

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов
и производств» очной и заочной форм обучения*



Могилев 2026

УДК 658.012.011.56:62-83
ББК 32.965:31.291
С40

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «14» мая 2026 г.,
протокол № 5

Составитель канд. техн. наук, доц. А. С. Коваль

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях изложены необходимые сведения для выполнения лабораторных работ по курсу «Системы управления электроприводами». Предназначены для студентов специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Ответственный за выпуск	А. С. Коваль
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2026

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Изучение релейно-контакторного управления двигателем постоянного тока.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Дискретные логические системы управления на жесткой логике.....	8
3 Лабораторная работа № 3. Исследование однозонной системы подчиненного регулирования скорости электропривода постоянного тока с двигателем постоянного тока независимого возбуждения	15
4 Лабораторная работа № 4. Исследование двухзонной системы регулирования скорости электропривода постоянного тока с двигателем постоянного тока независимого возбуждения	21
5 Лабораторная работа № 5. Исследование системы ТРН-АД.....	27
6 Лабораторная работа № 6. Исследование системы ТПЧ-АД с обратной связью по скорости.....	31
7 Лабораторная работа № 7. Исследование позиционного электропривода.....	36
8 Лабораторная работа № 8. Исследование следящего электропривода...	40
Список литературы.....	47

Введение

Современный автоматизированный электропривод (ЭП) является не только основным энергетическим звеном, обеспечивающим преобразование энергии и совершение механической работы, но и удобным звеном для автоматизации всех отраслей промышленных комплексов.

Особенность систем автоматизированного ЭП состоит в том, что преобразование энергии и регулирование технологических параметров в этом процессе осуществляются в них автоматически, позволяя связать их работу с многоуровневыми компьютерными системами управления, что освобождает человека от необходимости принятия решений по управлению.

Широкое применение быстродействующих регулируемых комплектных систем электропривода на базе традиционных электродвигателей и электродвигателей с новыми конструктивными решениями (двигатели на высокоэнергетичных постоянных магнитах) привело к коренному изменению и упрощению конструкций металлорежущих станков, механизмов и рабочих машин. Происходит резкое повышение технического уровня оборудования.

Данные методические рекомендации ориентированы на закрепление теоретических сведений из курса «Системы управления электроприводами» (СУЭП) и приобретение практических навыков исследования и настройки замкнутых СУЭП различного типа.

1 Лабораторная работа № 1. Изучение релейно-контакторного управления двигателем постоянного тока

Цель работы: изучение релейно-контакторной системы управления (РКСУ) пуском двигателя постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением.

Теоретические сведения

Под термином «релейно-контакторные системы управления» (РКСУ) понимают логические системы управления, построенные на релейно-контакторной элементной базе и предназначенные в том числе для автоматизации работы двигателей. В этом случае непосредственный объект управления для РКСУ – это двигатель, питаемый от сети. Электропривод, выполненный на такой основе, представляет собой нерегулируемый ЭП в основном общепромышленного применения (например, ЭП кранов, тихоходных лифтов, конвейеров, компрессоров, вентиляторов, насосов, некоторых транспортных устройств и т. п.).

С помощью РКСУ автоматизируют следующие операции: включение и отключение двигателя; выбор направления и скорости вращения; пуск и торможение двигателя; создание временных пауз в движении; защитное отключение двигателя и остановка механизма. Данные операции, в том числе, необходимы для выполнения движения рабочего органа механизма по технологическим условиям. Одна из типовых функций, реализуемых РКСУ, – управляемый пуск, например двигателя постоянного тока с контролем его скорости по ЭДС. Контролировать скорость ДПТ через его ЭДС можно благодаря тому, что при постоянном магнитном потоке в якоре возникает ЭДС, пропорциональная частоте вращения якоря. Катушки реле управления этим процессом можно включать на напряжение якоря, превышающее ЭДС только на величину падения напряжения в якоре ($I \cdot R_{\text{я}}$). При определенных значениях напряжения поочередно срабатывает реле контроля ЭДС двигателя, выдавая команды на срабатывание контакторов, выключающих ступени пускового сопротивления. На рисунке 1.1 приведены схема и графики автоматического пуска ДПТ параллельного или независимого возбуждения.

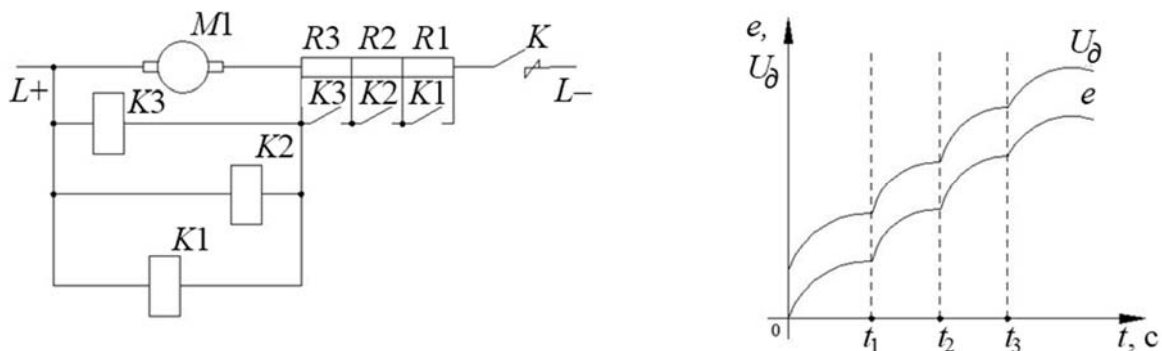


Рисунок 1.1 – Схема пуска и графики пуска двигателя в функции ЭДС

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка, схема электрическая принципиальная которой приведена на рисунке 1.2, позволяет управлять пуском исследуемого двигателя в три ступени и его динамическим торможением. Управление производится в функции ЭДС. Нагрузка на валу исследуемого двигателя $M1$ создается при помощи нагрузочной машины. В якорной цепи двигателя имеются три пусковых реостата $R5-R7$ и сопротивление динамического торможения $R4$. Реле напряжения $KV1-KV3$ позволяют вводить добавочные сопротивления в цепь якоря.

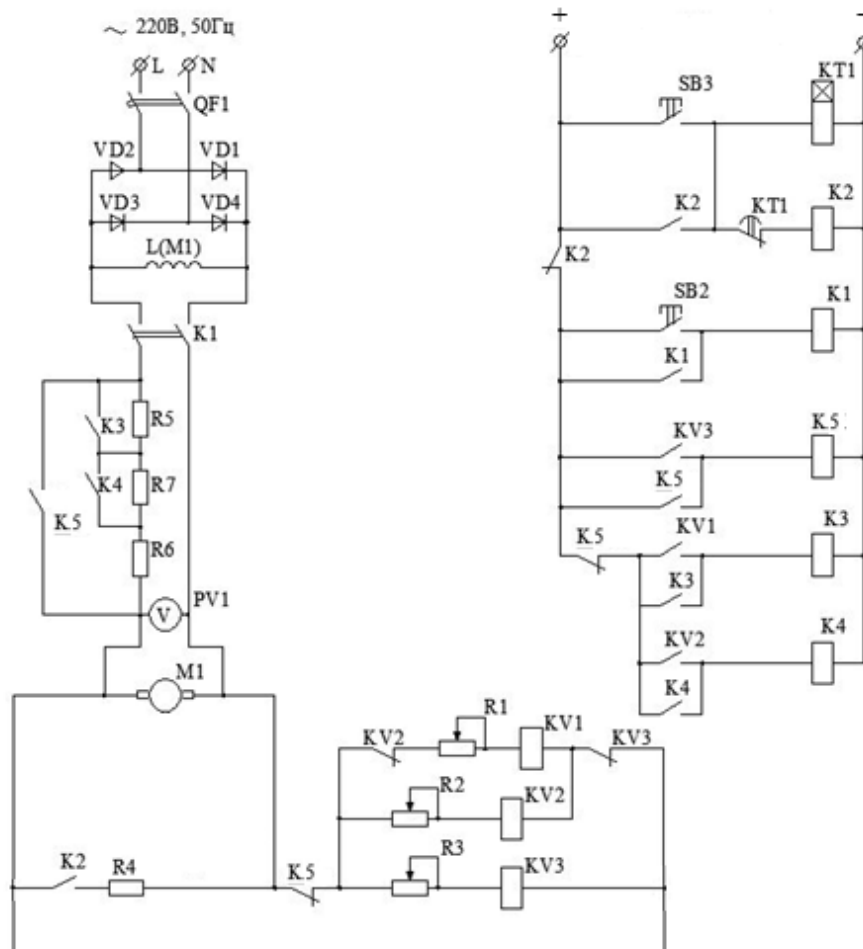
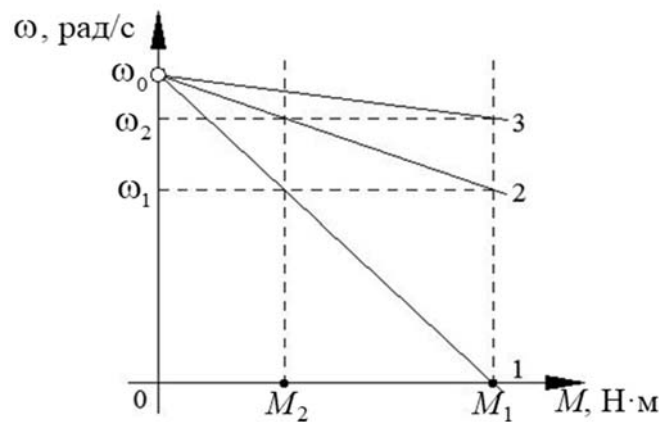


Рисунок 1.2 – Схема электрическая принципиальная лабораторной установки

Резисторы необходимы для ограничения пускового тока. По мере разгона двигателя пусковые резисторы поочередно выводятся. Когда пуск закончится, резисторы будут полностью шунтированы и двигатель перейдет работать на естественную механическую характеристику (рисунок 1.3). При пуске двигатель разгоняется по искусственной характеристике 1, затем по искусственной характеристике 2, а после шунтирования сопротивления – по естественной характеристике 3.

Пуск осуществляется следующим образом. Включаем автоматический выключатель $QF1$, обмотка возбуждения двигателя подключается к источнику

питания. Нажимаем кнопку $SB2$ «Пуск», контактор $K1$ срабатывает и подключает двигатель к источнику питания и начинает работу схема управления пуском в функции ЭДС. Двигатель разгоняется с резисторами $R5-R7$, включенными в цепь якоря двигателя.



ω – угловая скорость вращения; M_1 – пиковый момент двигателя; M_2 – момент переключения

Рисунок 1.3 – Механические и электромеханические характеристики ДПТ параллельного возбуждения при реостатном пуске

При включении контактора $K1$ напряжения на реле $KV1-KV3$ в момент пуска недостаточно для срабатывания. Двигатель работает на характеристике 1 (см. рисунок 1.3).

По мере разгона двигателя (вследствие роста ЭДС двигателя) поочередно срабатывают реле $KV1$, $KV2$ (напряжения срабатывания реле имеют соответствующие значения), тем самым подключая контакторы $K3$, $K4$, которые в свою очередь шунтируют в цепи якоря $R5$, $R7$ соответственно. Двигатель переходит на характеристику 2. Последним срабатывает $KV3$, который шунтирует посредством контактора $K5$ резистор $R6$. Также отключаются $KV1$, $KV2$, $K3$, $K4$ и затем $KV3$. Двигатель выходит на естественную характеристику 3.

Для правильной работы схемы необходимо настроить реле напряжения $KV1$ на срабатывание при ЭДС, соответствующей скорости ω_1 , реле напряжения $KV2$ на срабатывание при скорости ω_2 .

Для перевода двигателя в режим динамического торможения следует нажать кнопку $SB3$ «Стоп», после чего реле $K2$ подключает якорь двигателя на сопротивление динамического торможения. После выдержки времени, осуществляемой $KT1$, $K2$ отключается и двигатель останавливается. Для обесточивания схемы нужно отключить автоматический выключатель $QF1$.

Выполнение лабораторной работы

- 1 Изучить работу электропривода по схеме (см. рисунок 1.2).
- 2 Рассчитать по паспортным данным естественную механическую характеристику двигателя.

3 Построить искусственные механические характеристики при реостатном пуске. Рассчитать время пуска, тормозное и пусковые сопротивления.

4 Разработать имитационную модель электропривода по рисунку 1.2 и смоделировать режим пуска электропривода.

5 Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1 Какие возможны принципы управляемого пуска машины постоянного тока?

2 Какими способами можно контролировать скорость двигателя?

3 Перечислить способы торможения машины постоянного тока и дать им сравнительную характеристику.

4 Чем обуславливается выбор числа ступеней пускового реостата?

5 Как зависит время торможения от величины сопротивления тормозного резистора?

2 Лабораторная работа № 2. Дискретные логические системы управления на жесткой логике

Цель работы: изучение использования карты Карно для проектирования дискретных логических систем управления на жесткой логике на примере схем комбинационных автоматов.

Теоретические сведения

Устройство управления с жёсткой логикой, обрабатывающее входные сигналы датчиков и аппаратов управления и вырабатывающее выходные двоичные управляющие переменные – это дискретный управляющий автомат (дискретный автомат), в отличие от программируемого контроллера – устройства, выполняющего функции дискретного управляющего автомата, но реализованного на программируемой логике. Тогда функциональная схема управления при помощи дискретного автомата может быть представлена приведённой ниже схемой (рисунок 2.1). Если вместо технологического объекта рассматривать электропривод, то это функциональная схема управления электроприводом дискретным автоматом.

