

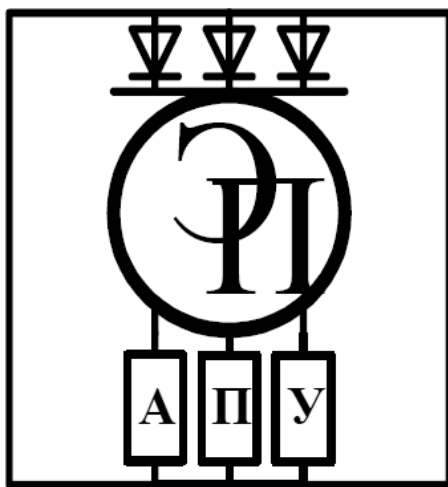
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

*Методические рекомендации к курсовому проектированию  
для студентов специальности*

*6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов  
и производств» очной и заочной форм обучения*



Могилев 2025

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 автоматизация промышленных установок» «28» ноября 2024 г., протокол № 4

Составитель канд. техн. наук А. С. Коваль

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

В методических рекомендациях изложены необходимые сведения к выполнению курсовой работы по дисциплине «Системы управления электроприводами» для студентов специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств». Данные методические рекомендации могут быть использованы для дипломного проектирования.

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 26 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, 2025

## Содержание

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                         | 4  |
| 1 Общий подход к проектированию систем управления электроприводами.....                                               | 5  |
| 2 Разработка схемы электрической принципиальной.....                                                                  | 5  |
| 2.1 Определение параметров регуляторов .....                                                                          | 6  |
| 2.2 Расчет и выбор электроаппаратуры .....                                                                            | 7  |
| 2.3 Расчет статических характеристик электропривода .....                                                             | 7  |
| 2.4 Исследование динамических характеристик системы .....                                                             | 8  |
| 3 Регулируемый электропривод постоянного тока по системе управляемый выпрямитель – ДПТ независимого возбуждения ..... | 8  |
| 4 Регулируемый асинхронный электропривод с фазовым регулированием скорости .....                                      | 15 |
| 5 Асинхронный электропривод со скалярным частотным регулированием скорости.....                                       | 19 |
| Список литературы .....                                                                                               | 24 |
| Приложение А. Структура курсовой работы по дисциплине «Системы управления электроприводами».....                      | 25 |

## Введение

Дисциплина «Системы управления электроприводами» (СУЭП) преследует цель способствовать развитию у студентов интереса к специальности, показывая, что изучение способов реализации законов управления движением электропривода (ЭП) на основе анализа типовых инженерных решений, применяемых в конкретных разомкнутых и замкнутых системах, позволит подготовить студента к самостоятельному решению комплекса вопросов: решению вопросов курсового и дипломного проектирования, а также решения вопросов в инженерной деятельности.

Курсовая работа способствует закреплению знаний, полученных на лекциях, лабораторном практикуме, а также приобретению навыков инженерного проектирования и расчета систем автоматического управления ЭП. Курсовое проектирование является завершающим этапом изучения курса СУЭП.

Курсовая работа состоит из двух чертежей формата А1 (А3) и расчетно-пояснительной записки (приложение А).

Варианты задания на курсовое проектирование выдает преподаватель.

При выполнении курсового проекта студент решает следующие основные задачи:

1) в соответствии с заданием разрабатывает функциональную схему системы управления электроприводом;

2) производит разработку структурной схемы системы управления ЭП с учетом нелинейных характеристик функциональных узлов ЭП и дает ее краткое описание;

3) производит расчет постоянных времени и коэффициентов передачи звеньев неизменяемой части структурной схемы, а затем производит выбор типа регуляторов;

4) по функциональной и структурной схемах ЭП разрабатывает схему электрическую принципиальную и производит расчет и выбор необходимых ее элементов;

5) при работе элементов ЭП в линейной зоне производит необходимые преобразования структурной схемы для расчета статических характеристик;

6) рассчитывает и строит статические и частотные характеристики ЭП;

7) на основании структурной схемы разрабатывает имитационную модель ЭП в программной среде MATLAB и SimInTech и производит моделирование переходных процессов.

Оформление расчетно-пояснительной записки и графической части проекта следует выполнить согласно [1]. Объем пояснительной записки 35–40 страниц. Графическая часть – два листа формата А1 (А3).

## **1 Общий подход к проектированию систем управления электроприводами**

Разработка СУЭП является частью общей задачи проектирования электро-механической системы.

В начале проектирования выбирается система регулируемого электропривода для решения задач, формулируемых заданием на проектирование. Затем разрабатывается математическое описание (модель) ЭП как объекта управления с учетом особенностей силовой части. На следующем этапе определяется структура СУЭП, производится ее анализ и синтез.

Проектируемая СУЭП должна быть оптимизирована в рамках параметрической оптимизации, когда при заданной структуре (система с подчиненным регулированием параметров) и функциональных воздействиях на систему требуется определить значения ее параметров, при которых наилучшим образом достигаются заданные показатели качества.

