 и далее его следует дополнять по мере выполнения последующих разделов.

[К началу раздела](#)

[К содержанию](#)

4. КУРСОВОЙ ПРОЕКТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ»

4.1. Общие положения

Курсовой проект выполняется на отладочных платах Texas Instruments controlCARD CC2803X на базе микроконтроллера Piccolo F28035 (или аналогичных). Студентам выдается готовый проект для среды Code Composer Studio v5 (и выше), содержащий модель системы «преобразователь – двигатель». Студенты получают от преподавателя индивидуальное задание на разработку системы управления конкретным типом привода с заданной структурой системы управления.

Ссылки для доступа к проекту и указанным моделям представлены в [Приложении 5](#).

4.2. Описание модели

Двигатели подключены к инверторам, каждый из которых имеет три стойки. Управление инвертором выполнено подобно реализации в микроконтроллерах. Задается общий период ШИМ в тиках таймера, производящего счет вверх/вниз с частотой тактирования 60 МГц. При заданной частоте ШИМ значение периода определяется выражением:

$$drive.tpr = \frac{60\,000\,000}{2 f_{\text{ШИМ}}}, \quad (4.1)$$

где $drive.tpr$ – период таймера в тиках; $f_{\text{ШИМ}}$ – частота ШИМ в Гц.

Для всех стоек одновременно задается величина «мертвого времени» – $drive.dt$, в тиках таймера ШИМ. Для каждой стойки задается скважность ($drive.cmpr1$, $drive.cmpr2$, $drive.cmpr3$) управления от 0 до $drive.tpr$. Подключение к инвертору для асинхронных и синхронных двигателей производится по схеме, показанной на рис. 4.1. Для двигателя постоянного тока по схеме на рис. 4.2.

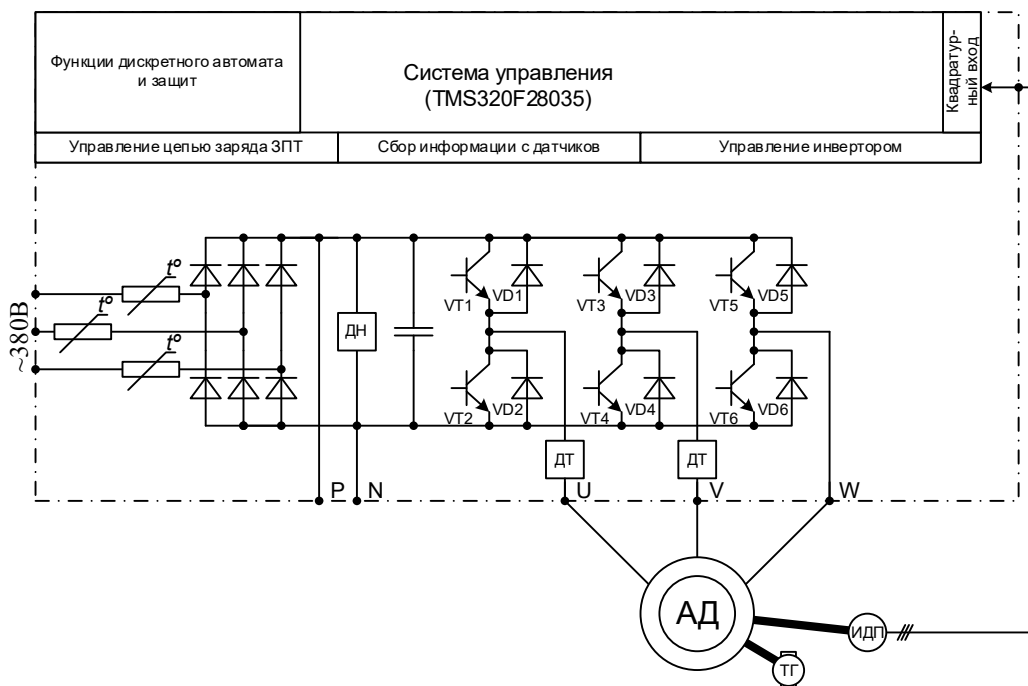


Рис. 4.1. Подключение асинхронного и синхронного электродвигателя

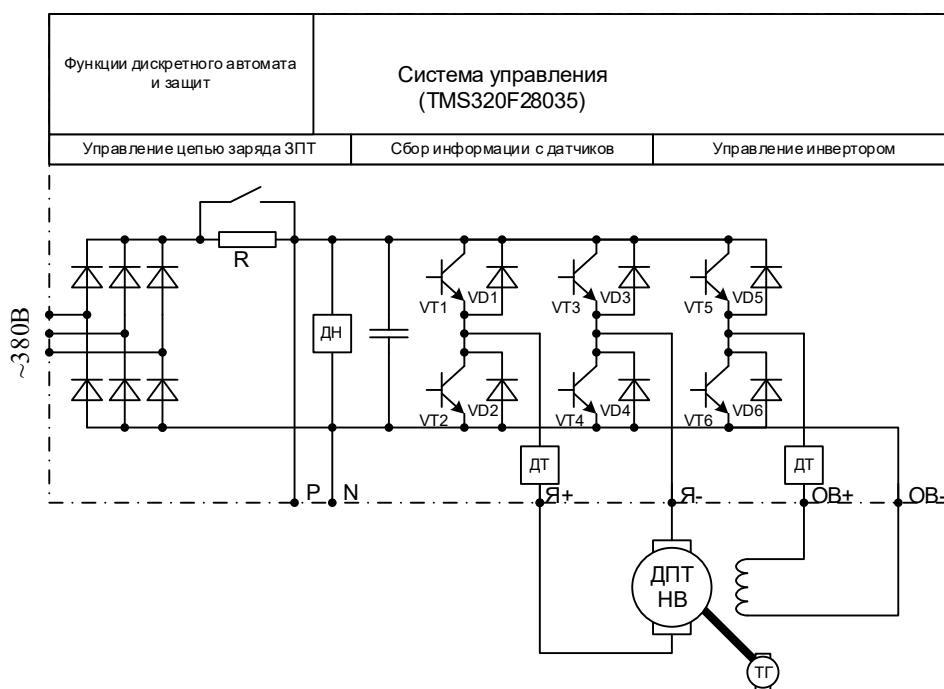


Рис. 4.2. Подключение двигателя постоянного тока

Напряжение звена постоянного тока составляет 540 В.

Токи фаз $i_{\text{фаз}}$ измеряются датчиками Холла компенсационного типа. Номинальный коэффициент датчика составляет 1:1000. Фазный провод двигателя пропущен через датчик w раз (т.е. сделано w витков). Токосый сигнал $i_{\text{ДТ}}$ с выхода датчика протекает через измерительный резистор номиналом $R_{\text{изм}}$. Падение напряжения на измерительном резисторе

преобразуется к диапазону 0 В ... 3,3 В при помощи операционного усилителя. Полная схема измерения фазных токов показана на рис. 4.3. Аналогичным образом измеряется ток якоря ДПТ.

Значения $R_{изм}$ и w приведены в табл. 4.1 и 4.2 раздела 4.3.

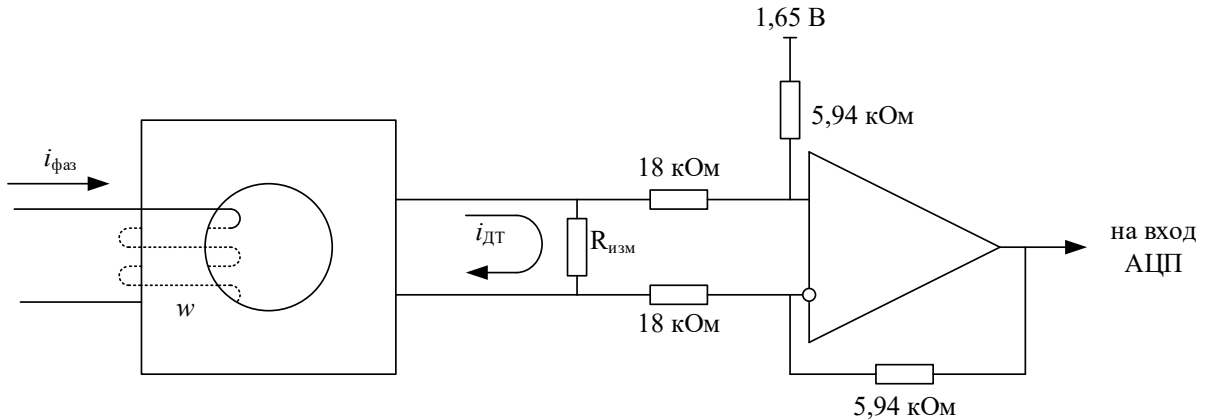


Рис. 4.3. Схема измерения фазных токов

Датчики токов фаз заводятся на АЦП микроконтроллера в формате ± 5 В. -5 В соответствует коду 0, а $+5$ В соответствует коду 4095. Если выходной сигнал датчика тока выходит за диапазон входа АЦП, преобразователь отключается, выставляя сигнал аварии.

Датчик тока обмотки возбуждения имеет коэффициент 800 единиц на Ампер. То есть при протекании тока в 1 А с АЦП приходит код 800.

Двигатель имеет тахогенератор, сигнал с которого заводится на АЦП. Текущая скорость (в об/мин) определяется по формуле $n = (x_{АЦП} - 2047) \cdot k_{ТГ}$.

На валу двигателя имеется импульсный датчик положения с разрешением на оборот, указанным для каждого варианта в отдельности. Код положения доступен системе управления.

На валу синхронной машины имеется датчик положения на эффекте Холла. Датчик имеет три элемента, сдвинутые на 120 электрических градусов. Первый элемент соответствует нулевому биту *drive.hallSensor* и включен в диапазоне углов от $-\frac{\pi}{2}$ до $+\frac{\pi}{2}$.

4.3. Таблицы двигателей с исходными данными

Варианты с 1 по 10 – асинхронные двигатели с напряжением питания 220 В (действующее фазное).

Варианты с 11 по 20 – синхронные неявнополюсные двигатели с постоянными магнитами.

Таблица 4.1. Варианты асинхронных двигателей и синхронных двигателей с постоянными магнитами

№ варианта	Число пар полюсов	Сопротивление резистора измерительной цепи датчика тока	Число первичных витков при коэффициенте датчика тока 1000:1	Коэффициент преобразования сигнала ТГ, (об/мин)/АЦП	Количество импульсов на механический оборот квадратурного датчика положения ротора
1	1	82	5	2	10000
2	1	68	5	2	5000
3	1	51	2	2	3000
4	1	51	1	2	2000
5	1	27	1	2	1000
6	2	82	5	1	5000
7	2	51	1	1	5000
8	2	33	1	1	5000
9	3	68	3	0,667	3000
10	3	22	3	0,667	3000
11	1	100	5	2	1000
12	1	68	5	2	2500
13	1	51	2	2	3000
14	1	51	1	2	5000
15	1	26	1	2	10000
16	2	100	5	1	5000
17	2	51	1	1	2500
18	2	33	1	1	2000
19	3	82	3	0,667	3000
20	3	24	3	0,667	9000

Таблица 4.2. Варианты двигателя постоянного тока

№ варианта	Номинальная скорость	Сопротивление резистора измерительной цепи датчика тока	Число первичных витков при коэффициенте датчика тока 1000:1	Коэффициент преобразования сигнала ТГ, (об/мин)/АЦП	Количество импульсов на механический оборот квадратного датчика положения ротора
21	1000	51	2	0,667	1000
22	2000	51	2	2	2500
23	1500	68	2	2	3000
24	1000	51	2	0,667	5000
25	2000	33	2	2	10000
26	3000	51	1	2	5000
27	2000	68	1	2	2500
28	3000	51	1	2	2000
29	1500	51	1	1	3000
30	1000	33	2	0,667	9000

4.4. Задание

1. Совершить пуск двигателя в среде Code Composer Studio. Это может быть частотный, софт-стартерный пуск или пуск напряжением (для двигателя постоянного тока).
2. Определить частично или полностью параметры исследуемого двигателя. Оценить мощность двигателя. Разработать систему базовых величин для исследуемого двигателя. Для двигателя постоянного тока обязательно необходимо определить номинальное напряжение обмотки возбуждения.
3. Реализовать модель двигателя в среде SimInTech.
4. По заданию, выданному преподавателем, разработать структурную схему системы управления. Описать принципы работы представленной структуры. Произвести синтез регуляторов системы управления.
5. Реализовать систему управления в среде SimInTech.

6. Настроить регуляторы и проверить правильность работы системы управления.
7. Перевести структуру системы управления в относительные единицы для программной реализации.
8. Реализовать систему управления программно в среде Code Composer Studio. Проверить работу системы управления, при необходимости подстроить регуляторы.
9. Снять статические и динамические характеристики получившейся системы.
10. Подготовить расчетно-пояснительную записку, содержащую описательную часть, расчеты и экспериментальные графики.
11. Подготовить презентацию с основными итогами работы для защиты.

Пункты 3, 5 и 6 можно не выполнять, если студент уверен, что сможет реализовать систему в полном объеме в среде Code Composer Studio.

4.5. Варианты систем управления

Назначаются преподавателем в зависимости от типа привода, который изучает студент в рамках бакалаврской, магистерской или дипломной работы.

Для асинхронных двигателей:

1. Скалярная система управления с S -образным задатчиком интенсивности.
2. Скалярная система управления с компенсацией скольжения по оценке момента.
3. Скалярная система управления с отрицательной обратной связью по скорости.
4. Векторная система управления с ориентацией по потокосцеплению ротора с датчиком скорости.
5. Прямое управление моментом с релейными регуляторами и наблюдателем потокосцеплений статора по статорным уравнениям.
6. Прямое управление моментом с релейными регуляторами и наблюдателем потокосцеплений ротора (с датчиком скорости) с пересчетом в статорные.
7. Векторное управление с релейными регуляторами токов.
8. Векторное управление с непрерывными контурами токов и контуром положения.

9. Векторная система управления с непрерывными регуляторами токов и ориентацией по потокосцеплению статора.
10. Векторная бездатчиковая система с оценкой ЭДС двигателя.