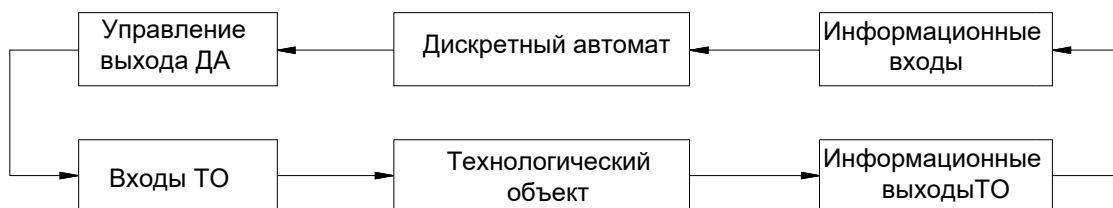


Рисунок 2.1 – Структура управления на основе дискретного автомата

Рассмотрим пример контактной схемы управления, рассматриваемой как дискретный автомат (рисунок 2.2).

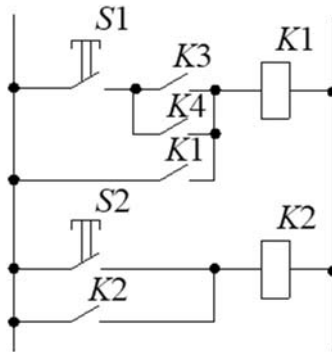


Рисунок 2.2 – Схема управления

Выходами схемы являются промежуточное реле K_1 , K_2 , а входами — кнопки управления S_1 , S_2 . Эта схема управления может быть представлена в виде модели дискретного автомата (рисунок 2.3) и описана логическими функциями: $Z_1 = f_1(a_1, a_2)$, $Z_2 = f_2(a_1, a_2)$.

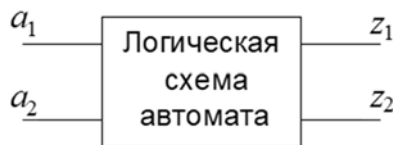


Рисунок 2.3 – Модель дискретного автомата

Здесь условия срабатывания реле K_1 , K_2 представлены как логические функции Z_1 , Z_2 от входных логических переменных a_1 , a_2 , отображающих реальные состояния кнопок S_1 , S_2 , а в качестве логической схемы автомата рассматривается логический алгоритм функционирования реле K_1 , K_2 .

Дискретные управляющие автоматы (ДА) в общем случае могут иметь n -входов и m -выходов. Каждый вход рассматривается как логическая переменная, а каждый выход — как логическая функция от этих переменных. Значения, которые могут принимать логические функции и переменные характеризуется двумя символами: нуль или единица (физически нет напряжения или есть). Для случая нескольких входов (выходов) комбинацию нулевых и единичных значений можно воспринимать двояко:

- как наличие или отсутствие на каждом входе (выходе) задающего или командного сигнала;
- как кодовую комбинацию, обозначающую, например, двоичное число, количество разрядов n которого равно количеству входов (выходов).

В первом случае ДА решает задачи логического анализа ситуации, во втором ДА — это арифметическое устройство, преобразующее информацию путём выполнения арифметических операций над числами.

Все дискретные управляющие автоматы могут быть разделены на две большие группы: комбинационные логические схемы (комбинационные автоматы) и последовательностные логические схемы (дискретные автоматы с памятью) [1].

У комбинационных автоматов состояние выходных логических переменных однозначно зависит от состояния входных переменных на рассматриваемый момент времени. При изменении состояния входов мгновенно изменяется и состояние выхода (при пренебрежении инерционностью элементов схемы).

Дискретные автоматы с памятью – это схемы, у которых состояние выходных логических переменных зависит не только от состояния входных переменных на рассматриваемый момент времени, но определяется и последовательностью входных сигналов, поступивших в предшествующий момент времени.

Логические функции, описывающие работу ДА, могут быть представлены либо в виде дизъюнкции любого числа конъюнкций от входных переменных (дизъюнктивной нормальной формой логической функции (ДНФ)), либо в виде конъюнкции любого числа дизъюнкций (конъюнктивной нормальной формой (КНФ)) [1].

Например ДНФ: $y = bc + \bar{a}c + a\bar{c}$ для логической функции трех переменных.

Например КНФ: $y = a(a + \bar{b})(\bar{b} + \bar{c})(\bar{a} + \bar{c})$ для логической функции трех логических переменных.

Элемент, реализующий логическую функцию, – логический элемент.

Логические функции образуют базис, если с их использованием можно записать любую логическую функцию, а значит, реализовать физически соответствующую схему на этих логических элементах.

Логическая функция И-НЕ (логический элемент И-НЕ) или функция Шеффера образует базис И-НЕ. Логическая функция, представленная в виде ДНФ, может быть записана только через операции И-НЕ (реализована в базисе Шеффера) с учетом закона двойной инверсии или закона *де Моргана*.

Например: $y = \bar{x}_3\bar{x}_2x_4 + \bar{x}_1x_2 + x_3 = \overline{\overline{\bar{x}_3\bar{x}_2x_4 + \bar{x}_1x_2 + x_3}} = \overline{\bar{x}_3\bar{x}_2x_4} \cdot \overline{\bar{x}_1x_2} \cdot \overline{x_3}$.

Этой функции соответствует физическая схема, реализованная только на логических элементах И-НЕ, т. е. реализованная в базисе Шеффера.

Логическая функция ИЛИ-НЕ (функция Вебба) тоже образует базис. Соответственно и логический элемент, реализующий эту функцию, – элемент ИЛИ-НЕ. Логическая функция, представленная в виде КНФ, может быть записана с учетом закона двойной инверсии или закона *де Моргана* и реализована на логических элементах ИЛИ-НЕ (реализована в базисе Вебба).

Например:

$$y = (\bar{x}_3 + x_4 + x_2)(\bar{x}_1 + x_2) = \overline{\overline{(\bar{x}_3 + x_4 + x_2)(\bar{x}_1 + x_2)}} = \overline{(\bar{x}_3 + x_4 + x_2) + (\bar{x}_1 + x_2)}.$$

Логические функции должны быть заданы.

Задание логических функций означает определение ее значений (0 или 1) для всех возможных наборов комбинаций значений ее логических переменных. Логические функции могут быть заданы: таблица истинности, аналитически, с помощью карт Карно. Карта Карно представляет собой таблицу с числом ячеек 2^n по числу наборов значений переменных. Каждая ячейка (клетка) определяется координатами строки и столбца, соответствующими определенному набору значений логических переменных, которые разбиваются на две группы так, что одна группа определяет координаты строки, а другая – столбца. Значения логической переменной, равные 1, указываются чертой над символом логической переменной. Отсутствие черты или отсутствие символа логической переменной означает, что для всех клеток данной строки или столбца соответствующая логическая переменная имеет значение, равное 0. В клетках, положение которых на карте Карно определяется соответствующим набором значений логических переменных, где значение логической функции равно единице или ноль, ставится 1 или 0. Если значение логической функции не определено, то в соответствующей клетке ставится знак тильда ($\sim$). Например, карта Карно для логической функции $y = f(x_1, x_2)$ двух переменных имеет вид

		$\overline{x_2}$	
		0	1
x_1	0	0	0

Для клеток этой строки x_1 имеет значение 0
 Для клеток этой строки x_1 имеет значение 1
 Для клеток этого столбца x_2 имеет значение 1
 Для клеток этого столбца x_2 имеет значение 0

Для логической функции трех переменных $y = f(x_1, x_2, x_3)$ карта Карно имеет вид

			$\overline{x_3}$	
		$\overline{x_2}$		
		1	$\sim$	0
		1	$\sim$	1
x_1	1	1	$\sim$	1
	1	1	$\sim$	0

Для логической функции четырех переменных $y = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ карта Карно имеет вид

				$\overline{x_4}$
			$\overline{x_3}$	
		0	0	0
		0	1	1
		1	1	0
		0	0	1
	x_1	0	0	1
	1	1	1	0
	0	1	1	0
x_2	0	0	1	1

Значение карт Карно заключается и в том, что по ним можно записать логическую функцию в аналитическом виде, причем различной сложности.

Эта функция может быть записана как в классе ДНФ, так и КНФ. Для записи функции в классе ДНФ во внимание принимаются клетки карты Карно,

содержащие единичные значения выхода, в отличие от класса КНФ, где во внимание принимаются клетки, содержащие нулевые значения выхода. Сущность этого способа записи логической функции в аналитическом виде по карте Карно заключается в следующем.

1 Объединяем в прямоугольные контуры соседние клетки, содержащие единицы (единичные контуры при записи функций в ДНФ) или нули (нулевые контуры при записи функции в КНФ). Число клеток в контуре должно быть равно 2^n , где $n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$, т. е. число клеток выражается числами 1, 2, 4, 8, 16, ... Одна и та же единица (или нуль) может входить в несколько единичных (нулевых) контуров.

2 ДНФ записывается в виде дизъюнкции конъюнкций, соответствующих каждому из единичных контуров, выделенных на карте Карно. КНФ записывается аналогично, но в виде конъюнкции дизъюнкций, соответствующих нулевым контурам. При этом конъюнкция для каждого единичного контура образуется логическими переменными (координатами строк и столбцов), которые не меняют своего значения для всех клеток, образующих единичный контур. Причем, если значение рассматриваемой логической переменной равно 0, то в записи конъюнкции эта переменная участвует с инверсией; если же значение логической переменной равно 1, то в записи эта переменная берется без инверсий. Соответственно дизъюнкция для каждого нулевого контура записывается аналогично, но если значение логической переменной в координате было равно 1, то переменная берется с инверсией, а если – 0, то без инверсии.

3 Если в карте Карно присутствуют клетки со знаком «~», то вместо «~» можно рассматривать либо значение 1 (для функций в классе ДНФ), либо значение 0 (для функций в классе КНФ), но только в тех случаях, когда эти клетки позволят сформировать единичный (нулевой) контур большего размера, либо контур, который охватывает клетки с 1 (0), ранее не включенные ни в один контур.

4 При построении контуров из соседних клеток целесообразно строить их таким образом, чтобы они охватывали возможно большее число соседних клеток, содержащих 1(0). При этом количество самих контуров должно быть наименьшим. В этом случае получаемые выражения ДНФ или КНФ более просты, т. е. содержат наименьшее число вхождение логических переменных в выражении полученных функций. В этом смысл минимизации логической функции с помощью карты Карно.

Пусть логическая функция задана картой Карно (рисунок 2.4).

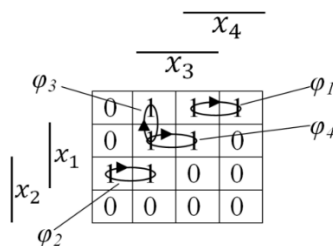


Рисунок 2.4 – Карта Карно

Получим аналитическое выражение этой функции в ДНФ и КНФ. Получим выражение функции в классе ДНФ. Во внимание принимаем соседние клетки, в которых функция имеет значение 1. Эти клетки объединяем в контуры φ_1 , φ_2 , φ_3 , φ_4 из двух клеток каждый. Конъюнкция, соответствующая контуру φ_1 , имеет вид $\overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_4$; контуру $\varphi_2 \rightarrow x_2 \cdot x_1 \cdot \overline{x_4}$; контуру $\varphi_3 \rightarrow \overline{x_2} \cdot x_3 \cdot \overline{x_4}$; контуру $\varphi_4 \rightarrow x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot x_3$. Тогда выражение логической функции имеет вид $y = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_4 + x_2 \cdot x_1 \cdot \overline{x_4} + \overline{x_2} \cdot x_3 \cdot \overline{x_4} + x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot x_3$.

Для получения минимально возможного выражения для этой функции в классе ДНФ контура выберем иначе (рисунок 2.5). В соответствии с правилом минимизации число контуров должно быть наименьшим, а число клеток в них наибольшим.

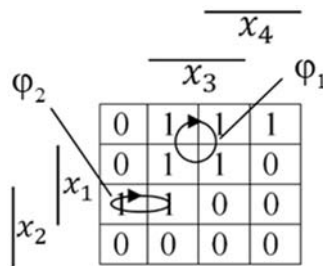


Рисунок 2.5 – Минимизация функции в классе ДНФ

Тогда контуру φ_1 соответствует конъюнкция $x_3 \cdot \overline{x_2}$, а контуру $\varphi_2 \rightarrow x_2 \cdot x_1 \cdot \overline{x_4}$. Выражение минимизированной логической функции в классе ДНФ заданной картой Карно (см. рисунок 2.5) имеет вид $y = \overline{x_2} \cdot x_3 + x_2 \cdot x_1 \cdot \overline{x_4}$.

Аналогичный подход для записи минимизированной логической функции (рисунок 2.6), но в классе КНФ. Минимизированная функция имеет вид $y_1 = (\overline{x_2} + x_1) \cdot (\overline{x_2} + x_4) \cdot (\overline{x_1} + \overline{x_4} + x_3) + (x_2 + x_3 + x_4)$.

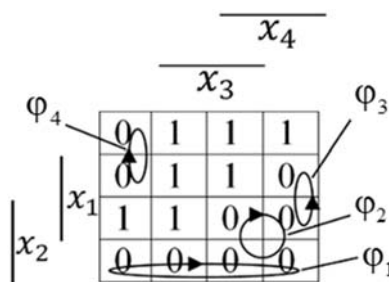


Рисунок 2.6 – Минимизация функции в классе КНФ

Эти функции могут быть реализованы, соответственно, либо в базе Шеффера, либо Вебба или на контактных аппаратах в базисе ИЛИ, И, НЕ.

Например, есть функция в виде КНФ. Приведем ее к записи в базисе Вебба.

$$y = (\overline{x_3} + x_4 + x_2)(\overline{x_1} + x_2) = \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_3} + x_4 + x_2}}}}(\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_1} + x_2}}}}) = \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_3} + x_4 + x_2}}}} + \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_1} + x_2}}}}.$$

Задать эти функции в виде карт Карно и записать любую функцию в виде КНФ и ДНФ.

2 Минимизировать функции, полученные по п. 1 в классе КНФ и ДНФ.

3 Выбрать базис (ИЛИ-НЕ или И-НЕ) и представить функции, полученные по п. 2, в этих базисах и разработать принципиальную схему реализации этих функций в выбранном базисе.

4 Функции, полученные в п. 3, реализовать на логических микросхемах и проверить, используя осциллограф, тождественность функций таблице истинности по п. 1.

Контрольные вопросы

1 Что такое карта Карно?

2 Сформулируйте порядок получения функции в аналитическом виде в классе функций ДНФ и КНФ по заданной карте Карно.

3 Порядок минимизации логической функции, заданной картой Карно.

4 Приведите пример минимизации логической функции с использованием карты Карно.

3 Лабораторная работа № 3. Исследование однозонной системы подчиненного регулирования скорости электропривода постоянного тока с двигателем постоянного тока независимого возбуждения

Цель работы: изучение методики расчета регуляторов для однозонной системы подчиненного регулирования скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения и исследование получаемых показателей качества переходных режимов.

Теоретические сведения

Функциональная схема электропривода по системе УВ-ДПТ НВ (при однозонном регулировании скорости) представлена на рисунке 3.1.

Система автоматического регулирования (САР) электропривода использует принцип последовательной коррекции или подчиненного регулирования [2, 3], в соответствии с которым в схеме САР (см. рисунок 3.1) выделяют следующие контуры: внутренний контур тока якоря (датчик тока ДТ и ПИ-регулятор тока РТ), внешний контур скорости (датчик скорости – тахогенератор ТГ и П-регулятор скорости РС). Выход регулятора скорости формирует сигнал задания для регулятора тока. Настройка регуляторов в этих контурах осуществляется поэтапно, начиная с контура тока якоря, исходя из требований к динамике объекта регулирования.

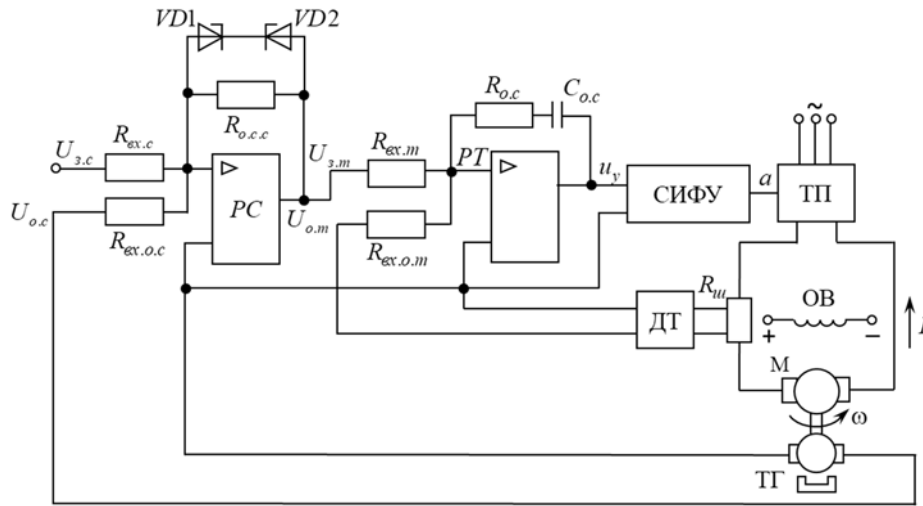


Рисунок 3.1 – Функциональная схема электропривода

Подчиненное регулирование с настройкой контуров на технический или симметричный оптимум позволяет реализовать системы автоматического регулирования с увеличением их быстродействия и повышением жесткости механических характеристик получаемого электропривода.

Структурная схема электропривода с внутренним контуром регулирования тока якоря представлена на рисунке 3.2, который при необходимости преобразуется в контур регулирования момента умножением сигнала тока на постоянную конструктивную величину C .

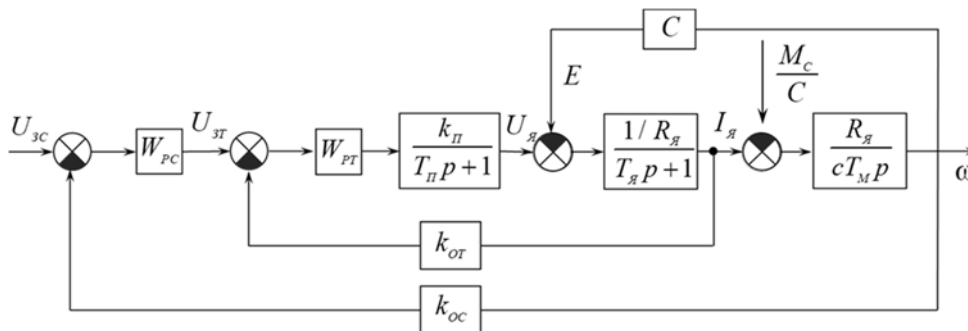


Рисунок 3.2 – Структурная схема электропривода с подчиненным регулированием координат

Тиристорный управляемый выпрямитель привода постоянного тока, работающий в режиме непрерывного тока, как звено системы автоматического управления с достаточной точностью можно представить как апериодическое звено [3]:

$$W_{\text{ТП}}(p) = \frac{k_{\text{П}}}{T_{\text{П}}p + 1}.$$

Постоянная времени $T_{\text{П}}$ выпрямителя может быть упрощенно определена:

$$T_{\text{П}} = \frac{1}{2 \cdot f_{\text{сети}} \cdot m_{\text{В}}},$$

где $f_{сети}$ – частота сети;

m_B – число фаз выпрямления.

Структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при общепринятых допущениях имеет вид, представленный на рисунке 3.3. Расчет параметров двигателя в этой структурной схеме приведен в [3, 4].

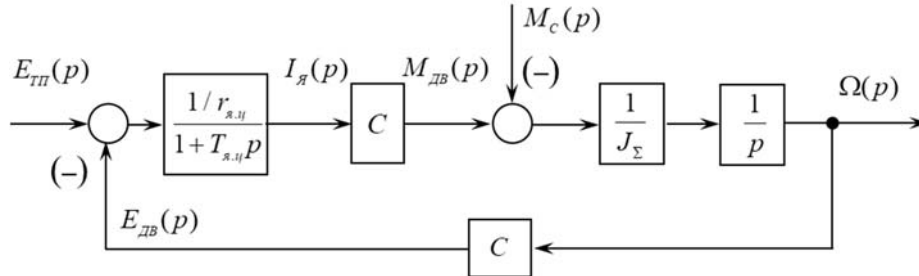


Рисунок 3.3 – Структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Структурная схема электропривода с обратными связями по току якоря и скорости на основе схемы двигателя (см. рисунок 3.3) показана на рисунке 3.4.

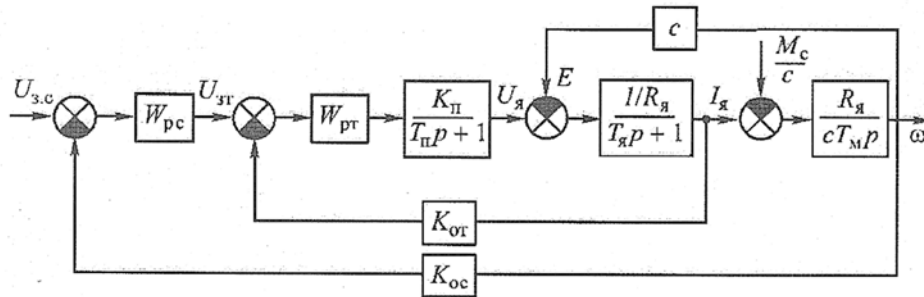


Рисунок 3.4 – Структурная схема электропривода с обратной связью по скорости и внутренним контуром регулирования тока якоря

Определение передаточных функций регуляторов тока и скорости осуществляется следующим образом [2, 3].

Выбирается желаемая передаточная функция соответствующего разомкнутого контура в соответствии с критерием оптимизации. При настройке, например, на технический оптимум желаемая передаточная функция разомкнутого контура регулирования имеет вид

$$W(P)_{ЖМО} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} p \cdot (T_{\mu} p + 1)},$$

где T_{μ} – малая некомпенсируемая постоянная времени (принимается равной $T_{п}$).

При настройке на симметричный оптимум желаемая передаточная функция

$$W(P)_{ЖСО} = \frac{1}{T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)} \cdot \frac{4T_{\mu} \cdot p + 1}{8T_{\mu} \cdot p}.$$

Затем рассчитываются передаточные функции регуляторов и их параметры.

Применительно к схеме (см. рисунок 3.4) расчет регуляторов начинается с внутреннего контура регулирования тока якоря (рисунок 3.5).

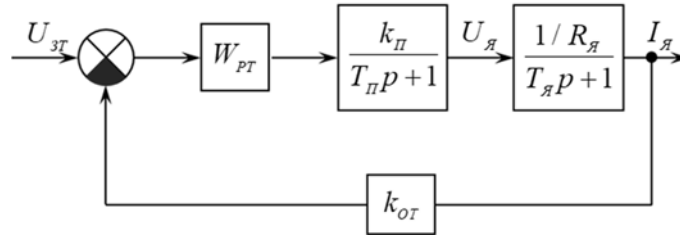


Рисунок 3.5 – Контур регулирования тока якоря

Передаточная функция разомкнутого контура регулирования тока с неизвестной передаточной функцией регулятора тока $W_{PT}(p)$ имеет вид

$$W_{KT}(p) = W_{PT}(p) \cdot \frac{k_{\Pi}}{1 + T_{\Pi} \cdot p} \cdot \frac{1}{\frac{R_{\text{я}}}{T_{\text{я}} \cdot p + 1}} \cdot k_{OT}.$$

Искомая передаточная функция регулятора тока (при настройке на технический оптимум) находится следующим образом:

$$W_{PT}(p) = \frac{W_{\text{ж}}}{W_{KT}} = \frac{\frac{1}{2 \cdot T_{\Pi} \cdot p \cdot (T_{\Pi} \cdot p + 1)}}{\frac{k_{\Pi}}{1 + T_{\Pi} p} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{T_{\text{я}} p + 1} \cdot k_{OT}} = \frac{(T_{\text{я}} p + 1) \cdot R_{\text{я}}}{2 \cdot T_{\Pi} \cdot p \cdot k_{\Pi} \cdot k_{OT}}.$$

Это ПИ-регулятор тока. Изменение регулируемой координаты при такой настройке (в общем случае: y – выходная координата, x – входная) при подаче единичного сигнала на вход показано на рисунке 3.6.

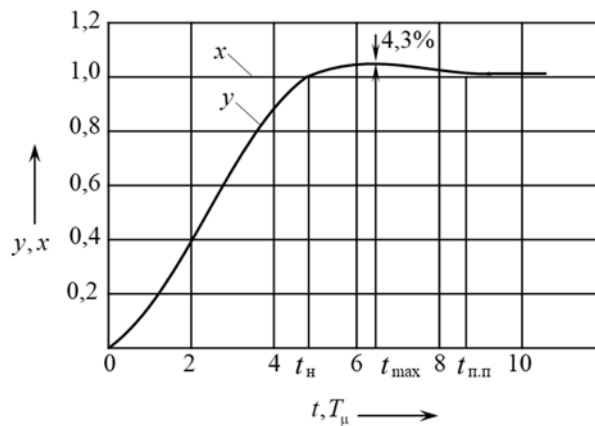


Рисунок 3.6 – Переходный процесс в контуре при настройке на технический оптимум

Для определения передаточной функции регулятора скорости сворачиваем замкнутый контур тока с учетом полученной передаточной функции регулятора тока. Учитывая, что передаточная функция разомкнутого контура тока соответствует желаемой передаточной функции, получаем передаточную функцию замкнутого контура тока в следующем виде (пренебрегая в виду малости величиной T_{II}^2):

$$W_{KT}(p) = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot T_{II} \cdot p \cdot (T_{II} \cdot p + 1)}{2 \cdot T_{II} \cdot p \cdot (T_{II} \cdot p + 1)}} = \frac{1}{2 \cdot T_{II} \cdot p (T_{II} \cdot p + 1) + 1} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot T_{II}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{II} \cdot p + 1} = \frac{1}{2 \cdot T_{II} \cdot p + 1}.$$

Структурная схема САУ электропривода приобретает вид, представленный на рисунке 3.7.

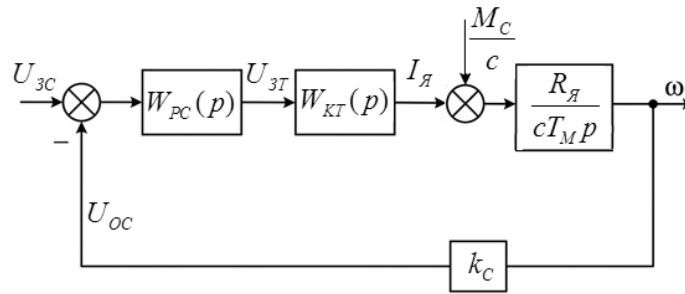


Рисунок 3.7 – Структурная схема регулирования скорости

Задаемся настройкой контура скорости, например тоже на технический оптимум. В этом случае передаточная функция разомкнутого контура регулирования скорости с неизвестной передаточной функцией регулятора скорости имеет вид

$$W_{KC}(p) = W_{PC}(p) \cdot \frac{1}{1 + 2T_{II} \cdot p} \cdot \frac{R_{я}}{T_M \cdot p} \cdot k_c.$$

Определяем требуемую передаточную функцию регулятора скорости:

$$W_{PC}(p) = \frac{W_{Ж}}{W_{KC}} = \frac{1}{\frac{1}{1 + T_{II} p} \cdot \frac{R_{я}}{c \cdot T_M p} \cdot k_c} = \frac{c \cdot T_M}{2 \cdot T_{II} \cdot k_c R_{я}}.$$

При настройке контура скорости на симметричный оптимум желаемая передаточная функция разомкнутого контура скорости имеет вид

$$W(P)_{ЖСО} = \frac{1}{T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)} \frac{4T_{\mu} \cdot p + 1}{8T_{\mu} \cdot p},$$

где $T_{\mu} = 2T_{II}$.

Расчет передаточной функции регулятора скорости аналогичен. Передаточная функция регулятора скорости в этом случае (при настройке контура тока на технический оптимум) получается в виде передаточной функции ПИ-регулятора:

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

где $K_{PC} = \frac{T_M}{2 \cdot T_{II} \cdot R_{Я} \cdot k_c}$; $T_{PC} = \frac{16T_{II}^2 R_{Я} k_c}{T_M}$.