Для синхронных двигателей:

1. Система с автокоммутацией и ограничением тока в фазе.
2. Система с автокоммутацией и ограничением тока в фазе с контролем положения.
3. Система векторного управления с ориентацией по потоку ротора.
4. Система векторного управления с размагничиванием по оси d при достижении ограничения по выходу инвертора.
5. Система прямого управления моментом с релейными регуляторами.
6. Система прямого управления моментом с релейными регуляторами и контуром положения.
7. Система векторного управления с релейными регуляторами.
8. Система векторного управления с контуром положения.
9. Система бездатчикового векторного управления с оценкой ЭДС двигателя.
10. Система прямого управления моментом с непрерывными регуляторами момента и потока.

Для двигателей постоянного тока:

1. Подчиненное регулирование тока и скорости.
2. Модальное управление.
3. Двухзонное подчиненное регулирование.
4. Подчиненное регулирование с релейным регулятором тока.
5. Регулирование с релейным контуром тока якоря и регулированием скорости в канале возбуждения.
6. Регулирование с непрерывным контуром тока якоря и регулированием скорости в канале возбуждения.
7. Подчиненное регулирование с оценкой скорости двигателя.
8. Регулирование момента ДПТНВ с ПИ-регулятором тока якоря и коррекцией возмущающего воздействия ЭДС двигателя.
9. Система подчиненного регулирования с контуром положения.

10. Подчиненное регулирование с релейными контурами тока и скорости.

4.6. Описание проекта

Проект для реализации системы управления в среде Code Composer полностью собран и готов для работы на плате controlCARD CC2803X.

В составе проекта находятся файлы библиотек реального времени, IQ-математики, файлы описания прерываний и стандартных процедур инициализации. Они не требуют каких-либо модификаций.

Ссылки для доступа к проекту представлены в [Приложении 5](#).

В проект включен файл model.obj, содержащий модель преобразователя и двигателя. Вызов процедур модели осуществляется из файла main.c (лист. 4.1).

Лист. 4.1. Файл main.c

```
// Подключение необходимых заголовочных файлов
#include "DSP28x_Project.h"
#include "model.h"

// Определение структуры модели двигателя
MODELDATA drive = MODEL_DEFAULTS;

// Заготовка функции расчёта системы управления
void controlSystem (void){
    // drive.cmpr1 = ...;
    // drive.cmpr2 = ...;
    // drive.cmpr3 = ...;
}

// Прототип функции-обработчика прерывания
interrupt void controlIsr(void);

// Основная функция "main()", в которой происходит инициализация системы
int main(void) {
    // Настройка периферии микроконтроллера
    InitSysCtrl();
    memcpy(&RamfuncsRunStart, &RamfuncsLoadStart, &RamfuncsLoadEnd - &RamfuncsLoadStart);
    InitFlash();
    InitPieCtrl();
    InitPieVectTable();

    // Настройка таймера для прерываний на частоте 5 кГц
    EALLOW;
    EPwm1Regs.TBPRD = 6000;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1;
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTEN = 1;
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTSEL = TB_CTR_ZERO;
    EPwm1Regs.ETPS.bit.INTPRD = 1;

    PieVectTable.EPWM1_INT = controlIsr;
    PieCtrlRegs.PIEIER3.all = M_INT1;
    IER |= M_INT3;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;

    CpuTimer0Regs.PRD.all = 0xFFFFFFFF;
    CpuTimer0Regs.TCR.bit.TSS = 0;
    EDIS;

    // В первую очередь необходимо задать вариант в переменной "n"
    // и внутренний период таймера ШИМ 6000
```

```

drive.n = 29;
drive.tpr = 6000;

// Теперь нужно вызвать функцию "Init" для инициализации модели
drive.Init(&drive);

// Глобально разрешаем прерывания
EINT;

// Бесконечный цикл
while (1) {
}

// Прерывание для расчёта модели двигателя
interrupt void controlIsr(void) {
    // Пользовательская функция с расчётом системы управления,
    // в которой осуществляется расчёт и присвоение уставок сравнения cmp1, cmp2, cmp3
    controlSystem();

    // Выполнение модели двигателя
    drive.Execute(&drive);

    // Очистка флагов прерывания
    EPwm1Regs.ETCLR.bit.INT = 1;
    PieCtrlRegs.PIEACK.bit.ACK3 = 1;
}

```

Так, в начале функции **main()** следует разместить инициализацию данных системы управления, а в **controlIsr()** разместить саму систему управления.

Программа построена таким образом, что сначала запускается инициализация, а периодический вызов модели осуществляется в прерывании таймера, настроенного на частоту 5000 Гц. Частота работы виртуальной модели может отличаться, что не повлияет на период отработки одного прерывания. Кроме того, возможна ситуация, когда система управления будет выполняться дольше одного периода таймера прерываний, что приведет к неизбежному рассогласованию между модельным временем и реальным. Для оценки реального времени введена переменная **drive.time**, которая хранит модельное время в секундах с момента начала симуляции. Для частоты ШИМ 5000 Гц и системе управления, уместящейся в период ШИМ вместе с расчетом модели в функции **drive.Execute()**, модельное время будет совпадать с реальным.

Модель имеет заголовочный файл **model.h** (лист. 4.2).

Лист. 4.2. Файл **model.h**

```

#include "IQmathLib.h"

// faults
#define ILLEGAL_STUDENT_NUMBER 1
#define MAX_CURRENT_FAULT 2
#define MAX_SPEED_FAULT 3

// motor types (for internal use)
#define INDUCTION_MOTOR 1

```

```

#define SYNC_MOTOR 2
#define DC_MOTOR 3
#define SRD 4
#define SyncRM 5

#define PI 3.1415926535897932384626433832795
#define INV_2PI 0.15915494309189533576888376337251

typedef struct MODELDATA {
    unsigned int n;           // Номер варианта
    unsigned int cmp1;        // Уставка сравнения для модуля ШИМ (стойка А)
    unsigned int cmp2;        // Уставка сравнения для модуля ШИМ (стойка В)
    unsigned int cmp3;        // Уставка сравнения для модуля ШИМ (стойка С)
    unsigned int tpr;         // Период счётчика модуля ШИМ (для счёта вверх-вниз)
    unsigned int dt;          // Мёртвое время
    unsigned int adcSpeed;     // Код АЦП: скорость с тахогенератора
    unsigned int qepCounter;   // Счётчик импульсов инкрементального энкодера
    unsigned int hallSensor;   // Показания датчика Холла
    unsigned int iA;           // Код АЦП: ток фазы А (или ток якоря для ДПТ)
    unsigned int iB;           // Код АЦП: ток фазы В (или ток ОВ для ДПТ)
    unsigned int iC;           // Код АЦП: ток фазы С (для ДПТ не используется)
    int fault;                 // Код аварии
    float load;                // Нагрузка двигателя (Нм)
    float time;                // Время (с)
    void (*Init)(volatile struct MODELDATA*);
    void (*Execute)(volatile struct MODELDATA*);
} MODELDATA ;

typedef volatile struct MODELDATA Tmodel;

#define MODEL_DEFAULTS { 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0, Model_Init, Model_Execute}

void Model_Init(Tmodel*);
void Model_Execute(Tmodel*);

```

Структура данных содержит следующие переменные:

- unsigned int **n** – номер варианта (1–10 – асинхронные двигатели; 11–20 – синхронные двигатели; 21–30 – двигатели постоянного тока);
- unsigned int **cmp1** – скважность верхнего ключа первой стойки инвертора в тиках таймера;
- unsigned int **cmp2** – скважность верхнего ключа второй стойки инвертора в тиках таймера;
- unsigned int **cmp3** – скважность верхнего ключа третьей стойки инвертора в тиках таймера;
- unsigned int **tpr** – период ШИМ в тиках таймера с частотой тактирования 150 МГц, считающего вверх/вниз;

- unsigned int **dt** – «мертвое время» в тиках таймера (возможно нулевое задание);
- unsigned int **adcSpeed** – сигнал с тахогенератора, подключенного к АЦП, пропорциональный скорости вращения. Нулевой скорости соответствует число 2084;
- unsigned int **qepCounter** – сигнал по положению с квадратурного импульсного датчика; обнуляется каждый оборот;
- unsigned int **hallSensor** – сигнал с датчика на эффекте Холла; первому биту соответствует фаза А, второму – фаза В, третьему – фаза С;
- unsigned int **iA** – сигнал с датчика тока фазы А (или якоря двигателя постоянного тока) после преобразования АЦП. Нулю тока соответствует число 2048;
- unsigned int **iB** – сигнал с датчика тока фазы В (или возбуждения двигателя постоянного тока) после преобразования АЦП. Нулю тока соответствует число 0 для ДПТНВ и 2048 для асинхронного и синхронного двигателей;
- unsigned int **fault** – признак аварии модели (0 – нет аварии, 1 – неверный вариант, 2 – максимально-токовая защита, 3 – защита по максимальной скорости). При срабатывании защиты модель прекращает работу, оставаясь в состоянии на момент аварии;
- float **load** – нагрузка на валу двигателя в Н·м;
- float **time** – текущее время модели в секундах от начала симуляции.

Таким образом, студент может воздействовать на параметры: **n**, **cmpr1**, **cmpr2**, **cmpr3**, **tpr**, **dt**, **load**. Определять состояние системы возможно по параметрам: **adcSpeed**, **iA**, **iB**, **qepCounter**, **hallSensor**, **fault**.

4.7. Методические указания по определению параметров двигателей

4.7.1. Как формируется напряжение на обмотках двигателей

В модели, которая используется в курсовом проекте, имитируется работа модуля ePWM (ШИМ) микроконтроллера F28035. Работа этого модуля подробно описана в методических указаниях по выполнению

лабораторных работ по курсу «Микропроцессорные средства в электроприводе».

При помощи модуля ШИМ можно сформировать любой потенциал относительно нижней шины ЗПТ в пределах напряжения ЗПТ (540 В) на концах обмоток двигателя. Потенциалы задаются через уставки сравнения таймеров ШИМ – "drive.cmpr1", "drive.cmpr2", "drive.cmpr3". Значения уставок могут находиться в диапазоне от 0 до величины "drive.tpr", которая задаётся при инициализации модели.

Среднее значение потенциала на одном периоде ШИМ на конце обмотки определяется по формуле:

$$\varphi_i = \frac{\text{drive.cmpr}_i}{\text{drive.tpr}} \cdot 540 \text{ В.} \quad (4.2)$$

Важно не путать понятия *потенциалов* на концах фаз и *напряжения* фазы, поскольку напряжение – это разность потенциалов.

Чтобы понять, как рассчитываются напряжения на обмотках двигателя, рассмотрим схемы подключения двигателей к инвертору.

4.7.2. Формирование напряжения на обмотках двигателя постоянного тока

Выше, на рис. 4.2, показано подключение двигателя постоянного тока к инвертору. Предположим, что уставки сравнения таймеров следующие:

$$\begin{cases} \text{cmpr1} = 1000 \\ \text{cmpr2} = 4000 \\ \text{cmpr3} = 2000 \end{cases} \quad (4.3)$$

Тогда потенциалы на концах обмотки якоря равны:

$$\begin{cases} \varphi_{я1} = \frac{\text{cmpr1}}{\text{tpr}} U_{DC} = \frac{1000}{6000} \cdot 540 = 90 \text{ В} \\ \varphi_{я2} = \frac{\text{cmpr2}}{\text{tpr}} U_{DC} = \frac{4000}{6000} \cdot 540 = 360 \text{ В} \end{cases} \quad (4.4)$$

Обмотка возбуждения одним концом подключена напрямую к отрицательной шине ЗПТ ($\varphi_{ов2} = 0 \text{ В}$), а потенциал на другом конце определяется величиной *cmpr3*:

$$\varphi_{ов1} = \frac{2000}{6000} \cdot 540 = 180 \text{ В.} \quad (4.5)$$

Тогда напряжение якоря составляет

$$U_{я} = \varphi_{я1} - \varphi_{я2} = 90 - 360 = -270 \text{ В.} \quad (4.6)$$

Напряжение обмотки возбуждения

$$U_{об} = \varphi_{об1} - \varphi_{об2} = 180 - 0 = 180 \text{ В.} \quad (4.7)$$

4.7.3. Формирование напряжений на обмотках трехфазных двигателей переменного тока

Выше, на рис. 4.1 показано подключение АД и СД к инвертору. Концы обмоток фаз А, В и С (на рисунке обозначены как U, V и W соответственно) подключаются к трём стойкам инвертора. Соответственно потенциалы фаз определяются так:

$$\begin{cases} \varphi_A = \frac{cmpr1}{tpr} U_{DC} \\ \varphi_B = \frac{cmpr2}{tpr} U_{DC} . \\ \varphi_C = \frac{cmpr3}{tpr} U_{DC} \end{cases} \quad (4.8)$$

Напряжение фазы – это разность потенциалов конца фазы и средней точки: $U_i = \varphi_i - \varphi_N$.

Потенциал средней точки рассчитывается как арифметическое среднее потенциалов концов фаз:

$$\varphi_N = \frac{\varphi_A + \varphi_B + \varphi_C}{3}. \quad (4.9)$$

Пример: пусть уставки сравнения модулей ШИМ равны:

$$\begin{cases} cmpr1 = 1500 \\ cmpr2 = 5000 . \\ cmpr3 = 3000 \end{cases} \quad (4.10)$$

Тогда потенциалы фаз относительно нижней шины ЗПТ равны:

$$\begin{cases} \phi_A = \frac{cmpr1}{tpr} U_{DC} = 135 \text{ В} \\ \phi_B = \frac{cmpr2}{tpr} U_{DC} = 450 \text{ В} . \\ \phi_C = \frac{cmpr3}{tpr} U_{DC} = 270 \text{ В} \end{cases} \quad (4.11)$$

Потенциал средней точки равен:

$$\varphi_N = \frac{\varphi_A + \varphi_B + \varphi_C}{3} = 285 \text{ В.} \quad (4.12)$$

Тогда напряжения фаз равны:

$$\begin{cases} U_a = \phi_A - \phi_N = -150 \text{ В} \\ U_b = \phi_B - \phi_N = 165 \text{ В} \\ U_c = \phi_C - \phi_N = -15 \text{ В} \end{cases} \quad (4.13)$$

4.7.4. Расчёт уставок сравнения по известным напряжениям

В системе управления решается обратная задача – необходимо рассчитать уставки сравнения таймеров (т.е., по сути, потенциалы фаз), зная, какие напряжения нужно приложить к фазам двигателей. Для решения этой задачи используются различные алгоритмы ШИМ, подробные описания которых приведены в [5].