Характер переходных процессов при такой настройке показан на рисунке 3.8.

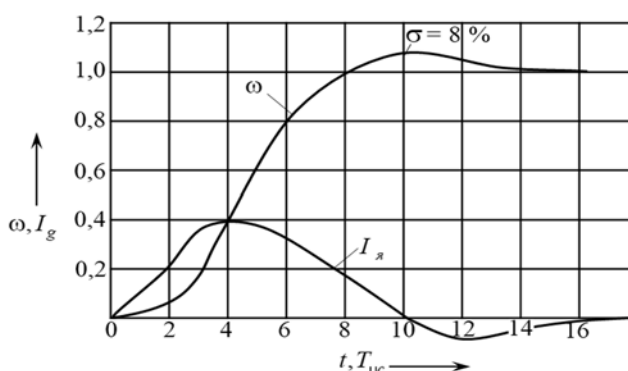


Рисунок 3.8 – Переходные режимы в контуре скорости

Выполнение лабораторной работы

- 1 Изучить работу электропривода по функциональной схеме (см. рисунок 3.1).
- 2 Для заданного двигателя и настроек контуров рассчитать передаточные функции регуляторов тока и скорости.
- 3 Разработать имитационную модель электропривода с рассчитанными регуляторами и исследовать на модели показатели качества в переходных режимах разработанного электропривода.
- 4 Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Принцип подчиненного регулирования параметров в электроприводе.
- 2 Что такое технический оптимум?

3 Что такое симметричный оптимум?

4 Как понимаете термин «желаемая передаточная функция при настройке системы»?

5 Порядок расчета регуляторов в системе подчиненного регулирования.

4 Лабораторная работа № 4. Исследование двухзонной системы регулирования скорости электропривода постоянного тока с двигателем постоянного тока независимого возбуждения

Цель работы: изучение методики расчета регуляторов для двухзонной системы подчиненного регулирования скорости ДПТ НВ и исследование на моделях получаемых показателей качества переходных режимов.

Теоретические сведения

Для электроприводов, в которых управление скоростью осуществляется как изменением напряжения на якоре, так и изменением потока возбуждения, применяется система двухзонного регулирования. Такая система состоит из двух связанных между собой систем: системы регулирования скорости и системы регулирования ЭДС, управляющей возбуждением двигателя. Регулирование скорости электродвигателя в диапазоне от нуля до основной осуществляется первой системой только путем изменения напряжения на якоре, а вторая система при этом поддерживает поток возбуждения, равным номинальному. В диапазоне выше основной скорости регулирование осуществляется изменением потока возбуждения при номинальном напряжении или ЭДС двигателя. Автоматическое разделение указанных двух зон регулирования наилучшим образом выполняется в системах электропривода с зависимым управлением потоком возбуждения электродвигателя, в которых регулирование потока осуществляется в функции связующего параметра – напряжения или ЭДС двигателя. Управление электроприводом с зависимым управлением потоком возбуждения двигателя осуществляется изменением лишь одного общего сигнала задания скорости, в отличие от систем электропривода с независимым управлением потоком, где управление осуществляется изменением сигнала задания ЭДС двигателя и сигнала задания потока, а для разделения зон регулирования имеются узлы разделения режимов. При выборе связующего параметра обычно используют ЭДС двигателя [2].

Функциональная схема управления возбуждением электропривода с двухзонным регулированием скорости приведена на рисунке 4.1.

На вход регулятора ЭДС РЭ подается постоянный ведущий сигнал, соответствующий номинальному значению ЭДС двигателя. На выходе РЭ включен блок БО, линеаризующий контур регулирования ЭДС и ограничивающий выходной сигнал на уровне, соответствующем заданию номинального потока возбуждения. Поэтому при скорости электродвигателя ниже основной, когда

ЭДС двигателя ниже номинальной, выходное напряжение БО и, следовательно, поток возбуждения двигателя не зависят от величины скорости.

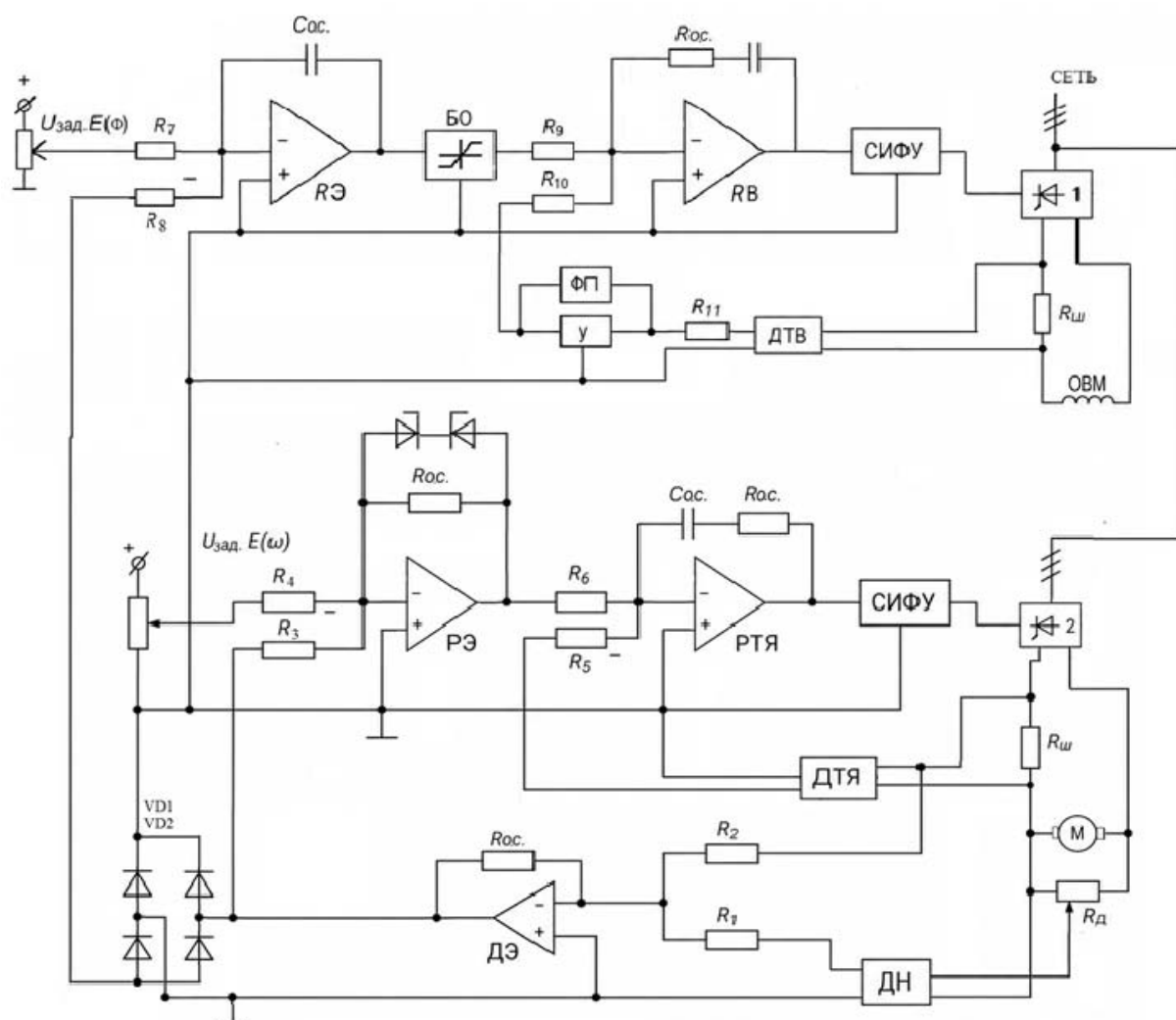


Рисунок 4.1 – Функциональная схема двухзонного электропривода

При сигнале задания скорости выше значения, соответствующего основной, увеличение ее от нуля до основной осуществляется за счет увеличения напряжения на якоре электродвигателя при постоянном потоке возбуждения и сопровождается возрастанием ЭДС до номинальной. При достижении основной скорости первая система будет стремиться увеличить ЭДС двигателя выше номинального значения, вследствие чего РЭ второй системы будет давать задание на ослабление потока возбуждения до тех пор, пока не будет достигнуто заданное значение скорости и сигнал задания не уравнивается сигналом обратной связи по скорости. При разгоне во второй зоне ЭДС поддерживается приблизительно равной номинальной. В установившемся режиме за счет регулятора (астатический ПИ-регулятор) ЭДС двигателя равна номинальной, а поток возбуждения поддерживается на уровне, обеспечивающем заданное значение скорости.

В режиме торможения сначала работает вторая система, усиливая поток возбуждения электродвигателя до номинальной величины, и лишь после этого

вступает в действие первая, снижая напряжение на двигателе.

На рисунке 4.2 приведена схема замещения цепи возбуждения электродвигателя при учете действия вихревых токов [2], из которой следует:

$$I_B(p) = \frac{E_B - pL_B I_\mu}{pL_S + R_{BD}} = \frac{E_B - pR_{BD}T_B I_\mu}{R_{BD}(pT_S + 1)}, \quad (4.1)$$

где $T_B = \frac{L_B}{R_{BD}}; T_S = \frac{L_S}{R_{BD}}.$

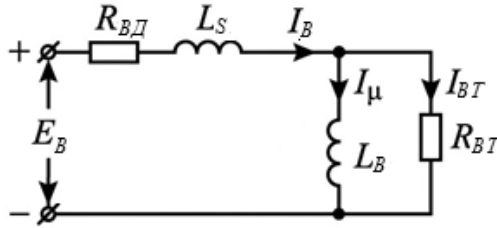


Рисунок 4.2 – Схема замещения цепи возбуждения

Поток двигателя Φ связан с током I_μ соотношением

$$\Phi = K_\phi I_\mu, \quad (4.2)$$

где $K_\phi I_\mu = \frac{d\Phi}{dI_\mu}.$

Структурная схема цепи возбуждения (рисунок 4.3).

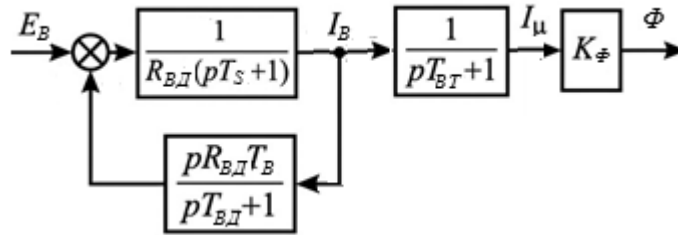


Рисунок 4.3 – Структурная схема цепи возбуждения

Передаточная функция по управляющему воздействию относительно тока возбуждения:

$$W_{I_B/E_B}(p) = \frac{I_B(p)}{E_B(p)} = \frac{pT_{BT} + 1}{R_{BD} \cdot (p^2 T_S T_{BT} + pT_{BS} + 1)}, \quad (4.3)$$

где $T_{BS} = T_{BT} + T_S + T_B.$

Если в (4.3) пренебречь членом $p^2 T_{\Sigma} T_{BT}$, то получим упрощенное выражение

$$W_{I_B/E_B}(p) = \frac{pT_{B\Sigma} + 1}{R_{BД}(pT_{B\Sigma} + 1)}. \quad (4.4)$$

Упрощенная структурная схема цепи возбуждения показана на рисунке 4.4.

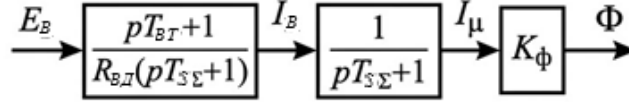


Рисунок 4.4 – Упрощенная структурная схема цепи возбуждения

Структурная схема всей системы двухзонного регулирования скорости вращения электродвигателя с зависимым управлением потоком возбуждения показана на рисунке 4.5.

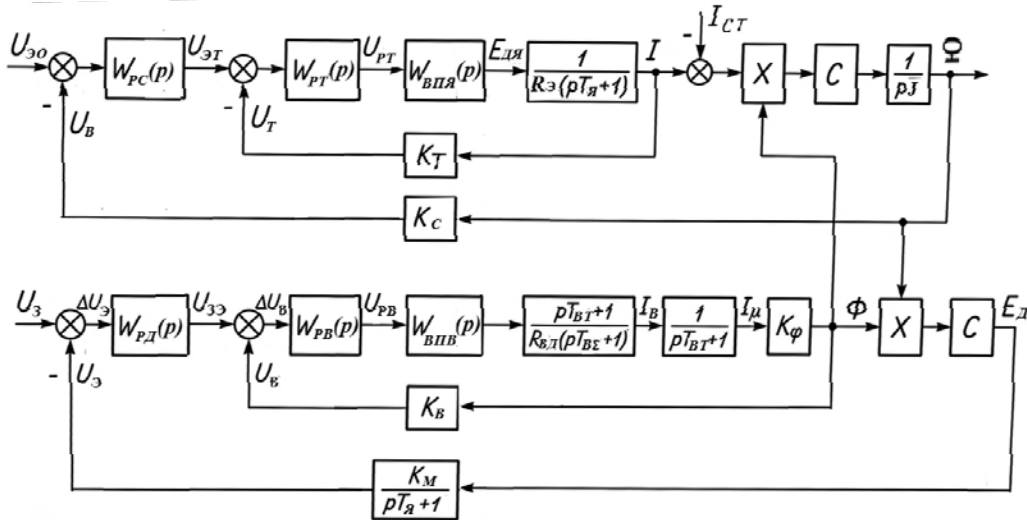


Рисунок 4.5 – Структурная схема электропривода с двухзонным регулированием

По этой схеме можно определить E_{Σ} :

$$E_{\Sigma} = c\Phi\Omega = cI_B \frac{K_{\Phi}}{pT_{BT} + 1} \Omega.$$

Вторая система, управляющая возбуждением двигателя, имеет два контура регулирования: внутренний подчиненный контур регулирования потока возбуждения и внешний контур регулирования ЭДС.

Непосредственное измерение потока возбуждения электродвигателя для получения сигнала обратной связи по потоку затруднительно, поэтому сигнал, пропорциональный потоку, обычно получают косвенным способом, измеряя ток возбуждения I_B , т. е. на структурной схеме рисунке 4.6 подключение цепи обратной связи переносят из точки с параметром Φ в точку с параметром I_B .

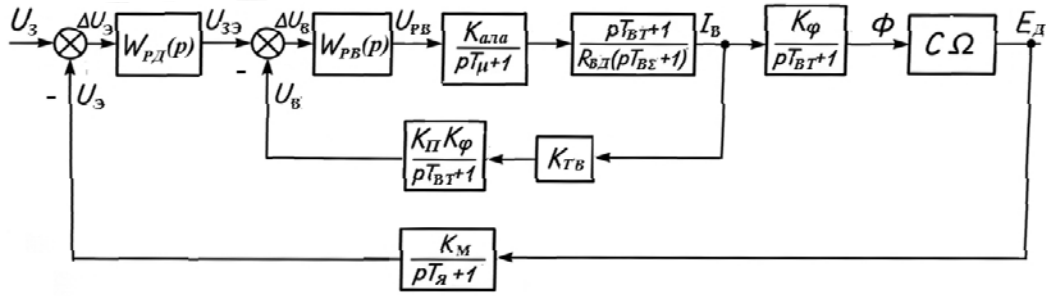


Рисунок 4.6 – Преобразованная структурная схема электропривода

На рисунке 4.6 представлена структурная схема управления возбуждением электропривода с двухзонным регулированием скорости, в канале обратной связи контура регулирования потока возбуждения имеется нелинейное инерционное звено с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{K_{\Pi} \cdot K_{\Phi}}{T_{BT} \cdot p + 1},$$

где K_{Π} – коэффициент передачи датчика потока.

Коэффициент K_{Φ} определяется по кривой намагничивания $\Phi(I_{\mu})$ для конкретного двигателя.

Воспроизводить эту зависимость $K_{\Phi} = \Phi(I_{\mu})$ можно, включив функциональный преобразователь в цепь обратной связи. При его отсутствии настройка регулятора возбуждения будет соответствовать только одному значению потока возбуждения и только одной скорости двигателя.

Регуляторы контура регулирования скорости электропривода настраиваются исходя из выбранного оптимума. Для контура регулирования потока возбуждения рассмотрим этот процесс более подробно.

Передаточная функция разомкнутого контура регулирования потока возбуждения, приравненная желаемой передаточной функции:

$$W_{B_{раз}}(p) = W_{PB} \frac{K_{BПВ}}{(T_{BПВ} \cdot p + 1)} \frac{K_{\Phi}}{R_{ВД}(pT_{BS} + 1)} K_B = \frac{1}{pT_{\mu}(pT_{\mu} + 1)}. \quad (4.6)$$

Здесь $W(p) = \frac{K_{BПВ}}{pT_{BПВ} + 1}$ описывает управляемый выпрямитель в цепи питания обмотки возбуждения.

При использовании в контуре возбуждения настройки по модульному оптимуму и выборе некомпенсированной постоянной времени $T_{\mu} = T_{BПВ}$, получаем ПИ-регулятор потока возбуждения с передаточной функцией.

$$W_{PB}(p) = \frac{R_{ВД}(pT_{BS} + 1)}{pT_{\mu}K_{BПВ}K_{\Phi}K_B}, \quad (4.7)$$

где R_{BD} – сопротивление цепи возбуждения электродвигателя;

$$T_{B\Sigma} = T_B + T_{BT};$$

T_B – электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения;

T_{BT} – постоянная времени вихревых токов;

$K_{BПВ}$ – коэффициент усиления управляемого выпрямителя в цепи возбуждения с СИФУ;

K_Φ – коэффициент наклона кривой намагничивания электродвигателя;

K_B – коэффициент передачи обратной связи по потоку.

В контуре регулирования ЭДС в качестве регулятора ЭДС (РЭ) можно использовать И-регулятор с передаточной функцией

$$W_{pэ}(p) = \frac{K_\Pi K_{TB}}{pa_э(T_{\muэ} + T_Я)c\Omega K_M}, \quad (4.8)$$

где $T_{\muэ} = a_B T_\mu$.

Эта передаточная функция зависит от скорости. Вследствие этого при выбранных постоянных параметрах РЭ настройка контура будет оптимальной лишь при одном (выборочном) значении Ω .

Для линеаризации контура регулирования ЭДС, обеспечивающего сохранение оптимальной настройки во всем диапазоне скоростей, необходимо последовательно с РЭ включить звено $\frac{1}{\Omega} = \frac{c\Phi}{E_{дн}}$, где $E_{дн}$ – номинальная ЭДС двигателя, поддерживаемая неизменной в диапазоне скоростей выше основной.

Из структурной схемы:

$$\frac{1}{\Omega} = \frac{cU_B}{E_{дн}K_\Pi K_{TB}};$$

$$W_{pэ}(p) = \frac{K_\Pi K_{TB}}{pa_э(T_{\muэ} + T_Я)cK_H} \frac{1}{\Omega} = \frac{1}{pa_э(T_{\muэ} + T_Я)K_H E_{дн}} U_B = W'_{pэ} U_B. \quad (4.9)$$

При регулировании потока возбуждения электродвигателя контур регулирования скорости зависит от потока, т. к. $\frac{R_э}{pT_M c\Phi} = \frac{c\Phi}{pJ}$.

При выбранных постоянных параметрах регулятора скорости РС настройка контура будет оптимальной лишь при одном (настроечном) значении Φ . В тех случаях, когда диапазон регулирования скорости электродвигателя ослаблением потока возбуждения достаточно велик, контур регулирования скорости линеаризуют путем включения последовательно с РС звена, компенсирующего изменение Φ . Для компенсации изменения Φ необходимо умножить выходной сигнал

РС на сигнал, пропорциональный $\frac{1}{\varphi} = \frac{c\Omega}{E_d}$.

Выполнение лабораторной работы

- 1 Изучить работу электропривода по функциональной схеме (см. рисунок 4.1).
- 2 Для заданного двигателя и настроек контуров рассчитать передаточные функции регуляторов тока, скорости и ЭДС.
- 3 Разработать имитационную модель электропривода с рассчитанными регуляторами и исследовать на модели показатели качества в переходных режимах разработанного электропривода.
- 4 Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Что значит двухзонное регулирование скорости?
- 2 Поясните принцип регулирования потока по схеме на рисунке 4.1.
- 3 Порядок расчета регуляторов в схеме (см. рисунок 4.1).
- 4 Приведите семейство искусственных механических характеристик для схемы (см. рисунок 4.1).
- 5 Как понимаете «малая постоянная времени в электроприводе»?

5 Лабораторная работа № 5. Исследование системы ТРН-АД

Цель работы: изучение методики расчета регуляторов и исследование на моделях получаемых показателей качества переходных режимов системы электропривода ТРН-АД.

Теоретические сведения

Одним из возможных способов регулирования частоты вращения асинхронных двигателей является изменение напряжения на зажимах его статора, при этом частота такого напряжения постоянна и равна частоте промышленной сети переменного тока (фазовое регулирование напряжения) [5, 6].

Возможность регулирования частоты вращения АД с помощью изменения фазного напряжения следует из анализа формулы

$$M = \frac{2 \cdot M_k (1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k}, \quad (5.1)$$

где $M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2} \right]}$.

Очевидно, что критическое скольжение не зависит от напряжения, поэтому оно при изменении U_ϕ остается неизменным. Критический момент пропорционален квадрату напряжения и при уменьшении U_ϕ уменьшается (рисунок 5.1).

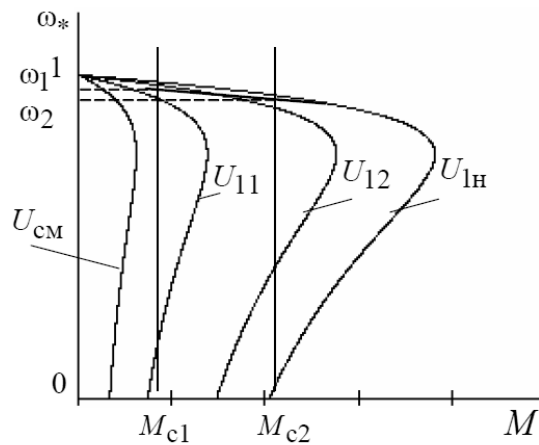


Рисунок 5.1 – Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании напряжения

Функциональная схема асинхронного электропривода с фазовым регулированием напряжения и обратной связью по скорости показана на рисунке 5.2.

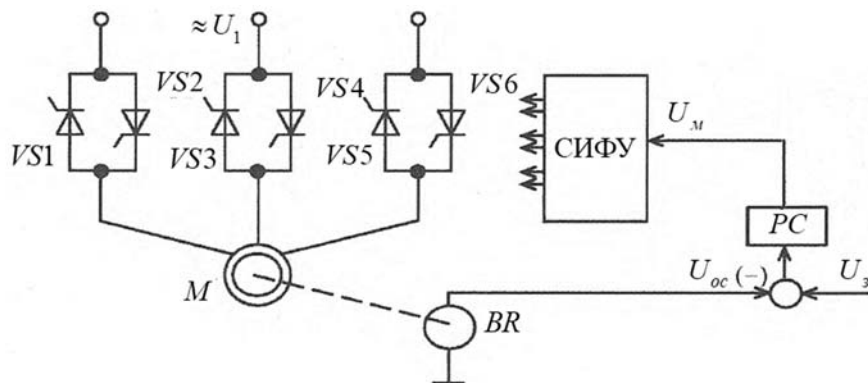


Рисунок 5.2 – Функциональная схема электропривода с фазовым регулированием скорости

Асинхронный двигатель M питается по цепи обмоток статора от регулятора напряжения, собранного из трех пар встречно-параллельно включенных тиристоров $VS1...VS6$, управляемых от системы импульсно-фазового управления. Скорость вращения двигателя задается напряжением U_3 , которое сравнивается на входе регулятора скорости PC с напряжением отрицательной обратной связи по скорости U_{oc} , формируемым датчиком скорости BR . По этому сигналу регулятор скорости PC формирует напряжение управления U_y на входе СИФУ тиристорного регулятора напряжения.

Упрощенная структурная схема асинхронного двигателя, управляемого по цепи обмоток статора изменением напряжения, при работе на рабочем (линейном) участке механической характеристики, полученная на основе упрощенной

формулы Клоса, показана на рисунке 5.3 [6].

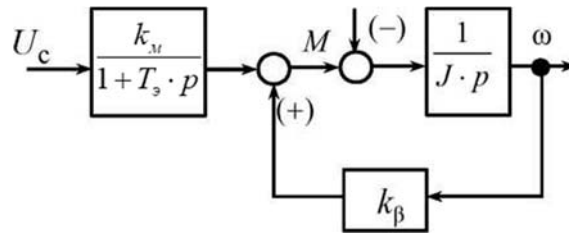


Рисунок 5.3 – Структурная схема асинхронного двигателя при регулировании напряжения на статоре

На рисунке 5.3 приняты следующие обозначения: J – момент инерции двигателя; k_β – жесткость механической характеристики асинхронного двигателя,

$k_\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}$; T_s – электромагнитная постоянная, учитывающая инерционность электромагнитных переходных процессов, $T_s = \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2}$; k_m – коэффициент пере-

дачи по моменту, $k_m = 2M_{кн} \frac{U_{тек}}{U_{ном}}$; $M_{кн}$ – критический момент двигателя.

Структурная схема асинхронного электропривода с регулированием напряжения на статоре двигателя и отрицательной обратной связью по скорости, соответствующая функциональной схеме на рисунке 5.2, показана на рисунке 5.4.

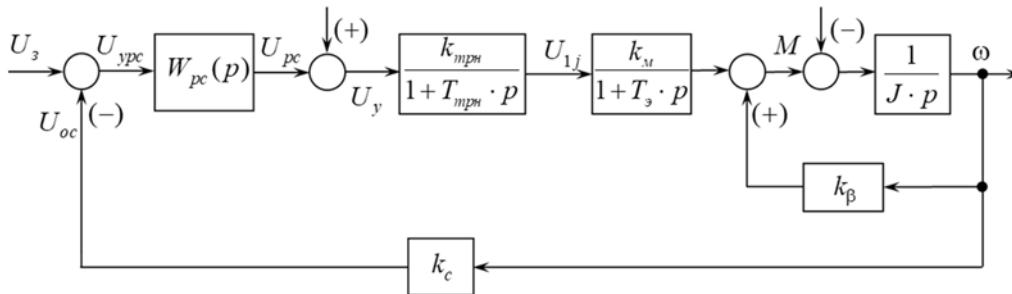


Рисунок 5.4 – Структурная схема асинхронного электропривода с отрицательной обратной связью по скорости

На рисунке 5.4 приняты следующие обозначения: $W_{pc}(P)$ – передаточная функция регулятора скорости; k_c – коэффициент обратной связи по скорости; k_{mrn}, T_{mrn} – коэффициент передачи и постоянная времени тиристорного регулятора напряжения; J – момент инерции электропривода.

Расчет регулятора скорости соответствует методике расчета [2, 3].

Разомкнутый контур скорости, настроенный на модульный оптимум, должен иметь следующую передаточную функцию:

$$W_{mo}(p) = \frac{1}{2T_{\mu c} p (T_{\mu c} p + 1)},$$

где $T_{\mu c}$ – некомпенсируемая постоянная времени (берется равной постоянной времени тиристорного регулятора напряжения).