4.7.5. Отображение времени на графиках в Code Composer Studio

По умолчанию время на графиках отображается в отсчётах (samples). Каждый отсчёт – это фактически номер точки на графике. Например, если длительность графика составляет 156 отсчётов, то это значит, что на графике отображено 156 точек.

Если между каждой точкой проходили одинаковые промежутки времени, то можно перевести отсчёт в фактическое время. Например, если каждая точка графика была получена после очередного расчёта модели (через функцию `drive.execute`), то это означает, что между точками проходило время, равное периоду расчёта модели. Период расчёта в свою очередь равен периоду ШИМ, который задаётся в тактах процессора в переменной `trp`. Если в вашей модели частота ШИМ равна $f_{PWM} = 5000 \text{ Гц}$, то период ШИМ составляет $T_{PWM} = \frac{1}{5000} = 0,0002 \text{ с}$, а длительность графика из 162 точек составляет $t = 162T_{PWM} = 0,324 \text{ с}$. (см. рис. 4.4).

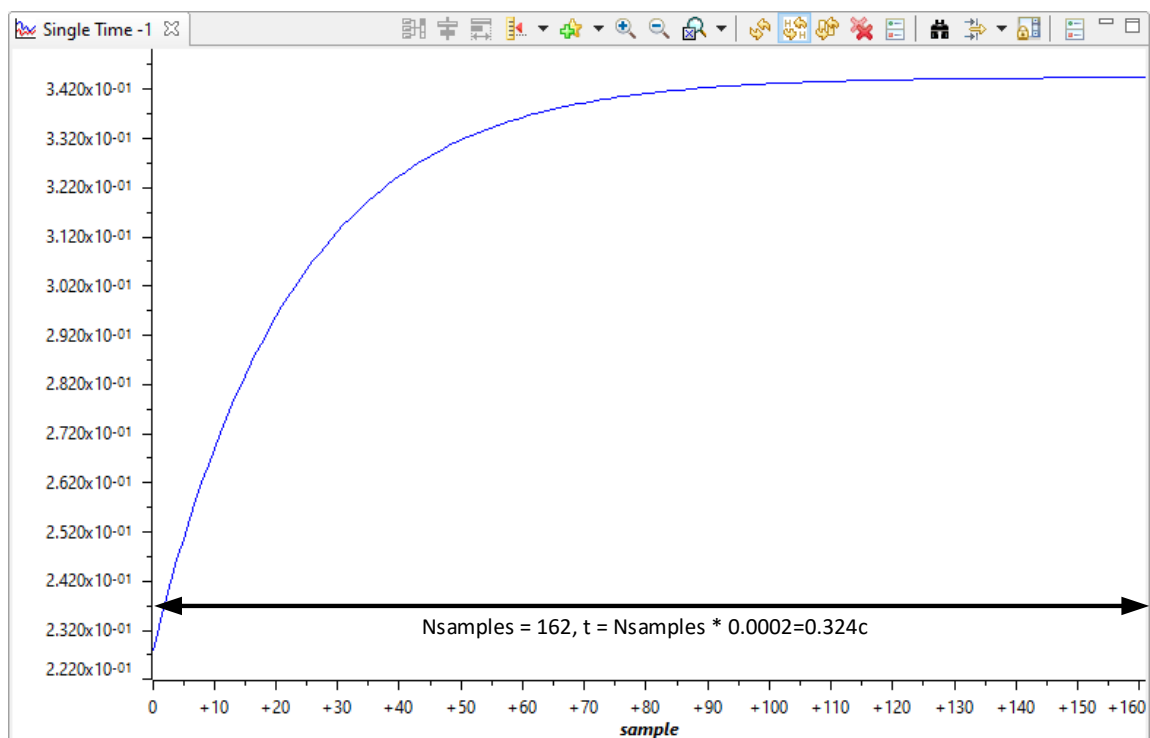


Рис. 4.4. К определению длительности процесса на осциллограмме

Если все точки графика снимаются на одной частоте, то можно включить на графике отображение времени с секундах или миллисекундах в окне "Graph properties" (рис. 4.5).

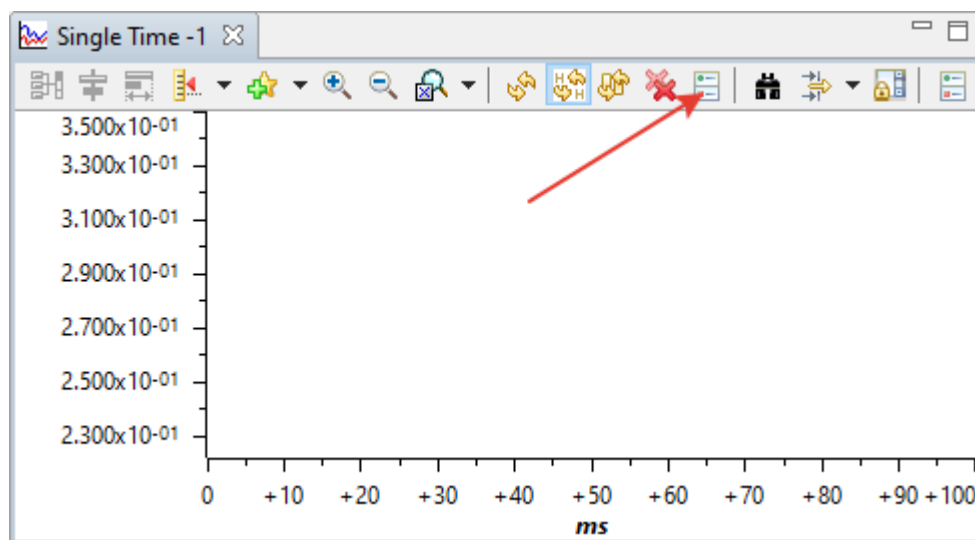


Рис. 4.5. Расположение кнопки настроек графика

Для этого в поле "Sampling Rate Hz" нужно задать, на какой частоте на график будут добавляться точки, а в поле "Time Display Unit" – в каких единицах вы хотите отображать время. На рисунке 4.6 установлена частота следования точек, равная 5000 Гц, и единицы для отображения времени – "ms" (миллисекунды).

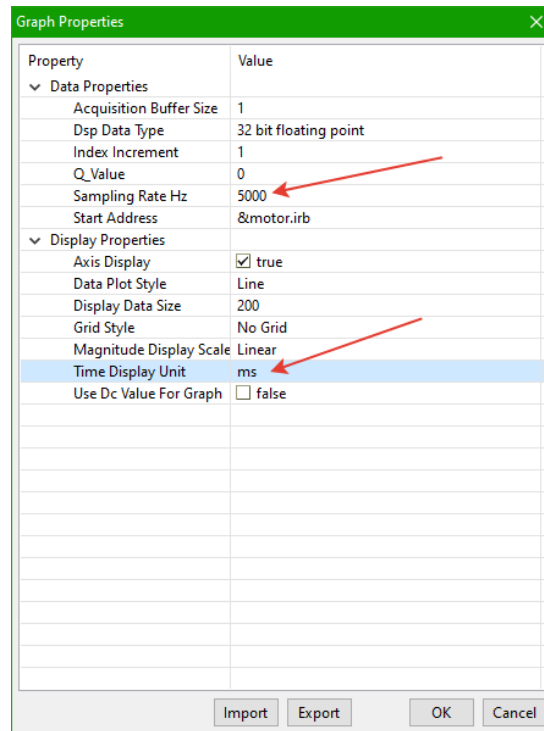


Рис. 4.6. Необходимые параметры для отображения времени на графике в миллисекундах

На рисунке [4.7](#) показано, как выглядит осциллограмма с такими настройками. Обратите внимание, что временная ось теперь имеет название не "samples", а "ms". Значения по этой оси, соответственно, показывают не количество отсчётов, а количество миллисекунд.

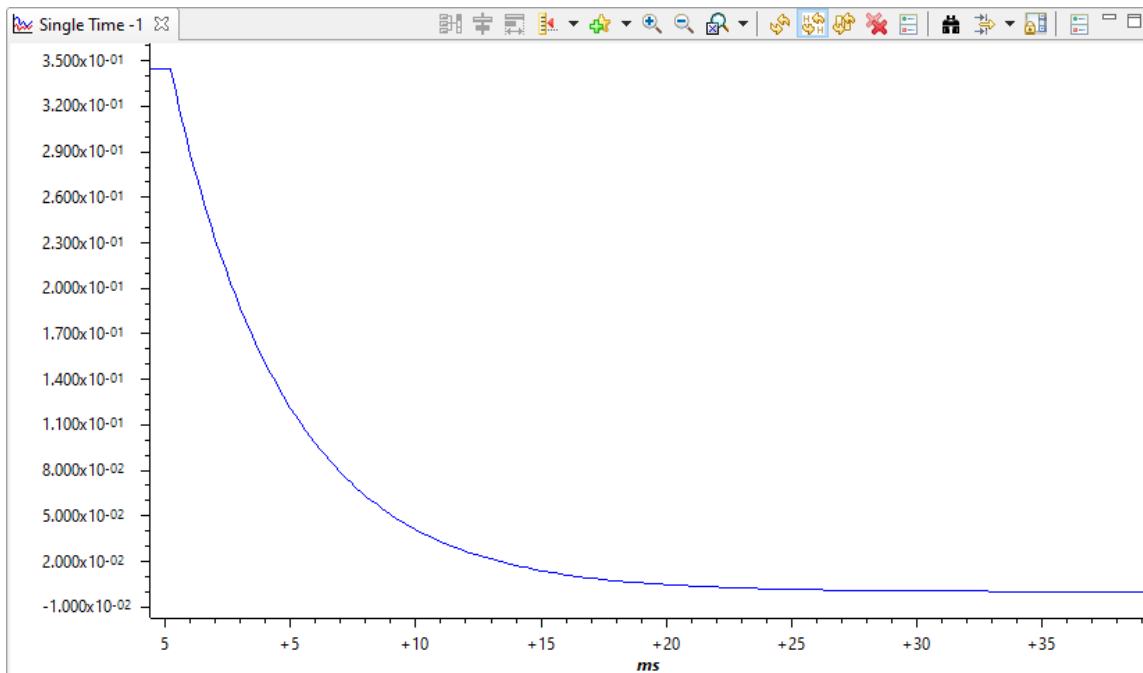


Рис. 4.7. График с отображением времени в миллисекундах

4.8. Какие параметры необходимо определить

Для всех типов двигателей необходимо примерно оценить номинальную мощность. Список других параметров, подлежащих оценке, зависит от типа двигателя. Ниже указано, какие параметры следует определить.

4.8.1. Двигатель постоянного тока

- ✓ Номинальное напряжение обмотки возбуждения $U_{\text{ов ном}}$ из ряда 110В / 220В / 440В.
- ✓ Номинальное напряжение обмотки якоря $U_{\text{я ном}}$ из ряда 110 В/ 220 В/ 440 В.
- ✓ Номинальное сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$.
- ✓ Номинальная индуктивность обмотки якоря $L_{\text{я}}$.
- ✓ Номинальное сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{ов}}$.
- ✓ Номинальная индуктивность обмотки возбуждения $L_{\text{ов}}$.

Напряжение обмотки возбуждения выбирается из условия «Ток в установившемся режиме равен 1А». Напряжение обмотки якоря выбирается из условия «При номинальном токе обмотки возбуждения скорость холостого хода наиболее близка, но не ниже номинальной скорости».

4.8.2. Синхронный двигатель с постоянными магнитами

- ✓ Сопротивление фазы статора R_s .
- ✓ Индуктивность фазы статора L_s .
- ✓ Потокосцепление постоянный магнитов $\Psi_{\text{пм}}$.
- ✓ За номинальную мощность можно принять значение мощности, при которой амплитудное значение тока двигателя достигает половины от значения, которое может измерить датчик тока.

4.8.3. Асинхронный двигатель

- ✓ Сопротивление фазы статора R_s .
- ✓ Взаимная индуктивность статора и ротора L_m .

- ✓ Индуктивность рассеяния статора $L_{s\sigma}$.
- ✓ Индуктивность рассеяния ротора $L_{r\sigma}$.
- ✓ За номинальную мощность можно принять значение мощности, развиваемой двигателем при номинальном моменте.

4.9. Методика определения параметров двигателей

4.9.1. Двигатель постоянного тока

Номинальным напряжением обмотки возбуждения для моделей из курсового проекта принимается такое, при котором ток в обмотке $I_{\text{ОВ ном}} = 1$ А. Таким образом, для определения параметра $U_{\text{ОВ ном}}$ необходимо подобрать такое напряжение, при котором будет достигнут ток 1 А. В ходе этого эксперимента по анализу осциллограммы тока можно так же определить параметры $R_{\text{ОВ}}$ и $L_{\text{ОВ}}$.

Пример: на обмотку возбуждения подано напряжение 110В. Получен переходной процесс, как на рис. 4.8 ниже.