Передаточная функция разомкнутого контура скорости рассматриваемой системы (см. рисунок 5.4) определяется следующим образом (не учитывая, с целью упрощения обратную связь со звеном k_{β}):

$$W_{\kappa c}(p) = W_{pc}(p) \frac{k_{m\pi n}}{(1 + T_{m\pi n} p)} \frac{k_m}{(1 + T_{\Theta} p)} \frac{1}{Jp} k_c. \quad (5.2)$$

Понизим порядок передаточной функции контура скорости. Последовательно соединенные апериодические звенья могут быть заменены одним апериодическим звеном [7]. Для чего найдем суммарную малую постоянную времени последовательно соединенных апериодических звеньев $T_m = T_{m\pi n} + T_{\Theta}$, тогда выражение (5.2) преобразуется к виду

$$W_{\kappa c}(p) = W_{pc}(p) \frac{k_{m\pi n} k_m}{1 + T_m p} \frac{1}{Jp} k_c.$$

Если принять $T_m = T_{\mu c}$, то регулятор скорости будет иметь передаточную функцию

$$W_{pc}(p) = \frac{J}{2T_m k_c k_{m\pi n} k_m} = k_{pc}.$$

Таким образом, при настройке контура скорости на модульный оптимум, регулятор скорости будет пропорционального типа с коэффициентом передачи k_{pc} .

Если система настраивается на симметричный оптимум, то передаточная функция регулятора скорости, получаемая после преобразований, имеет вид ПИ-регулятора:

$$W_{pc}(p) = \frac{1}{(T_{pc} p)} + k_{pc},$$

где k_{pc} – коэффициент усиления регулятора скорости, $k_{pc} = \frac{4J_{\Sigma}}{T_m k_c k_m k_{m\pi n} 8}$;

T_{pc} – постоянная времени интегрирования регулятора скорости,
 $T_{pc} = \frac{8k_{m\pi n} k_m k_c T_m^2}{J_{\Sigma}}.$

Выполнение лабораторной работы

- 1 Изучить работу электропривода по функциональной схеме (см. рисунок 5.2).
- 2 Для заданного двигателя и настроек контуров рассчитать передаточные функции регулятора скорости.
- 3 Разработать имитационную модель электропривода с рассчитанными регуляторами и исследовать на модели показатели качества в переходных режимах разработанного электропривода.
- 4 Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Принцип работы ТРН.
- 2 Порядок расчета регулятора скорости в схеме на рисунке 5.1.
- 3 Приведите семейство искусственных механических характеристик для схемы (см. рисунок 5.1).
- 4 Достоинства и недостатки привода по схеме (см. рисунок 5.1).
- 5 Как понимаете «большая постоянная времени электропривода»?

6 Лабораторная работа № 6. Исследование системы ТПЧ-АД с обратной связью по скорости

Цель работы: изучение методики расчета регуляторов и исследование на моделях получаемых показателей качества переходных режимов системы электропривода ПЧ-АД.

Теоретические сведения

Функциональная схема разомкнутой системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» при скалярном частотном регулировании скорости двигателя представлена на рисунке 6.1 [6, 8].

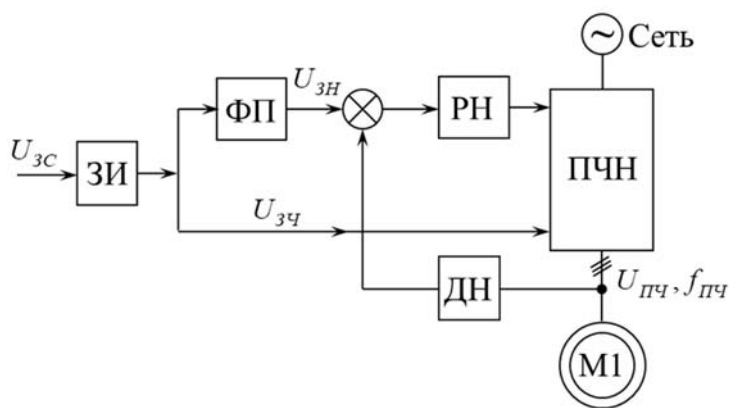


Рисунок 6.1 – Функциональная схема скалярного частотно-регулируемого электропривода

В системе регулирования питание асинхронного двигателя осуществляется от двухзвенного преобразователя частоты (в силовой части преобразователя нерегулируемый выпрямитель и автономный инвертор напряжения). Управляющими воздействиями на асинхронный двигатель являются частота и напряжение на статоре. Механические характеристики при этом способе регулирования имеют невысокую жесткость и зависят от характеристики функционального преобразователя ФП. При поддержании соотношения между величиной напряжения и частотой постоянным при снижении частоты максимальный момент двигателя падает из-за снижения потока двигателя (рисунок 6.2).

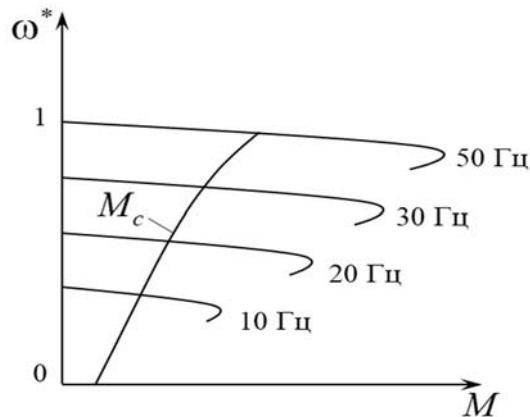


Рисунок 6.2 – Механические характеристики при регулировании частоты питания электродвигателя

Чтобы этого не происходило, при снижении частоты надо поток двигателя поддерживать постоянным, например, компенсируя падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора (IR-компенсация). Для этого величину падения на этом сопротивлении добавляют к значению напряжения, пропорционального частоте:

$$U = kf_{\Phi\Pi} + I_1 r_1.$$

На схеме (рисунок 6.3) эту добавку обеспечивает датчик падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора ДН. Возможны другие варианты поддержания постоянства потока двигателя.

Функциональная схема скалярной системы частотно-регулируемого электропривода с отрицательной обратной связью по скорости приведена на рисунке 6.3.

Механические характеристики (рассматриваются рабочие участки этих характеристик), поясняющие работу электропривода при формировании статической характеристики замкнутой системы, приведены на рисунке 6.4.

Предположим, что двигатель работал в точке z на искусственной характеристике со скоростью идеального холостого хода ω_{0z} . При приложении нагрузки скорость начнет снижаться. Как следствие, увеличивается разность сигналов $u_{zc} - u_{oc}$. Соответственно, увеличивается задание скорости холостого хода.

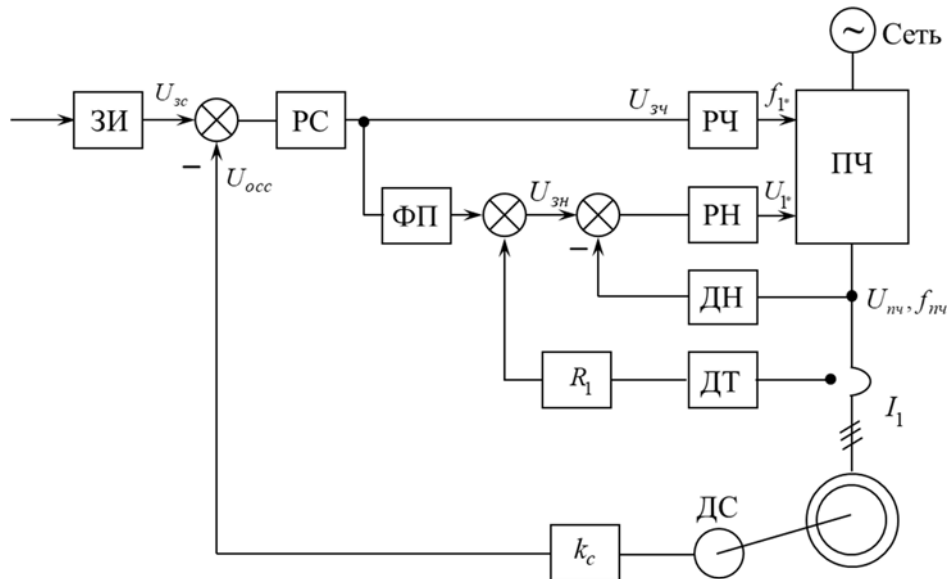


Рисунок 6.3 – Функциональная схема асинхронного электропривода с преобразователем частоты и обратной связью по скорости

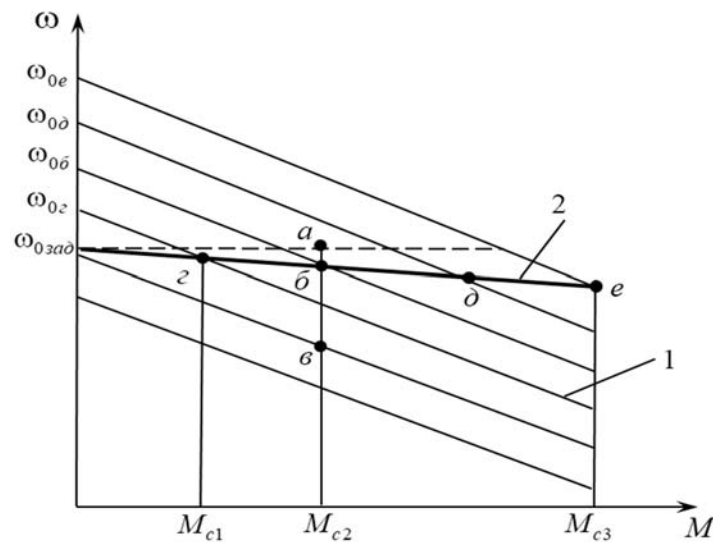


Рисунок 6.4 – Формирование статической характеристики в замкнутой системе электропривода с обратной связью по скорости

В результате привод перейдет на механическую характеристику, соответствующую скорости со скоростью идеального холостого хода ω_{0b} , и будет работать в точке b . При этом ошибка по скорости уменьшится и будет равна отрезку ab . При дальнейшем изменении скорости привода под нагрузкой двигатель последовательно будет работать на соответствующих механических искусственных характеристиках двигателя. Как следствие, механические характеристики замкнутой системы будут представлять собой геометрическое место точек на соответствующих искусственных механических характеристиках двигателя, например $\omega_{0зад} - z - b - d - e$. При этом жесткость механических характеристик замкнутой системы электропривода будет существенно выше жесткости механических характеристик разомкнутой системы.

Анализ и синтез параметров регулятора скорости в рассматриваемом электроприводе можно произвести, используя структурную схему асинхронного двигателя, управляемого по цепи обмоток статора изменением частоты (рисунок 6.5).

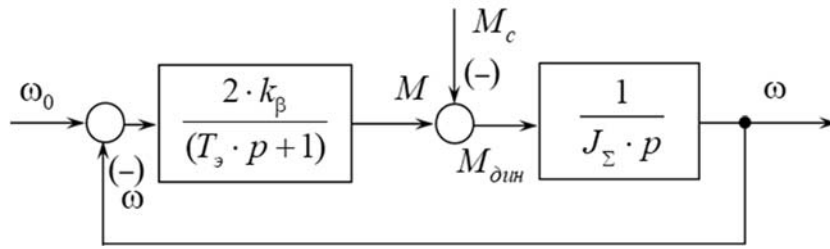


Рисунок 6.5 – Структурная схема асинхронного двигателя при частотном регулировании

На рисунке 6.5 приняты следующие обозначения: T_s – электромагнитная постоянная, учитывающая инерционность электромагнитных переходных процессов, $T_s = \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2}$; k_β – модуль жесткости лианеризованной части механической характеристики асинхронного двигателя, $k_\beta = \frac{M_k}{s_k \omega_0}$.

Линеаризованная структурная схема электропривода «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с отрицательной обратной связью по скорости, соответствующая функциональной схеме (см. рисунок 6.3), приведена на рисунке 6.6.

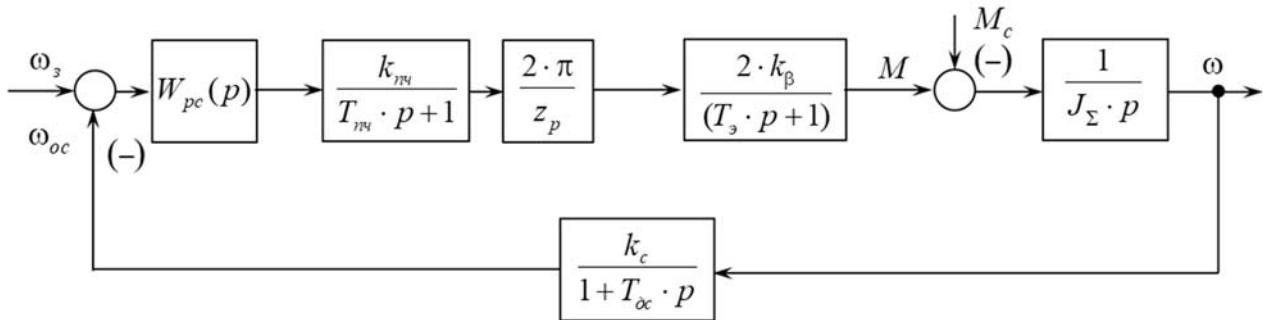


Рисунок 6.6 – Структурная схема асинхронного электропривода при частотном регулировании скорости

На рисунке 6.6 приняты следующие обозначения: $W_{pc}(p)$ – передаточная функция регулятора скорости; k_c – коэффициент обратной связи по скорости, В·с/рад; $k_{нч}$, $T_{нч}$ – коэффициент передачи и постоянная времени преобразователя частоты; J_Σ – момент инерции электропривода.