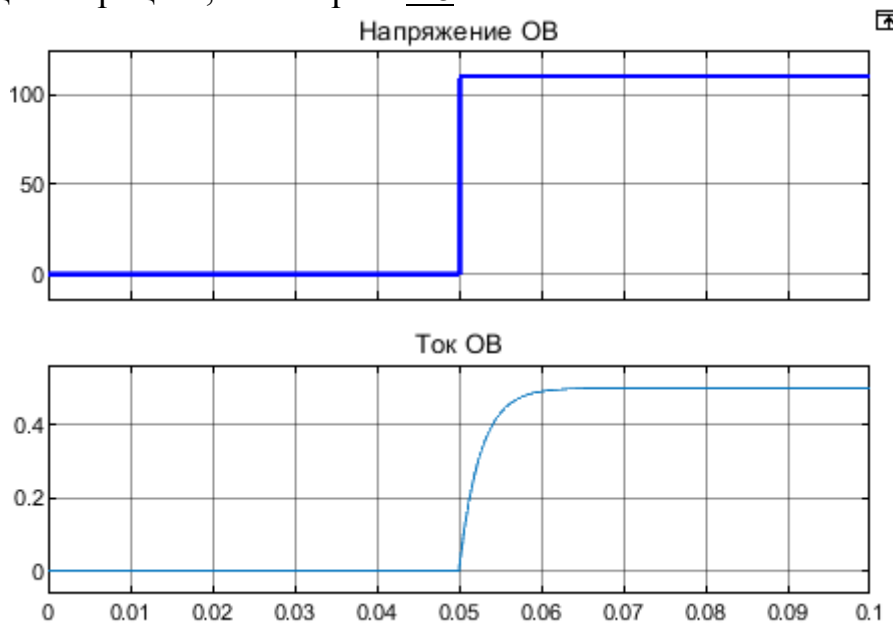


Рис. 4.8. Определение параметров ОВ ДПТ

Ток в обмотке установился на уровне $I_{\text{ОВ}} = 0,5$ А при приложении напряжения $U_{\text{ОВ}} = 110$ В, следовательно номинальное напряжение составляет:

$$U_{\text{ОВ ном}} = U_{\text{ОВ}} \cdot \frac{I_{\text{ОВ ном}}}{I_{\text{ОВ}}} = 220 \text{ В.} \quad (4.14)$$

Сопротивление составляет:

$$R_{\text{ОВ}} = \frac{U_{\text{ОВ}}}{I_{\text{ОВ}}} = 220 \text{ Ом.} \quad (4.15)$$

По длительности переходного процесса можно определить электрическую постоянную времени обмотки возбуждения, откуда можно найти индуктивность обмотки возбуждения. Ток достиг установившегося значения примерно за 0,012 с. Электрическую постоянную времени можно примерно принять в 5 раз меньше этого времени:

$$T_{\text{ОВ}} = \frac{t_{\text{пп}}}{5} = 0,0024 \text{ с.} \quad (4.16)$$

Отсюда индуктивность обмотки возбуждения:

$$L_{\text{ОВ}} = T_{\text{ОВ}} \cdot R_{\text{ОВ}} = 0,528 \text{ Гн.} \quad (4.17)$$

Точно таким же образом определяются параметры $R_{\text{я}}$, $T_{\text{я}}$, $L_{\text{я}}$.

Номинальное напряжение якоря выбирается из стандартного ряда 110 В / 220 В / 440 В следующим образом: необходимо при номинальном потокосцеплении разогнать двигатель, прикладывая к якорю одно из указанных напряжений. Номинальным напряжением является то, при котором скорость холостого хода двигателя будет наиболее близко (но не ниже) к номинальной скорости, которая указана в таблице с вариантами двигателей. При разгоне двигателя важно учитывать два фактора: напряжение к якорю не следует прикладывать скачком, чтобы не превышать допустимый ток якоря; прикладывать напряжение можно только при номинальном потокосцеплении, т.е. когда переходные процессы в цепи обмотки возбуждения закончатся.

Пример: после окончания переходного процесса в ОВ, к якорю было приложено (по задатчику интенсивности) напряжение 220В. На рисунке 4.9 показаны осциллограммы тока ОВ, напряжения якоря и скорости двигателя (в об/мин). После окончания разгона скорость двигателя установилась на значении около 1150 об/мин. Так как номинальная скорость двигателя составляет 1000 об/мин, то напряжение 220 В является номинальным для якоря этого двигателя.

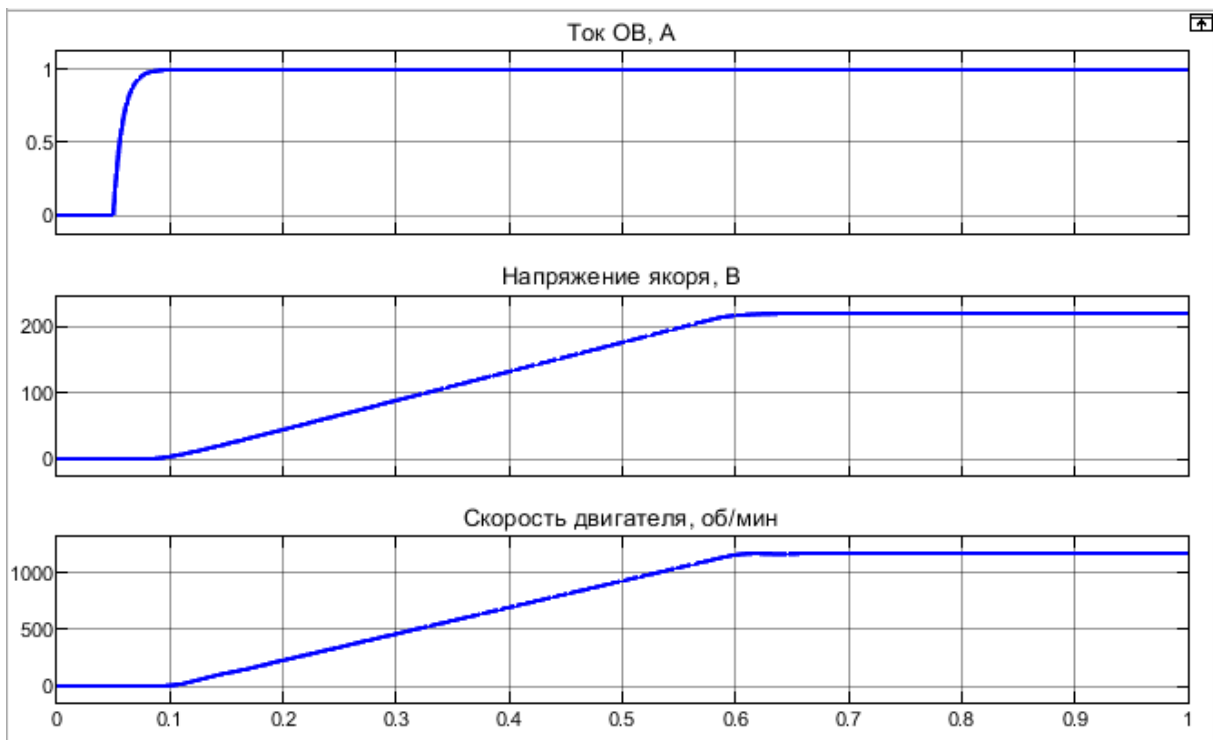


Рис. 4.9. Определение номинального напряжения якоря ДПТ

4.9.2. Определение параметров синхронного двигателя

Определение сопротивления и индуктивности фазы синхронного двигателя производится по тем же принципам, что и в двигателе постоянного тока. Нужно приложить **к фазе** постоянное напряжение, а затем, зная приложенное напряжение, по установившемуся значению тока определить сопротивление, а по времени переходного процесса определить индуктивность.

Пример: к фазе было приложено напряжение $U_a = 13,3$ В. Ток фазы достиг установившегося значения $I_a = 30$ А за время примерно равное $t_{пп} \approx 1,5$ с. Таким образом сопротивление фазы равно:

$$R_s = \frac{U_a}{I_a} = \frac{13,3}{30} = 0,44 \text{ Ом.} \quad (4.18)$$

Постоянная времени статора примерно равна:

$$T_s = \frac{t_{пп}}{5} = 0,3 \text{ с.} \quad (4.19)$$

Тогда индуктивность статора составляет:

$$L_s = T_s \cdot R_s = 0,3 \cdot 0,44 = 0,132 \text{ Гн.} \quad (4.20)$$

Рисунок 4.10 иллюстрирует процесс нарастания тока в фазе под действием приложенного напряжения.

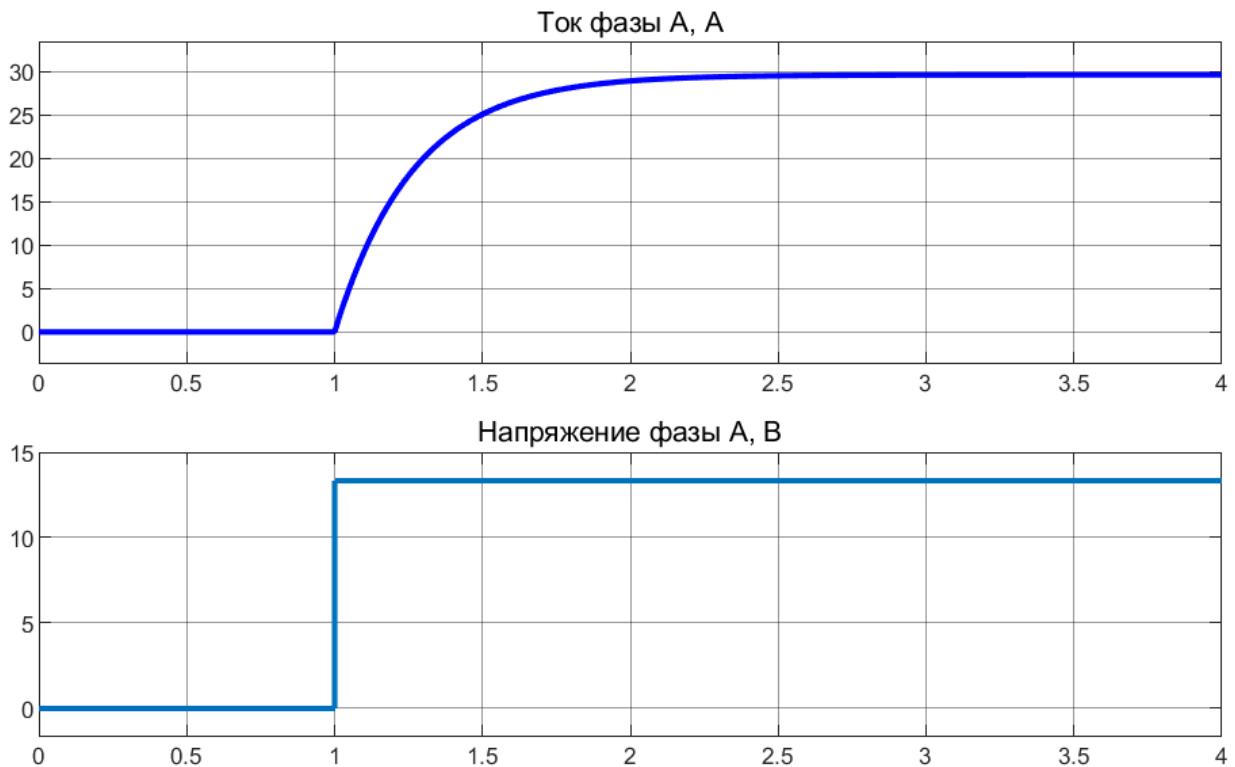


Рис. 4.10. Определение сопротивления и индуктивности статора СД

Определение потокосцепления постоянных магнитов проводится следующим образом: в фазе А необходимо задать постоянный ток, а затем постепенно увеличивать момент нагрузки двигателя. С каждым увеличением ротор двигателя будет поворачиваться на какой-то угол и, после затухания колебаний, фиксироваться в этом положении. Величина угла поворота зависит от величины тока фазы и момента нагрузки. При определённом моменте нагрузки угол поворота станет приблизительно равен 90 электрических градусов – в этом положении момент двигателя будет максимальным. При этом положение осей dq , которые связаны с ротором будет таково, что моментобразующая ось q совпадёт с осью α координат $\alpha\beta$. Так как ток оси α равен току фазы А, то электромагнитный момент двигателя равен:

$$M_{\text{э}} = \Psi_{\text{пм}} \cdot i_q = \Psi_{\text{пм}} \cdot i_{\alpha} = \Psi_{\text{пм}} \cdot i_a. \quad (4.21)$$

Механический момент двигателя определяется выражением

$$M_{\text{мех}} = \frac{3}{2} p M_{\text{э}}, \quad (4.22)$$

где p – число пар полюсов. При дальнейшем увеличении нагрузки двигатель начнёт вращаться, так как момент нагрузки превысит момент, развиваемый двигателем.

Пример: в фазе А двигателя задан ток 30 А. На осциллограмме ниже (рис. 4.11) показано, что при моменте нагрузки примерно равном $M_{\text{нагр.макс}} = 15 \text{ Н} \cdot \text{м}$ двигатель повернулся на угол 90 эл. градусов. При моменте нагрузки больше 15 Н·м двигатель начал вращаться. Двигатель имеет две пары полюсов. Электромагнитный момент двигателя при этом равен:

$$M_{\text{макс э}} = \frac{M_{\text{нагр.макс}}}{2 \cdot \frac{3}{2}} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (4.23)$$

Отсюда потокосцепление постоянных магнитов:

$$\Psi_{\text{ПМ}} = \frac{M_{\text{макс э}}}{i_a} = 0,167 \text{ Вб}. \quad (4.24)$$

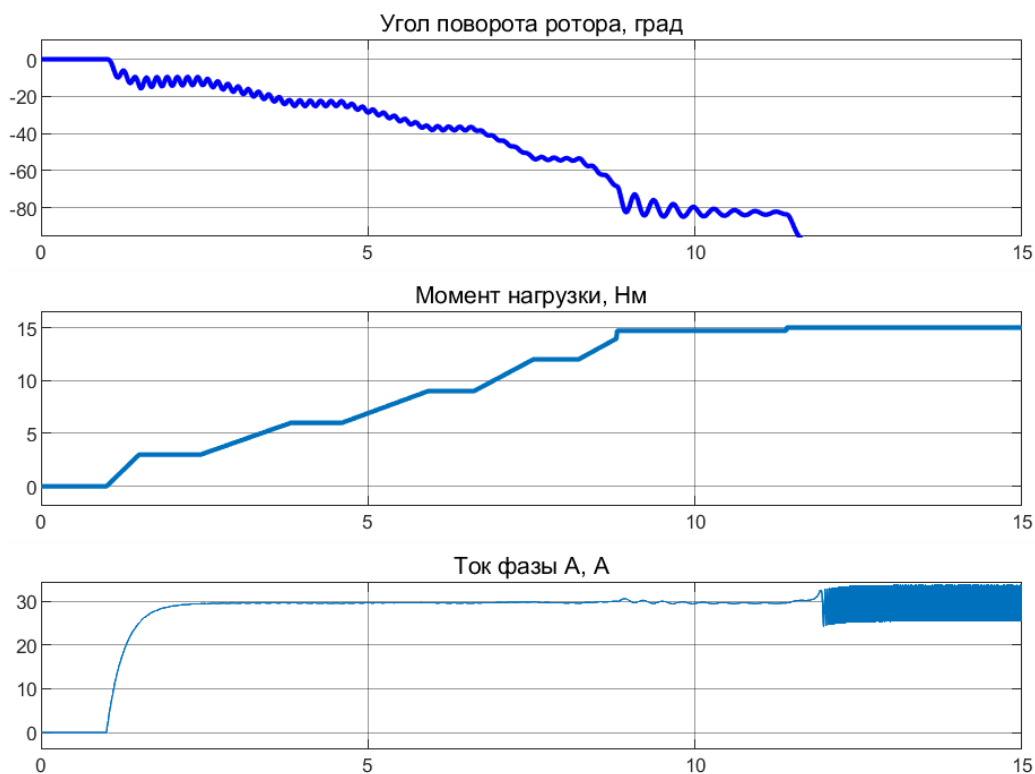


Рис. 4.11. Определение потокосцепления постоянных магнитов

4.9.3. Определение параметров асинхронного двигателя

Определение сопротивления фазы статора осуществляется так же, как и у синхронного двигателя.

Определение индуктивности статора проводится по опыту холостого хода. В этом режиме скольжение двигателя близко к нулю и ток в

роторе практически не протекает, поэтому ток статора определяется его сопротивлением и взаимной индуктивностью статора и ротора:

$$I_s = \frac{U_s}{Z_s} = \frac{U_s}{\sqrt{R_s^2 + x_s^2}}. \quad (4.25)$$

Отсюда, зная приложенное напряжение и ток статора, можно определить полную индуктивность статора:

$$L_s = \sqrt{\left(\frac{U_s}{I_s}\right)^2 - R_s^2} \cdot \frac{1}{2\pi f_1}, \quad (4.26)$$

где f_1 – частота приложенного напряжения.

Пример: к двигателю приложено напряжение амплитуды $U_{ph} = 100$ В с частотой $f_1 = 50$ Гц. После разгона амплитуда тока фазы двигателя примерно равна $I_{ph} = 1$ А. Сопротивление фазы равно $R_s = 1,36$ Ом.

Отсюда полная индуктивность статора равна:

$$L_s = \sqrt{\left(\frac{U_{ph}}{I_{ph}}\right)^2 - R_s^2} \cdot \frac{1}{2\pi f_1} = 0,318 \text{ Гн}. \quad (4.27)$$

Ниже приведены осциллограммы тока и напряжения фазы двигателя при проведении этого опыта (рис. 4.12). Голубой линией поверх тока фазы А показано его амплитудное значение.

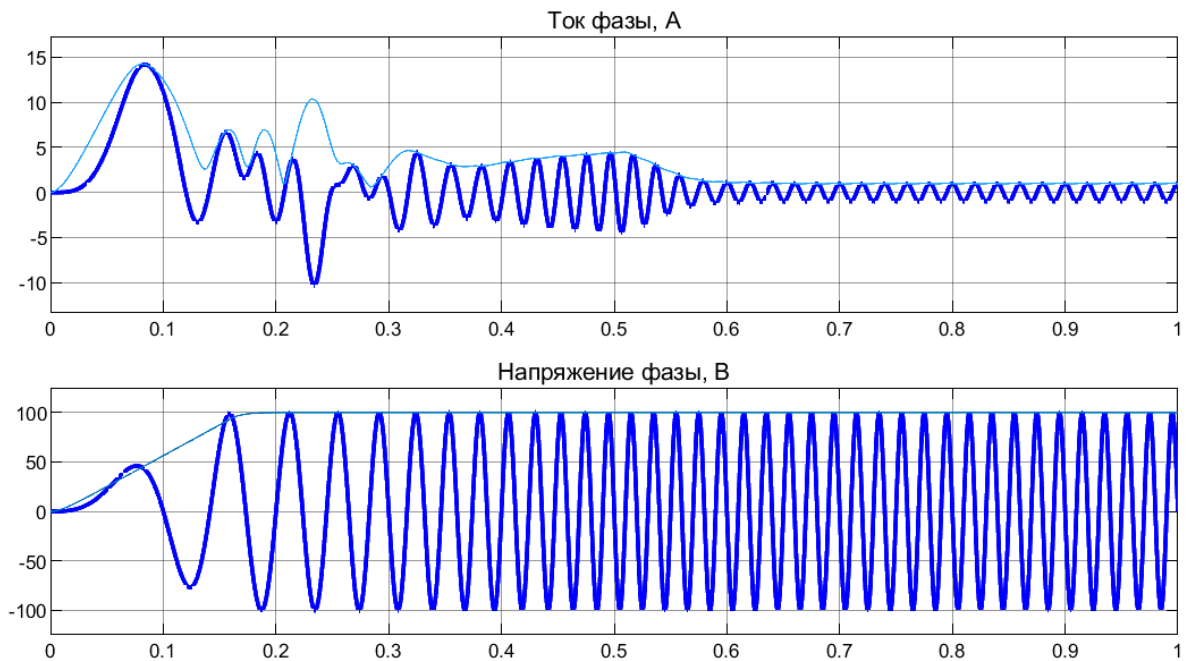


Рис. 4.12. Определение полной индуктивности статора

Полная индуктивность статора складывается из взаимной индуктивности L_m и индуктивности рассеяния $L_{s\sigma}$. Индуктивности рассеяния статора $L_{s\sigma}$ и ротора $L_{r\sigma}$ можно вычислить, определив критический момент двигателя, так как критический момент определяется формулой

$$M_{\kappa} = \frac{3U^2}{2\omega_0 \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right)}, \quad (4.28)$$

где сумма сопротивлений $X_1 + X_2'$ определяется индуктивностями рассеяния статора и ротора и равна $2\pi f L_{s\sigma} + 2\pi f L_{r\sigma}$. Так как активное сопротивление статора значительно меньше реактивного сопротивления, то им можно пренебречь и упростить выражение:

$$M_{\kappa} = \frac{3U^2}{2\omega_0 (X_1 + X_2')}. \quad (4.29)$$

Чтобы не превысить допустимый ток двигателя, следует задавать небольшую амплитуду напряжения. После разгона двигателя нужно постепенно увеличивать момент нагрузки двигателя до тех пор, пока скорость двигателя не начнёт неконтролируемо падать – это будет означать, что момент нагрузки превысил критический момент двигателя. После чего можно рассчитать сумму $L_{s\sigma} + L_{r\sigma}$. Эти индуктивности можно считать равными: $L_{s\sigma} = L_{r\sigma}$.

Пример: к двигателю приложено напряжение амплитуды $U_{ph} = 100$ В с частотой $f_1 = 50$ Гц. После окончания разгона к двигателю ступеньками прикладывается нагрузка. При моменте нагрузки 7 Нм, скорость двигателя начинает падать. Следовательно критический момент двигателя при таком напряжении примерно равен $M_k = 6,5$ Н·м. Отсюда сумма реактивных статора и ротора:

$$X_1 + X'_2 = \frac{3U^2}{2\omega_0 M_k} = 14,7 \text{ Ом.} \quad (4.30)$$

Индуктивности рассеяния выражаются следующим образом:

$$L_{s\sigma} = L_{r\sigma} = \frac{(X_1 + X'_2)/2\pi f}{2} = 0,023 \text{ Гн.} \quad (4.31)$$

Приведённые ниже осциллограммы (рис. 4.13) показывают изменение скорости вращения двигателя при увеличении момента нагрузки в описанном опыте.

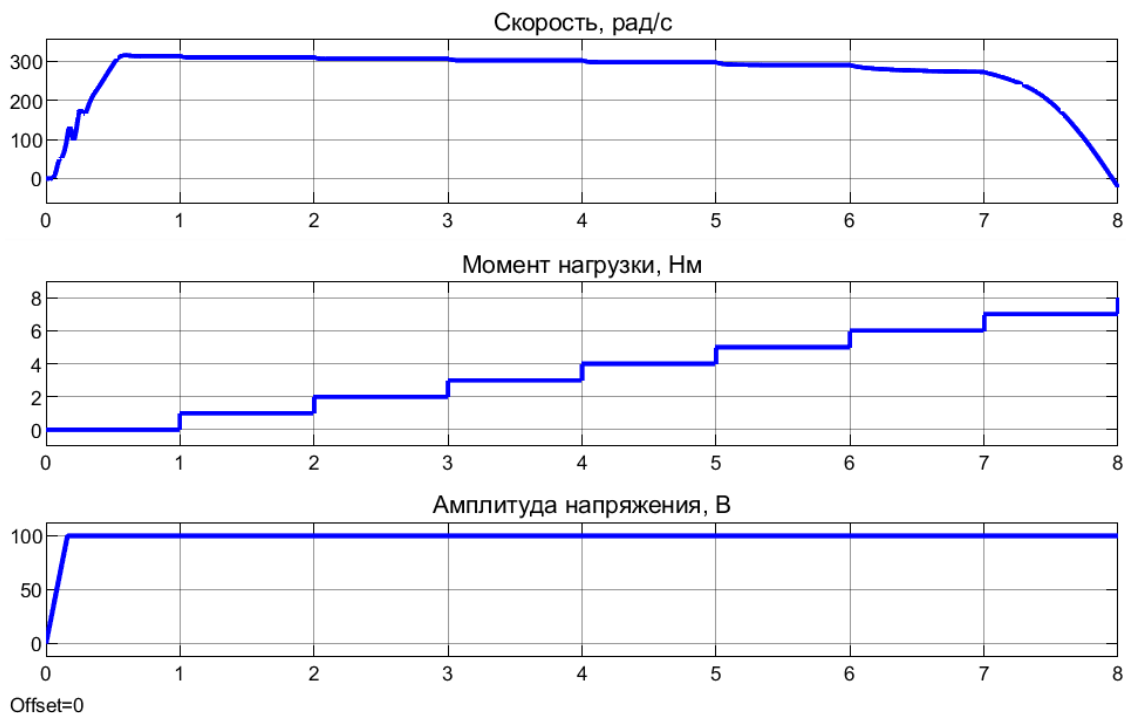


Рис. 4.13. Определение индуктивностей рассеяния статора и ротора

[К началу раздела](#)

[К содержанию](#)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. – URL: <https://simintech.ru/> (дата обращения 11.07.2024)
2. Ключев, В. И. Теория электропривода : учебник / В. И. Ключев . – 2-е изд., перераб. и доп . – М. : Энергоатомиздат, 1998 . – 704 с.
3. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин и др. – М. : Альянс, 2023. – 504 с.
4. Преобразователи частоты Овен. – URL: https://owen.ru/catalog/preobrazovateli_chastoti (дата обращения 11.07.2024).
5. Анучин, А. С. Системы управления электроприводов: учебник / А. С. Анучин. – М. : Издательский дом МЭИ, 2015 . – 373 с.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев, В. А. Релейно-контакторные системы управления электропривода: учебное пособие/ В. А. Елисеев. – М. : Изд-во МЭИ, 1995. – 144 с.
2. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов : учебник / В. М. Терехов, О. И. Осипов. – М. : Академия, 2005 . – 304 с.
3. Крановое электрооборудование : справочник / Ю. В. Алексеев, и др. ; Ред. А. А. Рабинович . – М. : Энергия, 1979 . – 240 с.
4. Вешеневский, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С. Н. Вешеневский . – 6-е изд., испр . – М. : Энергия, 1977 . – 432 с.

Приложение 1

Требования к оформлению пояснительных записок к курсовым работам/проектам

Файл с шаблоном для оформления курсовых проектов/работ представлен по ссылке на QR-коде. Далее в приложении представлены пояснения по правилам оформления, применяемым в шаблоне.



Приложение 1

П1.1. ОФОРМЛЕНИЕ ТЕКСТА

Оформление заголовков

Заголовок раздела должен быть оформлен стилем «Заголовок 1». Для применения стиля нужно выделить текст заголовка и выбрать в разделе «Стили» стиль «Заголовок 1», как показано на рисунке П1.1. Параметры стиля: Times New Roman, 14 pt, полужирный, без отступов и выступов, выравнивание по левому краю.

Нумерация проставится автоматически, когда вы примените стиль.

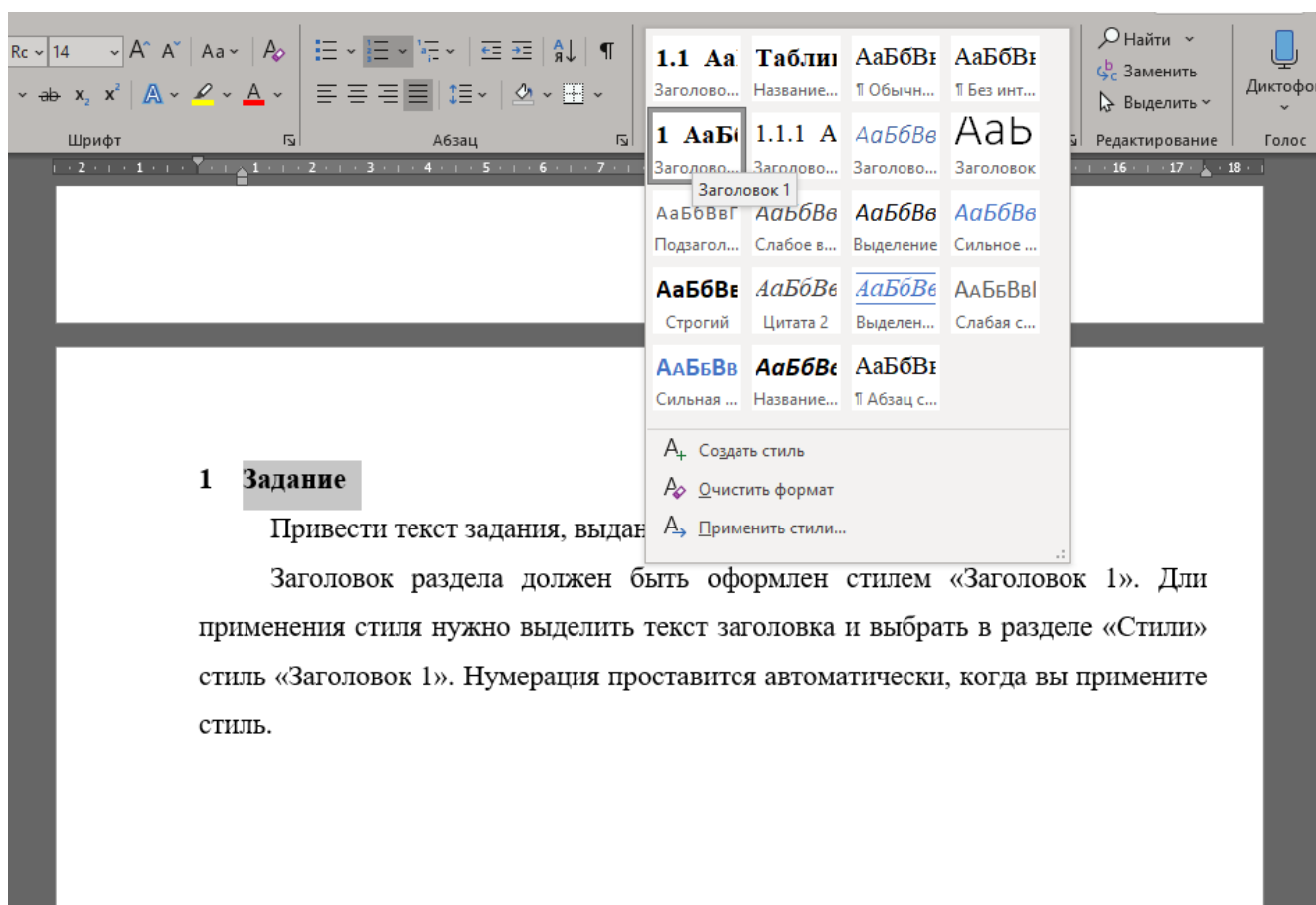


Рисунок П1.1 – Применение стиля к тексту

Заголовки второго уровня

Если требуется создать вложенный раздел (1.1, 1.2, 1.3 и т.д.), следует аналогичным образом применить к тексту заголовка стиль «Заголовок 2». Параметры стиля: Times New Roman, 14 pt, без отступов и выступов, выравнивание по левому краю.