Синтез параметров регулятора скорости зависит от критерия настройки системы. Если контур скорости настраивать на модульный оптимум, то желаемая передаточная функция разомкнутого контура скорости определяется

выражением

$$W_{mo}(p) = \frac{1}{2T_{\mu c} p (T_{\mu c} p + 1)}.$$

Передаточная функция разомкнутого контура скорости рассматриваемой системы (см. рисунок 6.6) определяется следующим образом:

$$W_{kc}(p) = W_{pc}(p) \frac{k_{nc}}{(1 + T_{nc} p)} \frac{2\pi}{z} \frac{2k_{\beta}}{(1 + T_{\beta} p)} \frac{1}{J_{\Sigma} p} \frac{k_c}{(1 + T_{dc} p)}. \quad (6.1)$$

Понизим порядок передаточной функции контура скорости. Для чего заменим три апериодических звена в схеме одним и найдем суммарную малую постоянную времени $T_m = T_{nc} + T_{\beta} + T_{dc}$. Выражение (6.1) преобразуется к виду

$$W_{kc}(p) = W_{pc}(p) \frac{k_{nc} 2k_{\beta} k_c}{(1 + T_m p) J_{\Sigma} p}.$$

Принимая $W_{kc}(p) = W_{mo}(p)$, получаем после преобразований передаточную функцию регулятора скорости:

$$W_{pc}(p) = \frac{J_{\Sigma} z}{4a_{\mu c} T_{nc} k_c k_{nc} \pi k_{\beta}} = k_{pc}.$$

Получаем регулятор скорости пропорционального типа с коэффициентом передачи k_{pc} .

В тех случаях, когда электропривод с П-регулятором скорости не обеспечивает заданных показателей статической погрешности механических характеристик в принятом диапазоне регулирования скорости, контур скорости необходимо настраивать на симметричный оптимум. В этом случае для рассматриваемой системы регулятор скорости получается с передаточной функцией

$$W_{pc}(p) = k_{pc} + \frac{1}{T_{pc} p},$$

где $k_{pc} = \frac{2J_{\Sigma}}{8T_m k_c k_{nc} k_m k_{\beta}}; T_{pc} = \frac{8k_{nc} k_c k_{\beta} T_m}{J_{\Sigma}}.$

Выполнение лабораторной работы

- 1 Изучить работу электропривода по функциональной схеме (см. рисунок 6.1).
- 2 Для заданного двигателя и настроек контуров рассчитать передаточные функции регуляторов тока и скорости.

3 Разработать имитационную модель электропривода с рассчитанными регуляторами и исследовать на модели показатели качества в переходных режимах разработанного электропривода.

4 Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1 Как понимаете «частотное регулирование скорости асинхронного двигателя»?

2 Порядок расчета регулятора скорости в схеме (см. рисунок 6.1).

3 Приведите семейство искусственных механических характеристик для схемы (см. рисунок 6.1).

4 Достоинства и недостатки привода по схеме (см. рисунок 6.1).

5 Поясните принцип формирования статических характеристик в замкнутой системе электропривода.

7 Лабораторная работа № 7. Исследование позиционного электропривода

Цель работы: изучение принципа работы и методики расчета регуляторов для позиционных систем подчиненного регулирования электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) и исследование на моделях получаемых показателей качества переходных режимов.

Теоретические сведения

В отличие от электроприводов со скоростным технологическим режимом работы, в которых внешний входной сигнал системы управления задает значение скорости, в позиционных электроприводах такой сигнал задает значение перемещения (режим позиционирования) рабочего органа (РО) [3]. Позиционный электропривод перемещает РО из некоторой позиции в некоторую конечную позицию с требуемой точностью остановки в ней. При этом траектория перемещения РО заранее известна, а временной закон перемещения РО может быть произвольным или задаваться по условиям работы установки. Структурным признаком позиционного электропривода (ПЭП) является наличие обратной отрицательной связи по положению. Образованный замкнутый контур регулирования положения состоит из двух частей: системы управления положением (СУ-П) и объекта управления – скоростной подсистемы, в состав которой входят её система управления (СУ-С), двигатель, кинематическая цепь и рабочий орган. Скоростная подсистема представляет собой регулируемый электропривод по скорости с входной координатой – напряжением задания скорости, которое формирует система управления положением СУ-П (рисунок 7.1).

В систему управления положением входят: регулятор положения (РП);

измеритель рассогласования (ИР) с выходным напряжением $u_\delta = k_\delta \Delta\theta$; датчик положения (ДП) рабочего органа; задающее устройство (ЗУ), формирующее программу перемещения РО для ПЭП. Задающее устройство формирует сигнал $k_z \theta_z$, который пропорционален заданному перемещению. Основным показателем качества данных электроприводов считается точность позиционирования, т. е. разность между заданным и отработанным перемещениями.

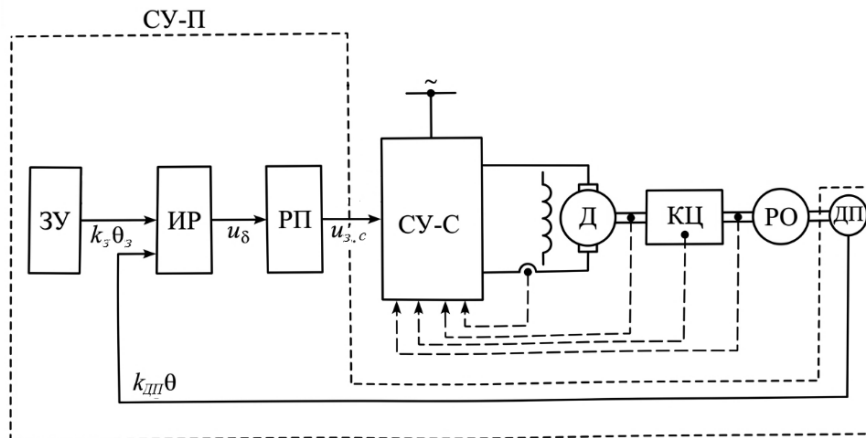


Рисунок 7.1 – Функциональная схема позиционного электропривода

Для угловой координаты РО это разность между задающим углом θ_z и углом исполнительного вала θ :

$$\delta = \Delta\theta = \theta_z - \theta.$$

Функциональная схема позиционного привода с жесткой механической подсистемой представляет собой САР скорости и использует принцип последовательной коррекции (подчиненное регулирование параметров), в соответствии с которым в схеме САР выделяют внутренний контур тока и внешний контур скорости (привод постоянного тока с ДПТ НВ, рисунок 7.2). Настройка регуляторов в этих контурах осуществляется поэтапно, начиная с контура тока и исходя из требований к динамике объекта регулирования (структурная схема на рисунке 7.3).

После расчета регуляторов скоростной подсистемы может быть найдена результирующая передаточная функция этой подсистемы и система управления положением может быть представлена в виде структурной схемы (рисунок 7.4).

Передаточная функция скоростной подсистемы может иметь различный вид в зависимости от исходных настроек контуров регулирования тока и скорости. Например, если контур тока настроен на технический оптимум, а контур скорости – на симметричный оптимум, то

$$W_{СК}(p) = \frac{2 / K_{ДС}}{8T_\mu p + 1}.$$

Если контур тока настроен на технический оптимум, контур скорости на симметричный, а контур положения – на технический, то регулятор положения имеет передаточную функцию

$$W_{пол}(p) = \frac{K_{ДС}}{32T_{\mu}K_{ДП}K_{ред}}.$$

Если контур тока и скорости настроены на технический оптимум, то при настройке контура положения тоже на технический оптимум регулятор положения имеет вид

$$W_{пол}(p) = \frac{K_{ДС}}{8T_{\mu}K_{ДП}K_{ред}}.$$

Выполнение лабораторной работы

- 1 Изучить работу электропривода по функциональной схеме (см. рисунок 7.1).
- 2 Для заданного двигателя и настроек контуров рассчитать передаточные функции регуляторов тока, скорости и положения.
- 3 Разработать имитационную модель электропривода с рассчитанными регуляторами и исследовать на модели показатели качества в переходных режимах разработанного электропривода.
- 4 Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Поясните работу позиционного электропривода (см. рисунок 7.1).
- 2 Какова роль регулятора положения?
- 3 Назовите возможные датчики положения и поясните принцип их работы.
- 4 Порядок расчета регулятора положения в схеме (см. рисунок 7.1).
- 5 Поясните термин «желаемая передаточная функция» при настройке системы.

8 Лабораторная работа № 8. Исследование следящего электропривода

Цель работы: ознакомление с принципом работы следящего электропривода, изучение методики расчета регуляторов и исследование на моделях получаемых показателей качества переходных режимов следящей системы.

Теоретические сведения

Следящий привод предназначен для точного воспроизведения входного управляющего сигнала электроприводом рабочего механизма (рисунок 8.1) [3].

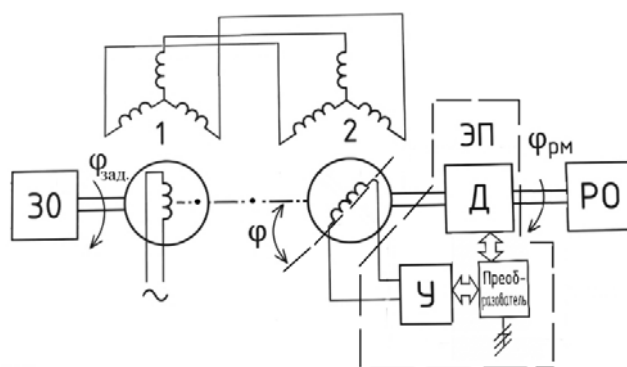


Рисунок 8.1 – Функциональная схема следящего электропривода с сельсинами

Здесь в качестве измерительных устройств, как один из возможных вариантов, используются сельсин-датчик 1 и сельсин-приемник 2, работающие в трансформаторном режиме. На вход следящего электропривода подается управляющий сигнал (сельсин-датчик 1, связанный с задающим перемещением задающего механизма), который несет информацию о заданном необходимом перемещении (угловом в данном примере). Реальное перемещение определяется сельсин-приемником 2, расположенным на валу рабочего механизма. По получаемому рассогласованию непрерывно формируется напряжение управления на входе усилителя $У$, за счет которого электропривод рабочего механизма обеспечивает непрерывное перемещение (слежение) рабочего механизма за задающим перемещением задающего механизма. В общем случае этой схеме может быть поставлена в соответствие функциональная схема трехконтурного следящего электропривода (контур положения, контур скорости, контур тока; в данном примере без конкретизации используемых измерителей рассогласования, рисунок 8.2).

На вход следящего электропривода подается управляющий сигнал $O_{зад}$, который несет информацию о заданном необходимом перемещении (угловом в данном примере). Этот сигнал сравнивается с сигналом цепи обратной связи, информационно связанным с реальным угловым (или линейным) перемещением φ вала двигателя $O_{тек}$, образуя сигнал рассогласования, управляющий работой всего привода.

Если контуры регулирования тока и скорости свернуть, то схеме (см. рису-

нок 8.2) будет соответствовать структурная схема (рисунок 8.3). Здесь звено с передаточной функцией $W_1(p)$ – это свернутые контуры тока и скорости.

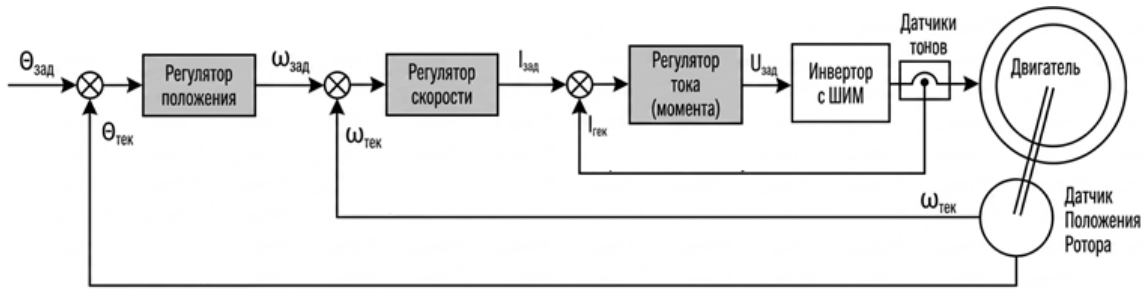


Рисунок 8.2 – Функциональная схема трехконтурного следящего электропривода

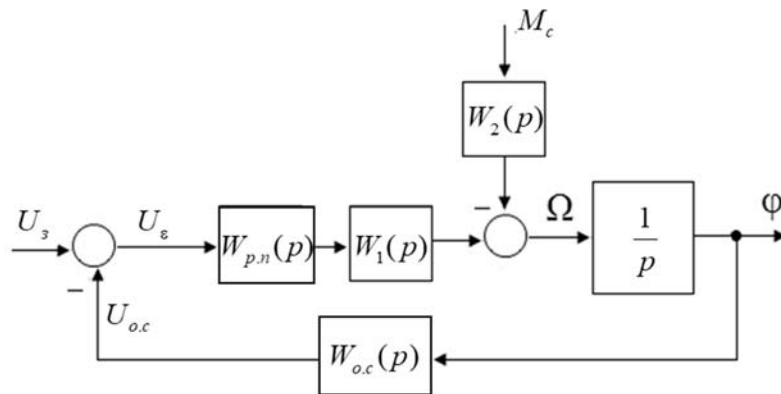


Рисунок 8.3 – Структурная схема следящего привода

Разность сигналов ($\Delta U = U_3 - U_{o.c}$) пропорциональна разности заданного φ_3 и фактического φ положения исполнительного вала привода, поступает на регулятор положения и далее на регулируемый привод, который работает в сторону уменьшения рассогласования. Непрерывное изменение сигнала задания и непрерывное устранение возникающего рассогласования – характерная особенность следящего электропривода. Структурно следящий привод отличается от регулируемого электропривода по скорости наличием контура обратной связи по перемещению. Скорость электродвигателя в таком приводе пропорциональна рассогласованию по задаваемому перемещению.

Основной характеристикой следящего электропривода является погрешность углового положения $\varepsilon = \varphi_3 - \varphi$ (может быть пересчитана на линейную погрешность положения исполнительного рабочего органа).

Структурная схема (см. рисунок 8.3) для анализа погрешности отработки задаваемого положения может быть преобразована к виду, в котором обратная связь приведена к единичной (рисунок 8.4).