Использовать более глубокую вложенность (1.1.1, 1.2.1.1 и т.д.) не рекомендуется.

Оформление текста

Оформлять текст следует также с использованием стилей – для этого нужно использовать стиль «Обычный». Параметры стиля: Times New Roman, 14 pt, отступ первой строки абзаца на 1.25 см, междустрочный интервал 1.5 строки, выравнивание по всей ширине.

П1.2. ОФОРМЛЕНИЕ РИСУНКОВ

Требования к содержимому рисунков

Если на рисунке (скриншоте) есть какие-либо надписи или числовые значения, то они должны быть читаемы. Все осциллограммы должны быть оформлены так, чтобы линии не сливались с фоном, т. е. линии должны иметь контрастный цвет и достаточную толщину.

Рисунок должен быть выровнен по центру страницы, без отступов/выступов.

Пример неправильно оформленного рисунка приведён на рис. П1.2, а пример правильно оформленного – на рисунке П1.3.

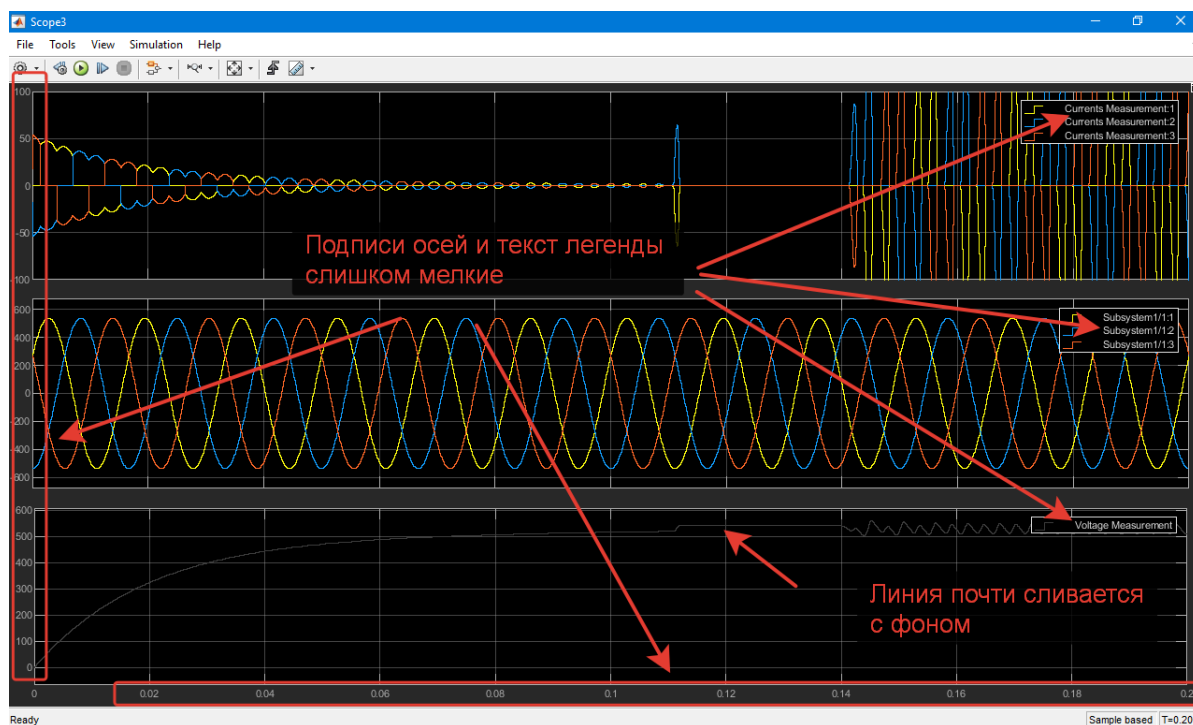


Рисунок П1.2 – Неправильно оформленный рисунок

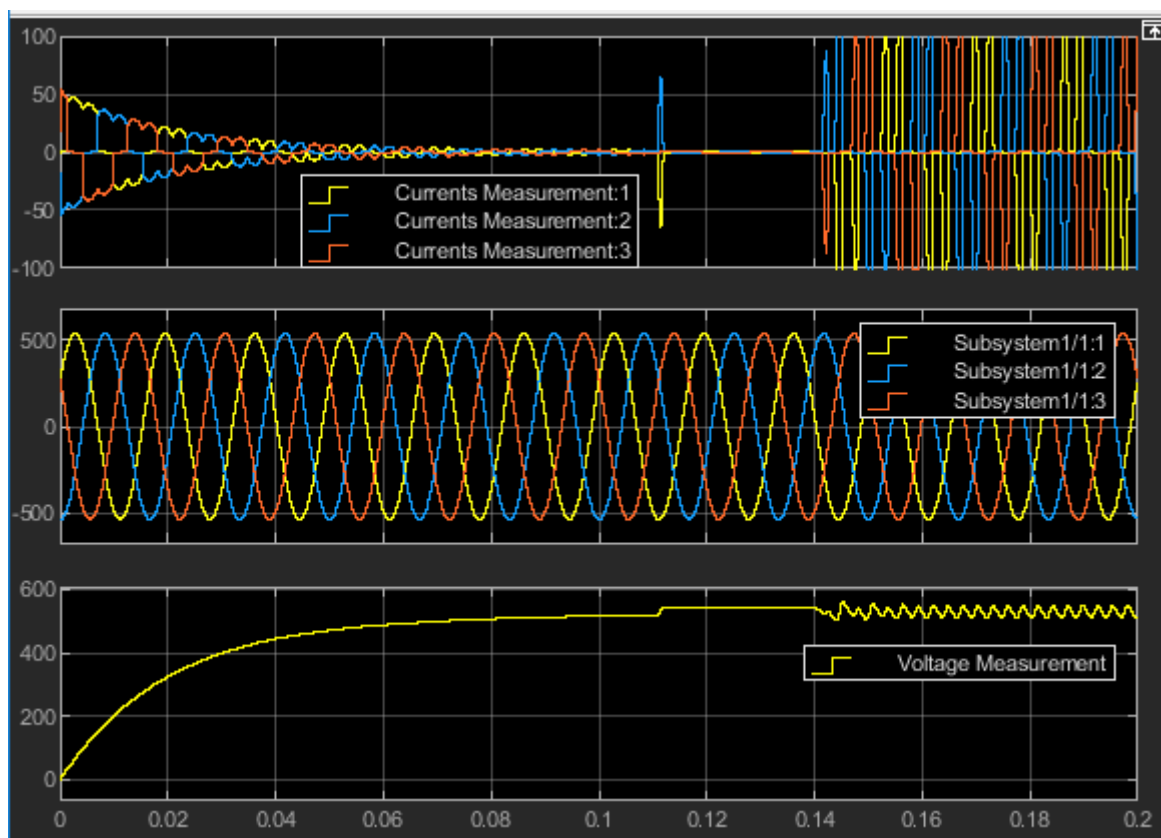


Рисунок П1.3 – Правильно оформленный рисунок

Оформление названий рисунков

Под каждым рисунком должна присутствовать подпись «Рисунок N (или Рис. N) – Название рисунка».

Название может быть сделано вручную; в таком случае к нему следует применить стиль «Название объекта». Параметры стиля: Times New Roman, 14pt, без отступов и выступов, выравнивание по центру.

Также можно оформлять название с использованием функции «Вставить название» из меню «Ссылки», как это показано на рис. П1.4. В таком случае номер рисунка будет проставлен автоматически.

Нумерация рисунков может быть сквозной («Рисунок 1/2/3...»), или включать номер раздела, если рисунков много («Рисунок 1.1/1.2/2.1/2.2...»).

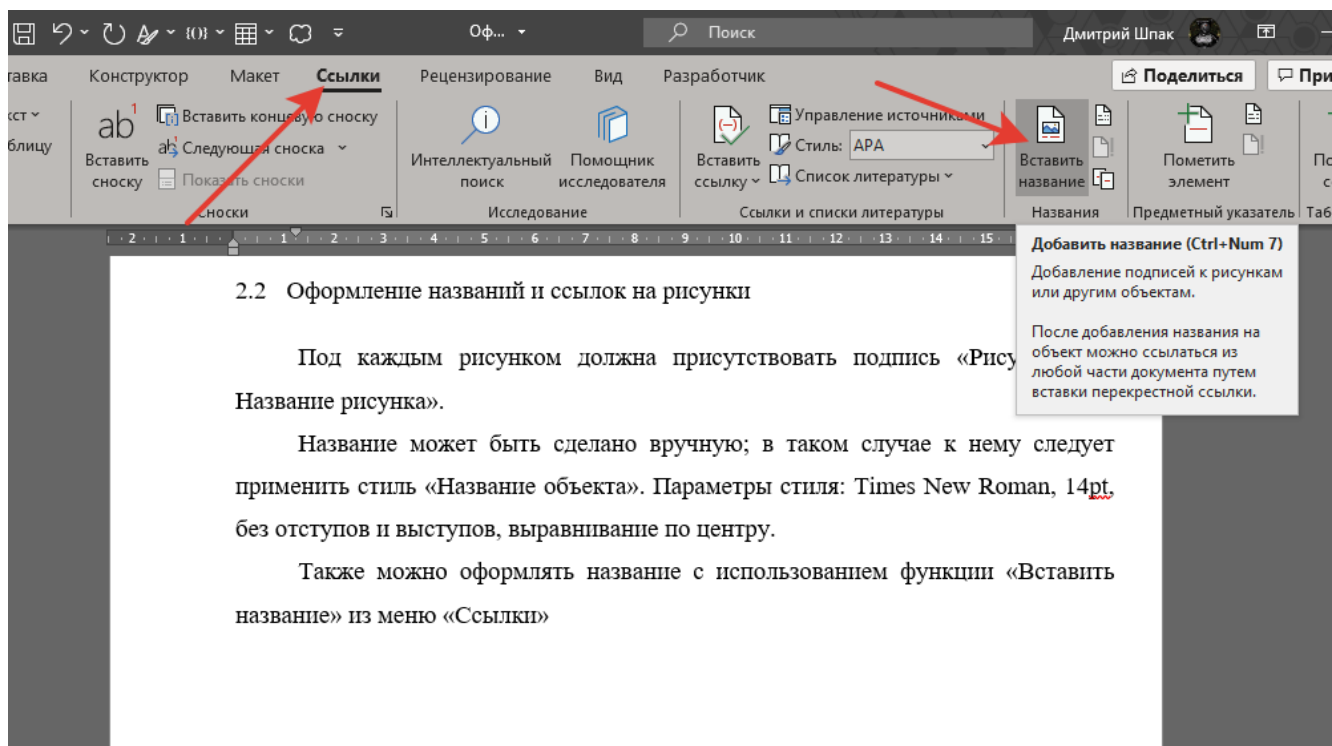


Рисунок П1.4 – Оформление названия рисунка

Ссылки на рисунки

На **каждый** рисунок в тексте должна быть ссылка с пояснением, что изображено на рисунке. Например, «На рисунке 4 показаны осциллограммы тока двигателя при работе в режиме...».

Ссылаться на рисунок следует до того, как он встречается в тексте: т. е. сначала пишется, что на каком-то рисунке что-то изображено, а затем вставляется сам рисунок.

П1.3. ОФОРМЛЕНИЕ КОДА ПРОГРАММЫ

Требования к оформлению листингов

Код программы должен оформляться в виде листингов. Для создания листинга следует вставить таблицу размера 1x1.

Если текст внутри листинга скопирован из среды моделирования, то его следует вставлять в режиме «Сохранить форматирование», чтобы сохранить цвета и настройки шрифтов, как это показано в листинге П1.1.

Иначе к содержимому листинга необходимо применить стиль «Код», как это показано в листинге П1.2. Параметры стиля: Consolas, 10pt, без отступов/выступов, междустрочный интервал 1.

Каждый листинг должен иметь название «Листинг N – Название листинга». Название должно располагаться над листингом, применяемый стиль – обычный.

Листинг П1.1 – Текст, скопированный из среды моделирования с сохранением форматирования

```
int main(void) {
    int i = 0;
    while (1) {
        i = i + 2;
    }
}
```

Листинг П1.2 – Текст, набранный вручную

FLASHN	: origin = 0x3E8000, length = 0x002000	/* on-chip FLASH */
FLASH E	: origin = 0x3EE000, length = 0x002000	/* on-chip FLASH */
FLASH C	: origin = 0x3F2000, length = 0x002000	/* on-chip FLASH */
FLASH A	: origin = 0x3F6000, length = 0x001F80	/* on-chip FLASH */

П1.4. ОФОРМЛЕНИЕ ТАБЛИЦ

Содержимое таблиц

Текст ячеек таблиц должен быть оформлен без отступов/выступов, с междустрочным интервалом 1.

Для этого можно использовать стиль «Текст таблицы». Названия столбцов таблиц необходимо дополнительно выравнивать по центру. В зависимости от содержания ячеек, допускается выравнивать их либо по левому краю, либо по центру. При необходимости допускается уменьшать размер текста в ячейках до 12pt. Пример оформления таблицы приведён в таблице П1.1.

Таблица П1.1 – Пример оформления таблицы

Имя файла	Размер файла	Дата создания файла
funcs.c	2.3 кБ	11.09.20
user_data.c	4.0 кБ	11.09.20
changes.h	1.7 кБ	11.09.20

П1.5. ССЫЛКИ НА ЛИСТИНГИ И ТАБЛИЦЫ

Так же, как и в случае с рисунками, на каждый листинг должна присутствовать ссылка в тексте, и эта ссылка должна предшествовать появлению листинга в документе. К ссылкам на таблицы предъявляются те же требования, что и к ссылкам на рисунки и листинги.

Приложение 2

Библиотека релейно-контакторных элементов в среде моделирования SimInTech

Внешний вид библиотеки представлен на рис. П2.1.

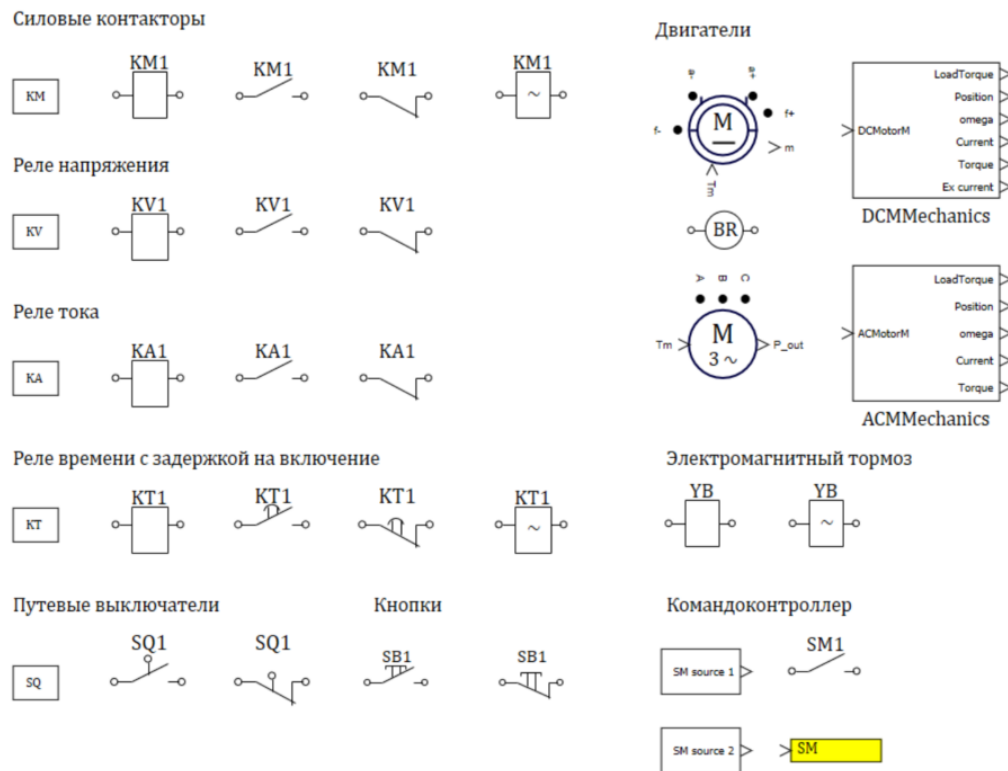


Рисунок П2.1 – Библиотека релейно-контакторных элементов

В левой части расположены контакторы, реле напряжения и тока, реле времени. Каждый из элементов имеет по катушке для включения в цепь постоянного и переменного тока (реле напряжения и тока имеют катушки для включения только в цепь постоянного тока) и нормально замкнутые и нормально разомкнутые контакты. В параметрах элемента задается номер контактора, который может меняться от 0 до 31, и дополнительные параметры, определяющие токи, напряжения или время срабатывания. Катушка с соответствующим номером должна быть одна на схему, а контактов с этим номером может быть неограниченное количество. При использовании соответствующего устройства необходимо скопировать на поле модели из библиотеки элемент памяти, через который происходит «общение» катушки и ее контактов.

Кроме этого, в библиотеке имеются блоки с механикой для асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока, задающие нагрузку для двигателя и реализующие симуляцию поступательного движения привода через заданный радиус приведения. Механическая часть содержит 4

конечных выключателя, которые можно разместить в произвольных точках на дистанции перемещения электропривода. Для работы блоков механики необходимо расположить на поле модели элемент памяти SQ. Пользователю доступны контакты конечных выключателей, блок тахогенератора с настраиваемым коэффициентом преобразования скорости вращения двигателя в напряжение и катушки электромагнитного тормоза постоянного и переменного тока, тормозной момент которого настраивается в соответствующих блоках с механикой.

Для управления электроприводом можно использовать кнопки, которые конфигурируются на включение в определенный момент времени и работу во включенном состоянии заданное время. Если требуется организовать повторное нажатие кнопки, необходимо параллельно ей расположить еще одну кнопку, настроенную на время второго нажатия. В системе присутствует возможность управления от командоконтроллера. На вход элемента памяти командоконтроллера подается сигнал, указывающий номер состояния. Контакты командоконтроллера нумеруются и будут активироваться, если номер состояния совпадает с номером контакта. В библиотеке также присутствует блок, который позволяет формировать сигнал, указывающий номер состояния командоконтроллера, в зависимости от положения рабочего органа механизма. Количество кнопок и контактов командоконтроллера не ограничено.

Для доступа к библиотеке воспользуйтесь QR-кодом ниже.



Приложение 3

Варианты заданий к курсовому проекту по дисциплине «Регулирование координат»

Вариант 1

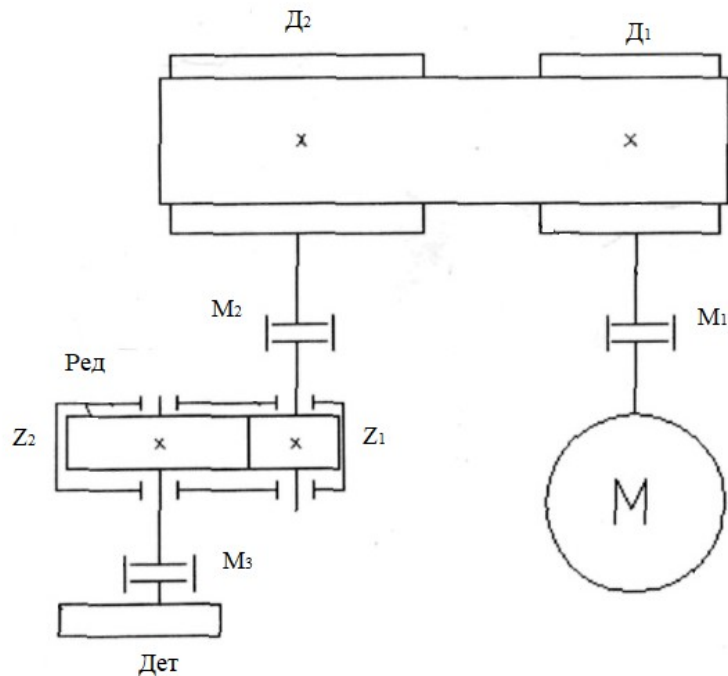


Рисунок ПЗ.1 – Кинематическая схема механизма №1

Таблица ПЗ.1 – Исходные данные механизма №1

Параметр	J_D	J_{M1}	J_{M2}	J_{M3}	D_1	D_2	Z_1	Z_2	J_{D1}	J_{D2}	η	$M_{дет}$
Размерность	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	м	м	-	-	кг·м ²	кг·м ²	-	Н·м
1	1,8	0,1	0,2	0,25	0,2	0,7	18	54	0,3	0,7	0,83	10 ⁴
2	1,2	0,15	0,22	0,3	0,3	0,8	20	64	0,5	1,25	0,85	10 ³
3	1,4	0,12	0,18	0,21	0,5	1	14	54	0,65	1,4	0,86	10 ⁴
4	1,0	0,2	0,22	0,3	0,25	0,6	15	48	0,25	0,95	0,82	10 ³
5	1,3	0,11	0,17	0,28	0,35	0,75	16	42	0,4	1,6	0,8	10 ⁴
6	0,8	0,14	0,16	0,22	0,4	1	22	66	0,7	1,5	0,84	10 ³

Вариант 2

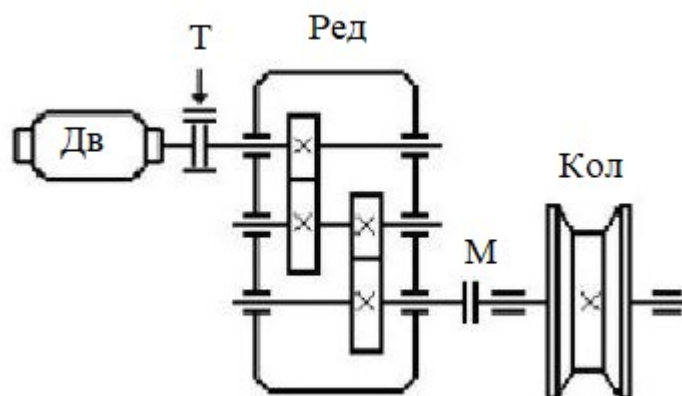


Рисунок П3.2 – Кинематическая схема механизма №2

Таблица П3.2 – Исходные данные механизма №2

Параметр	$J_{Дв}$	J_T	J_{z1}	J_{z2}	J_{z3}	J_{z4}	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	η	$M_{КОЛ}$	$J_{КОЛ}$
Размерность	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	-	-	-	-	-	Н·м	кг·м ²
1	0,5	0,12	0,15	0,25	0,35	0,8	14	48	20	76	0,82	10 ³	2
2	1,8	0,15	0,3	0,5	0,4	0,9	16	84	14	56	0,8	10 ⁴	3,5
3	1,1	0,08	0,2	0,6	0,5	1,2	12	52	18	82	0,84	10 ³	1,5
4	0,8	0,16	0,1	0,2	0,2	0,4	20	48	20	66	0,83	10 ³	5
5	1,3	0,18	0,35	0,9	0,3	1,0	22	76	16	84	0,85	10 ⁴	2,5
6	1,4	0,2	0,25	0,8	0,3	0,95	18	54	12	52	0,86	10 ⁴	6

Вариант 3

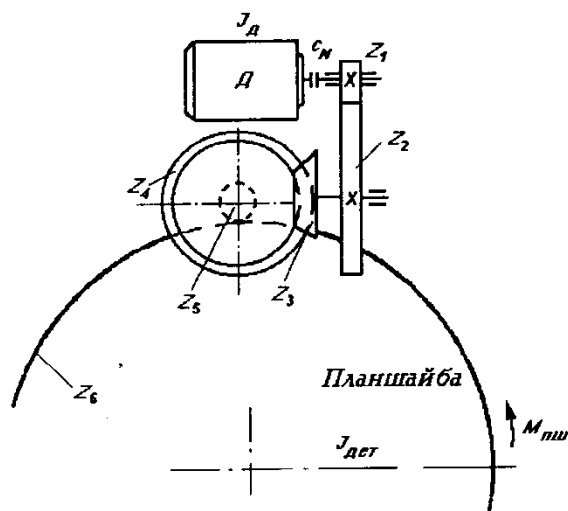


Рисунок ПЗ.3 – Кинематическая схема механизма №3

Таблица ПЗ.3 – Исходные данные механизма №3

Параметр	J_d	$J_{дет}$	$J_{пш}$	C_M	$M_{пш}$	η	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6
Размерность	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	Н·м	Н·м	-	-	-	-	-	-	-
1	1,1	6·10 ⁴	8·10 ³	5·10 ⁴	8·10 ⁴	0,83	20	100	20	50	15	225
2	1,5	7·10 ⁴	9·10 ³	6·10 ⁴	11·10 ⁴	0,85	25	115	25	60	20	300
3	1,0	5·10 ⁴	6·10 ³	3·10 ⁴	7·10 ⁴	0,86	20	100	21	53	14	184
4	1,8	4·10 ⁴	7·10 ³	4·10 ⁴	10·10 ⁴	0,82	25	115	30	65	15	160
5	1,3	8·10 ⁴	5·10 ³	7·10 ⁴	9·10 ⁴	0,8	20	100	35	70	12	102
6	1,4	9·10 ⁴	10·10 ³	8·10 ⁴	12·10 ⁴	0,84	14	92	16	83	16	240