По этой схеме может быть определен угол поворота вала двигателя

$$\varphi(p) = \frac{W_{раз}(p)}{1 + W_{раз}(p)} \varphi_3(p) - \frac{W_{раз}(p)}{1 + W_{раз}(p)} M_c(p).$$

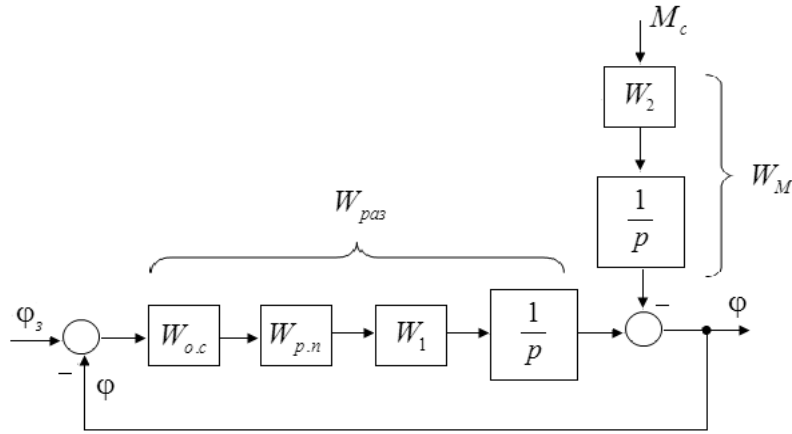


Рисунок 8.4 – Преобразованная структурная схема следящего привода

Соответственно, погрешность следящего привода

$$\varepsilon(p) = \frac{1}{1 + W_{раз}(p)} \Phi_3(p) + \frac{W_M(p)}{1 + W_{раз}(p)} M_c(p),$$

где $W_{раз}$ – передаточная функция разомкнутой цепи следящего привода, $W_{раз} = W_{o.c.} W_{p.n.} W_{1/p}$;

W_M , $W_1(p)$ – передаточные функции контура скорости по управляющему воздействию, $W_M = W_2(1/p)$; $W_1(p) = W_{к.с.} / A(p)$;

$W_2(p)$ – передаточная функция контура скорости по возмущению, моменту сил сопротивления, $W_2(p) = K_M B(p) / A(p)$; здесь в общем случае $A(p) = a_n p^n + \dots + 1$; $B(p) = b_m p^m + \dots + 1$ при $m \leq n$.

В частном случае, когда $W_{o.c.} = K_{o.n.}$ и в системе следящего привода применен П-регулятор положения ($W_{p.n.} = K_{p.n.}$):

$$\Phi(p) = \frac{K}{pA(p) + K} \Phi_3(p) - \frac{K_M B(p)}{pA(p) + K} M_c(p);$$

$$\varepsilon(p) = \frac{pA(p)}{pA(p) + K} \Phi_3(p) + \frac{K_M B(p)}{pA(p) + K} M_c(p),$$

где K – коэффициент преобразования разомкнутой цепи следящего привода, $K = K_{o.n.} K_{p.n.} K_{к.с.}$.

Если следящий привод должен обрабатывать сигнал, изменяющийся с постоянной скоростью (режим заводки), т. е. если $p\Phi_3 = \Omega_3 = \text{const}$, то погрешность следящего привода

$$\varepsilon(p) = \frac{A(p)}{pA(p) + K} \Omega_3(p) + \frac{K_M B(p)}{pA(p) + K} M_c(p).$$

В установившемся режиме слежения ($p = 0$) и соответственно $A(p) = B(p) = 1$:

$$\varepsilon_{уст} = \frac{1}{K\Omega_3} + \frac{K_M}{KM_c}.$$

Отношение заданной скорости следящего привода к установившейся погрешности называют *добротностью* привода по скорости, или просто добротностью. Добротность по скорости равна общему статическому коэффициенту преобразования разомкнутой системы следящего привода:

$$D_\Omega = \Omega_3 / \varepsilon_{уст} = K.$$

Аналогично добротность по моменту

$$D_M = M_c / \varepsilon_{уст} = K / K_M.$$

Для уменьшения установившейся погрешности необходимо увеличивать добротность системы. Однако большие значения K могут привести к потере устойчивости.

Основа следящего электропривода (как и позиционного) – типовой комплектный электропривод регулирования скорости (контур скорости на рисунке 8.2). Такой привод является самостоятельным изделием. Его дорабатывают до следящего, обеспечивая цепь обратной связи по положению и вводя соответствующий регулятор положения. Например, П-регулятор положения.

Контур скорости может рассматриваться как динамическое звено второго порядка и иметь передаточную функцию

$$W_{к.с}(p) = \frac{K_{к.с} \omega_{к.с}^2}{p^2 + 2\xi_{к.с} \omega_{к.с} p + \omega_{к.с}^2}, \quad (8.1)$$

где $\omega_{к.с}$ – резонансная частота;

$\xi_{к.с}$ – коэффициент демпфирования;

$K_{к.с}$ – статический коэффициент преобразования контура скорости.

Передаточная функция по углу поворота

$$W_\varphi(p) = \frac{\varphi(p)}{\varphi_3(p)} = \frac{\omega_{к.с}^2 D}{p^3 + 2\xi_{к.с} \omega_{к.с} p^2 + \omega_{к.с}^2 p + \omega_{к.с}^2 D} \quad (8.2)$$

и по погрешности следящего привода

$$W_{\varepsilon}(p) = \frac{\varepsilon(p)}{\Omega_3(p)} = \frac{p^2 + 2\xi_{\kappa.c} \omega_{\kappa.c} p + \omega_{\kappa.c}^2}{p^3 + 2\xi_{\kappa.c} \omega_{\kappa.c} p^2 + \omega_{\kappa.c}^2 p + \omega_{\kappa.c}^2 D},$$

где D – добротность следящего привода, $D = K_{\partial.n} K_{p.n} K_{\kappa.c}$.

Максимально допустимое значение добротности для рассматриваемого случая по условиям устойчивости следящего привода

$$D_{\max} \leq 2\xi_{\kappa.c} \omega_{\kappa.c}.$$

Добротность следящего привода прямо пропорциональна собственной частоте и коэффициенту демпфирования контура скорости.

В реальных условиях у привода для обеспечения необходимого запаса устойчивости добротность может быть принята, как

$$D = 2\eta \xi_{\kappa.c} \omega_{\kappa.c},$$

где η – относительная добротность, $\eta = D / D_{\max}$; представляет собой величину, обратную запасу устойчивости следящего привода по модулю, и должна находиться в пределах $0,25 \leq \eta \leq 0,4$.

Запас устойчивости привода по фазе

$$\gamma_c = \arctg \frac{1}{2\xi_{\kappa.c}} \left(\frac{1}{v_c} - v_c \right),$$

где v_c – частота среза, которую находят из уравнения

$$4\xi_{\kappa.c}^2 (v_c^4 - \eta^2) + (v_c - v_c^3)^2 = 0.$$

Зависимости $v_c(\eta)$ и $\gamma_c(\eta)$, построенные при различных значениях коэффициента демпфирования $\xi_{\kappa.c}$, представлены на рисунке 8.5.

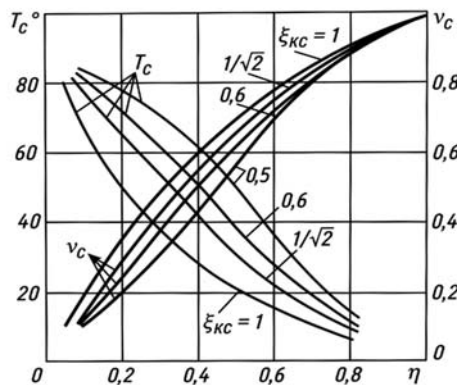


Рисунок 8.5 – Частота среза v_c и запас устойчивости по фазе следящего привода при различных значениях $\xi_{\kappa.c}$

Относительная полоса пропускания следящего привода $\gamma_n = \omega_n / \omega_{к.с}$ является функцией двух параметров: коэффициента демпфирования контура скорости $\xi_{к.с}$ и относительной добротности η .

$$\xi_{к.с} = \frac{1}{2} \frac{v_n - v_n^3}{2\sqrt{2\eta^2 - (v_n^2 - \eta)^2}}.$$

Приближенно можно считать $v_n \approx 2,5\eta$.

Амплитудно-частотная характеристика следящего привода по углу поворота вала двигателя

$$W_\varphi(j\nu) = \frac{2\eta\xi_{к.с}}{\sqrt{4\xi_{к.с}^2(\eta - \nu^2)^2 + (\nu - \nu^3)^2}}.$$

Семейство частотных характеристик следящего привода (при различных $\xi_{к.с}$) представлено на рисунке 8.6.

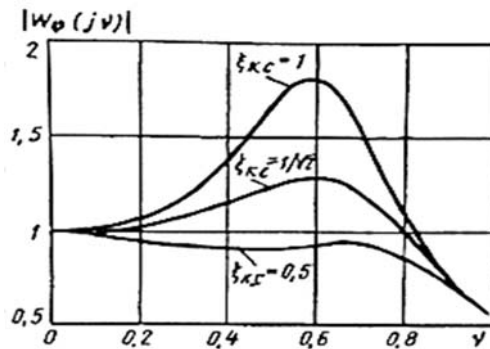


Рисунок 8.6 – Частотные характеристики следящего электропривода

По мере увеличения $\xi_{к.с}$ резонансный пик на частотной характеристике увеличивается.

Показатель колебательности M следящего привода с точностью, достаточной для практических целей, может быть определен по формуле

$$M = k_1 + k_2 \xi_{к.с},$$

где k_1, k_2 – функции относительной добротности, $k_1 = k_1(\eta)$, $k_2 = k_2(\eta)$.

Эти функции могут быть найдены по эмпирическим формулам

$$k_1 = 8(\eta - 0,32)^2; \quad k_2 = -0,086 + 5,42\eta.$$

В самом простом случае можно принять прямую пропорциональность $M = k_2 \xi_{к.с}$, поскольку функция k_1 имеет достаточно малое значение.

Стандартные настройки регуляторов системы подчиненного регулирования

скоростного контура предусматривают настройку следящего привода от внутреннего контура к внешнему. При этом не всегда удается обеспечить эти настройки привода. Другой подход заключается в одновременной настройке всех параметров электромеханической системы следящего привода. При этом настройку начинают не с внутреннего, а с внешнего контура положения, т. е. исходя из желаемой динамической характеристики проектируемого следящего привода. Далее определяют характеристики регулятора скорости и настраивают его, а уже затем настраивают контур тока.

Желаемая частотная характеристика следящего электропривода соответствует идеальному фильтру нижних частот. В реальных технических системах возможна только аппроксимация идеальной частотной характеристики этого фильтра. Один из возможных вариантов формирования желаемой частотной характеристики следящего привода – настройка параметров следящего привода по Баттерворту [3]. При этом обеспечивается соответствие передаточной функции следящего привода по углу поворота вала двигателя передаточной функции фильтра Баттерворта третьего порядка:

$$W(p) = \frac{\omega_0^3}{p^3 + 2\omega_0 p^2 + 2\omega_0^2 p + \omega_0^3}. \quad (8.3)$$

Передаточная функция контура скорости соответствует выражению (8.1), передаточная функция следящего привода – выражению (8.2). Сравнение (8.2) с (8.3) позволяет определить необходимые параметры контура скорости $\omega_{к.с} = \sqrt{2}\omega_0$; $\xi_{к.с} = 1/\sqrt{2}$ и добротность следящего привода $D = \omega_0/2$. При этих параметрах передаточная функция по углу поворота вала двигателя

$$W_\varphi(d) = \frac{\varphi(d)}{\varphi_3(d)} = \frac{1}{(1+d)(1+d+d^2)}$$

и по погрешности

$$W_\varepsilon(d) = \frac{\varepsilon(d)}{\varphi_3(d)} = \frac{(2+2d+d^2)d}{(1+d)(1+d+d^2)},$$

где d – безразмерный оператор дифференцирования, $d = p/\omega_0$.

Если от задания по углу перейти к заданию по скорости $\Omega_3(d) = \omega_0 d \varphi_3(d)$, то передаточные функции по углу поворота вала и погрешность следящего привода будут иметь вид

$$\varphi(d) = \frac{1}{\omega_0} \frac{1}{d(1+d)(1+d+d^2)} \Omega_3(d);$$

$$\varepsilon(d) = \frac{1}{\omega_0} \frac{2+2d+d^2}{(1+d)(1+d+d^2)} \Omega_3(d).$$

Выполнение лабораторной работы

- 1 Изучить работу электропривода по функциональной схеме (см. рисунки 8.1 и 8.2).
- 2 Для заданного двигателя рассчитать передаточные функции регуляторов скорости и положения.
- 3 Разработать имитационную модель электропривода с рассчитанными регуляторами и исследовать на модели в переходных режимах характеристики разработанного электропривода.
- 4 Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Отличие следящего электропривода от позиционного.
- 2 Из каких основных узлов состоит следящий электропривод?
- 3 Начертить функциональную схему следящего электропривода.
- 4 Что такое добротность следящей системы?
- 6 От чего зависит ошибка слежения?
- 7 Для чего служат сельсин-приемник и сельсин-датчик в следящем электроприводе?

Список литературы

- 1 **Ершова, Э. Б.** Основы дискретной автоматики в электросвязи / Э. Б. Ершова. – М. : Связь, 1980. – 289 с.
- 2 **Анучин, А. С.** Системы управления электроприводов / А. С. Анучин. – М. : МЭИ, 2015. – 373 с.
- 3 **Терехов, В. М.** Системы управления электроприводов : учебник / В. М. Терехов, О. И. Осипов ; под ред. В. М. Терехова. – 3-е изд., стер. – М. : Академия, 2005. – 304 с.
- 4 **Башарин, А. В.** Управление электроприводами : учеб. пособие / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1982. – 392 с.
- 5 **Онищенко, Г. Б.** Электрический привод : учебник / Г. Б. Онищенко. – М. : Академия, 2013. – 288 с.
- 6 **Фираго, Б. И.** Теория электропривода : учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Мн. : Техноперспектива, 2004. – 527 с.
- 7 **Анхимюк, В. Л.** Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михейко. – Мн. : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с.
- 8 **Баранов, А. В.** Электропривод мехатронных систем : учеб. пособие / А. В. Баранов. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 139 с.