Вариант 5

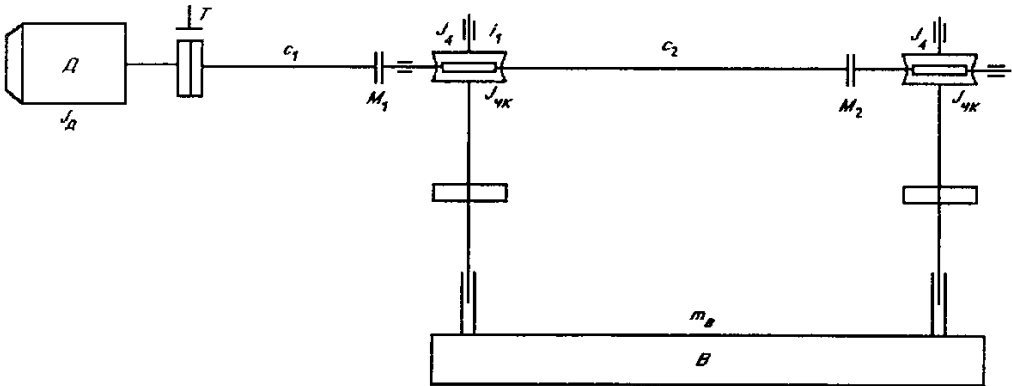


Рисунок ПЗ.5 – Кинематическая схема механизма №5

Таблица ПЗ.5 – Исходные данные механизма №5

Параметр	J_D	J_T	$J_{чк}$	J_4	m_B	i_1	C_1	C_2	C_{M1}	C_{M2}	$n_{дв}$	v_B	η
Размерность	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	т	-	Н·м	Н·м	Н·м	Н·м	об/мин	м/с	-
1	0,46	0,11	0,91	0,07	90	50	$7 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	705	0,038	0,7
2	0,5	0,15	1	0,1	100	60	$6 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	940	0,05	0,8
3	0,4	0,08	0,8	0,08	70	55	$5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	920	0,04	0,75
4	0,6	0,16	1,2	0,1	80	65	$6 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	1370	0,035	0,85
5	0,65	0,18	1,4	0,1	60	50	$5 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	1350	0,045	0,7
6	0,7	0,2	1,5	0,12	90	60	$4 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	930	0,05	0,8

Вариант 6

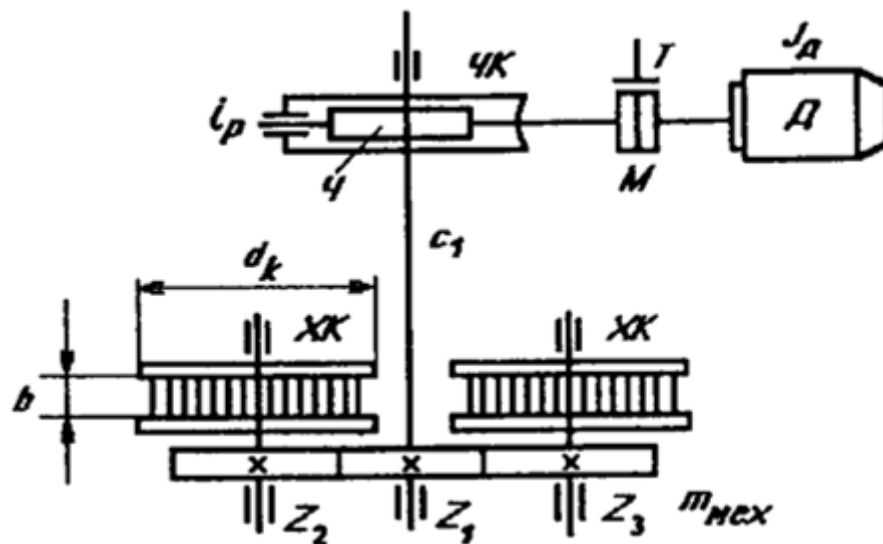


Рисунок ПЗ.6 – Кинематическая схема механизма №6

Таблица ПЗ.6 – Исходные данные механизма №6

Параметр	J_D	J_T	$J_{ЧК}$	$J_ч$	d_k	b	γ_k	C_1	Z_1	Z_2	$m_{мех}$	f_B	μ	i_p
Размерность	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	м	м	кг/м ³	Н·м	-	-	т	м	-	-
1	0,8	0,2	0,98	0,08	0,6	0,07	$7 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^5$	21	53	25	0,008	0,1	50
2	1,0	0,4	1,2	0,1	0,7	0,1	$7 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^5$	30	65	20	0,01	0,1	40
3	1,1	0,5	1,1	0,09	0,6	0,08	$7 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^5$	35	70	20	0,01	0,1	70
4	1,2	0,3	1,0	0,08	0,5	0,08	$7 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^5$	16	64	15	0,012	0,15	60
5	0,7	0,2	1,3	0,09	0,7	0,09	$7 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^5$	20	48	25	0,01	0,15	50

Вариант 7

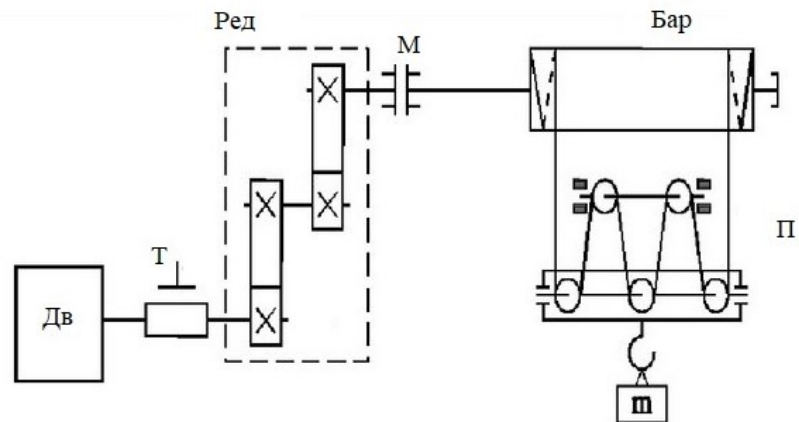


Рисунок ПЗ.7 – Кинематическая схема механизма №7

Таблица ПЗ.7 – Исходные данные механизма №7

Параметр	$J_{ДВ}$	J_T	J_{z1}	J_{z2}	J_{z3}	J_{z4}	$J_{Бар}$	m	$\eta_{пер}$	$n_{дв}$	V_m
Размерность	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	т	-	об/мин	м/с
1	0,3	0,08	0,1	0,2	0,3	0,6	1,5	7	0,8	930	0,1
2	0,4	0,1	0,1	0,3	0,2	0,55	2	10	0,85	1430	0,15
3	0,5	0,15	0,15	0,4	0,3	0,5	2,5	12	0,85	950	0,2
4	0,6	0,2	0,2	0,6	0,2	0,45	1,7	15	0,8	1450	0,08
5	0,7	0,15	0,25	0,7	0,23	0,5	2,2	20	0,83	925	0,125
6	0,55	0,1	0,1	0,5	0,15	0,35	1,6	25	0,81	1440	0,175

Вариант 8

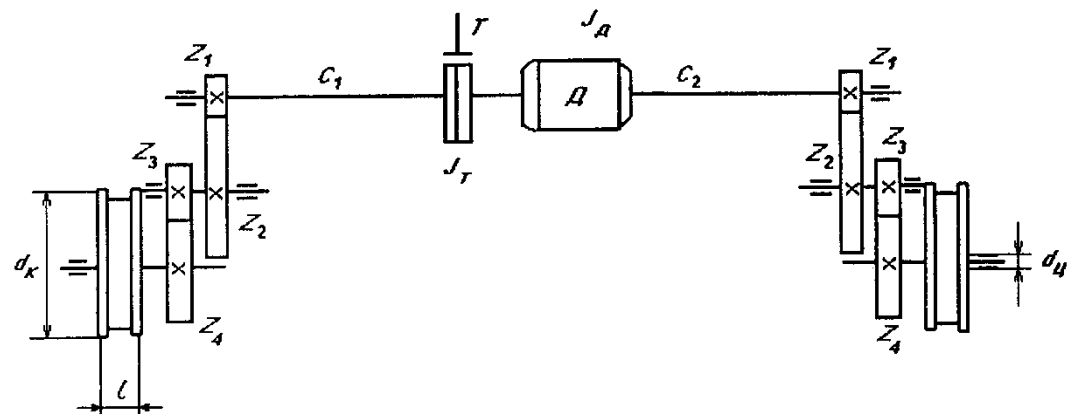


Рисунок П3.8 – Кинематическая схема механизма №8

Таблица П3.8 – Исходные данные механизма №8

Пар.	J_D	J_T	J_{z1}	J_{z2}	J_{z3}	$J_{z4} + J_K$	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	d_k	b	$d_{ц}$	f_K	μ	C_1	C_2	$m_{мех}$
Раз- ть	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	-	-	-	-	м	м	м	м	-	Н·м	Н·м	т
1	1,1	0,2	0,08	1,4	0,076	1,6	20	79	16	83	0,7	0,08	0,1	0,008	0,1	$8 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$	6
2	1,2	0,3	0,1	1,5	0,09	2,0	25	80	20	90	0,6	0,08	0,1	0,01	0,1	$6 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	8
3	1,3	0,4	0,12	1,6	0,1	2,2	28	84	24	98	0,8	0,1	0,1	0,01	0,1	$7 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	10
4	1,0	0,15	0,06	1,2	0,06	1,4	20	79	20	90	0,6	0,08	0,1	0,01	0,1	$6 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$	5
5	1,1	0,1	0,07	1,3	0,08	1,8	16	64	18	84	0,5	0,1	0,1	0,01	0,1	$7 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	7
6	1,2	0,2	0,09	1,7	0,12	2,0	21	72	25	80	0,7	0,1	0,1	0,01	0,1	$5 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	9

Вариант 9

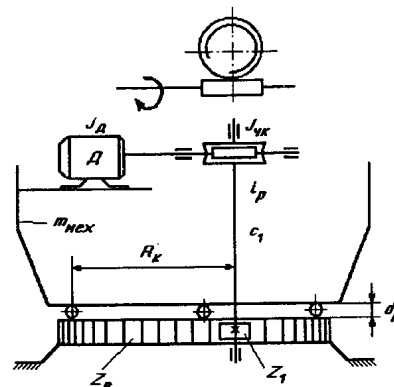


Рисунок ПЗ.9 – Кинематическая схема механизма №9

Таблица ПЗ.9 – Исходные данные механизма №9

Пара-метр	J_D	$J_{\text{ЧК}}$	$J_{\text{Ч}}$	$J_{\text{МЭХ}}$	$i_{\text{РЕД}}$	$\eta_{\text{РЕД}}$	Z_B	Z_1	d_p	R_K	f_K	C_1	$m_{\text{МЭХ}}$
Размер-ность	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	-	-	-	-	м	м	м	Н·м	т
1	0,7	0,2	0,1	$1 \cdot 10^5$	25	0,9	184	14	0,08	2	0,008	$3 \cdot 10^5$	70
2	0,8	0,3	0,1	$1,3 \cdot 10^5$	25	0,8	160	15	0,1	2,5	0,01	$6 \cdot 10^5$	80
3	0,5	0,4	0,2	$1,5 \cdot 10^5$	25	0,7	200	20	0,08	2	0,01	$4 \cdot 10^5$	50
4	0,6	0,45	0,2	$1,8 \cdot 10^5$	30	0,9	115	15	0,1	2,5	0,015	$8 \cdot 10^5$	60
5	0,9	0,5	0,25	$2 \cdot 10^5$	30	0,8	184	16	0,15	2	0,015	$7 \cdot 10^5$	90
6	1,0	0,6	0,25	$2,2 \cdot 10^5$	30	0,7	160	15	0,2	2,5	0,015	$5 \cdot 10^5$	100

Вариант 10

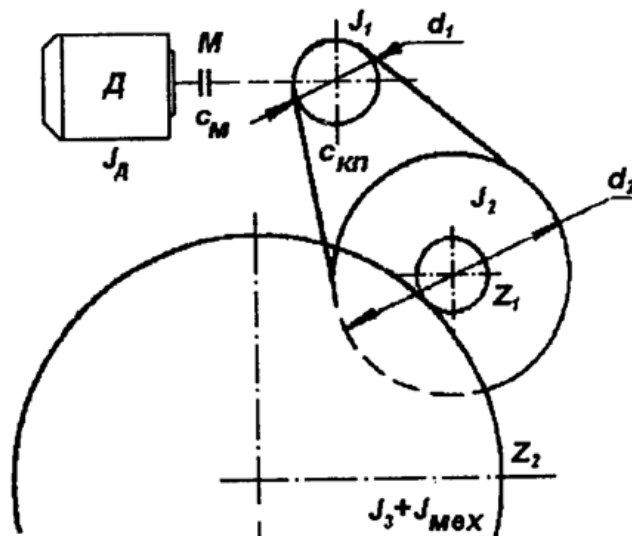


Рисунок П3.10 – Кинематическая схема механизма №10

Таблица П3.10 – Исходные данные механизма №10

Параметр	J_D	J_M	J_1	J_2	$J_3 + J_M$	C_M	$C_{КП}$	d_1	d_2	Z_1	Z_2	$M_{мех}$
Размерность	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ²	Н·м	Н·м	м	м	-	-	Н·м
1	1,1	0,2	0,7	1,8	42	$4 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^5$	0,35	1,2	12	102	800
2	1,5	0,3	0,7	1,5	30	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^5$	0,4	1,6	16	130	900
3	1,0	0,4	0,75	1,7	35	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$	0,4	1,4	14	120	1000
4	1,2	0,1	0,6	1,6	28	$6 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$	0,3	1,2	16	142	600
5	1,3	0,15	0,65	1,9	40	$5 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^5$	0,45	1,5	14	130	700
6	1,4	0,25	0,75	2,0	48	$4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^5$	0,3	1,4	12	120	800

Приложение 4

Титульный лист к пояснительной записке к курсовой работе по дисциплине «Экономика и организация электротехнического производства»



Приложение 4



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский университет
«МЭИ»

Кафедра «Автоматизированного электропривода»

Курсовая работа по дисциплине
«Экономика и организация электротехнического производства»

Тема: **АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**
ПРЕДПРИЯТИЯ «_____» *(в кавычках дается название предприятия)*

Выполнил студент: _____

Руководитель работы: _____

МЭИ
20__

Приложение 5

Проект и библиотека моделей для курсового проекта по дисциплине «Системы управления электроприводов».



Приложение 5. Проект.



Приложение 5. Модели.

Практическое электронное издание

Кураев Николай Михайлович
Благодаров Дмитрий Анатольевич
Ладыгин Анатолий Николаевич
Шпак Дмитрий Михайлович
Савкин Дмитрий Игоревич
Сафонов Юрий Михайлович

Редактор Е. Б. Бурдюкова

При разработке практического электронного издания были использованы: пакет программ Microsoft Office с предустановленным компонентом MathType, векторный графический редактор Visio, а также web-технологии HTML, pdf.

Дата подписания – 11.07.2024

Объем издания – 2,48 МБ

Тираж – 10 электронных оптических дисков CD-ROM

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Москва, Красноказарменная, д. 14, стр.1