## **2 Разработка схемы электрической принципиальной**

Схема электрическая принципиальная системы управления ЭП определяет полный состав элементов и дает детальное представление о принципе функционирования ЭП. На принципиальной схеме ЭП изображаются все электрические элементы и устройства, входящие в состав СУЭП, и электрические связи между ними согласно требованиям ЕСКД [1].

При разработке схемы электрической принципиальной системы ЭП рекомендуется пользоваться литературой [2].

Схема электрическая принципиальная разрабатывается на основе выбранного серийно выпускаемого преобразователя для выбранной системы регулируемого электропривода. Показывается, каким образом реализуется подключение электродвигателя к преобразователю и питание цепи возбуждения (для системы ЭП постоянного тока), раскрывается состав схемы управления и регулирования скорости разработанного электропривода.

На схеме электрической принципиальной показываются устройства задания, датчики обратных связей, фильтры, защиты. При этом желательно применение стандартных устройств. Также необходимо предусмотреть сигнализацию различных режимов работы ЭП и аварийную сигнализацию. В качестве источников питания схемы управления нужно использовать стандартные блоки, которые допускается не раскрывать, а изображать упрощенно.

В пояснительной записке следует раскрыть назначение каждого устройства системы управления и показать, как и за счет чего осуществляется реализация.

## 2.1 Определение параметров регуляторов

Инженерные методы синтеза регуляторов или корректирующих устройств используют методы, основанные на частотных характеристиках систем регулирования [3, 4]. По виду частотных характеристик также производится оценка устойчивости спроектированной системы.

Для расчета корректирующих устройств (регуляторов) методом ЛАЧХ выбирается вариант включения корректирующего устройства: последовательный или параллельный. На практике в большинстве случаев систем регулируемого электропривода применяется последовательное включение регуляторов (последовательная коррекция в системах подчиненного регулирования).

Выбор схемы последовательного корректирующего устройства частотными методами осуществляется в следующем порядке [3]:

1) на графике ранее построенных желаемых ЛАЧХ системы  $L_{\text{ж}}(w)$  и ЛАЧХ нескорректированного разомкнутого контура регулирования  $L_{\text{нск}}(w)$  находится ЛАЧХ корректирующего устройства  $L_{\text{к}}(w)$ :

$$L_{\text{к}}(w) = L_{\text{ж}}(w) - L_{\text{нск}}(w);$$

2) по полученной ЛАЧХ выбирается схема корректирующего звена и рассчитываются номиналы навесных элементов.

На частотных методах (амплитудно-частотный критерий оптимальности [5]) построены методы аналитического определения передаточных функций последовательно включенных регуляторов при настройке системы автоматического регулирования на «технический» и «симметричный» оптимумы [6, 7]. Этим оптимумам соответствуют желаемые ЛАЧХ разомкнутых систем или отдельных контуров в системе с последовательной коррекцией (системы подчиненного регулирования), определяющие качественные характеристики проектируемой системы и соответствующие им желаемые передаточные функции разомкнутых систем (отдельных контуров). Передаточная функция регулятора в этом случае при настройке на заранее выбранный оптимум определяется [6] по формуле

$$W_{\text{к}}(p) = \frac{W_{\text{ж}}(p)}{W_{\text{нск}}(p)}, \quad (1)$$

где  $W_{\text{ж}}(p)$  – желаемая передаточная функция разомкнутой системы, выбранная в соответствии с техническим оптимумом;

$W_{\text{нск}}(p)$  – передаточная функция нескорректированной разомкнутой системы.

Физически регуляторы строятся на базе операционных усилителей (аналоговые регуляторы), обладающих большим коэффициентом усиления, либо в виде соответствующей закону регулирования управляющей программы в памяти логического контроллера (цифровые регуляторы) [7].

## 2.2 Расчет и выбор электроаппаратуры

При выборе стандартных аппаратов и устройств в пояснительной записке приводятся условия выбора [8] и их технические характеристики. По этим условиям выбираются электрические аппараты, использованные при разработке принципиальной схемы. В качестве датчиков скорости в ЭП применяются тахогенераторы или цифровые датчики. Последние при соответствующем исполнении могут быть использованы и как датчики положения.

Основной характеристикой тахогенератора является зависимость ЭДС тахогенератора от его частоты вращения. Коэффициент передачи тахогенератора (крутизна характеристики) определяется по формуле

$$K_{ТГ} = \frac{E_{ТГном}}{\omega_{ТГном}}.$$

Выбор тахогенератора производится по номинальному значению частоты вращения и выходному номинальному напряжению. При этом следует выбирать номинальную частоту вращения тахогенератора не ниже, чем максимальная частота вращения электродвигателя. В случае широкого диапазона регулирования скорости ЭП используются прецизионные тахогенераторы с малым коэффициентом пульсаций. При этом необходимо (при необходимости) предусмотреть схему сопряжения датчика с силовым преобразователем. Необходимо иметь в виду, что современное исполнение электродвигателей может иметь встроенные датчики скорости в комплекте с двигателем.

В качестве задающего устройства в системах регулирования скорости применяются потенциометры, цифровые и аналоговые задающие устройства. Выбор и расчет задающего потенциометра производится по условию обеспечения изменения величины напряжения на входе соответствующей СИФУ или ШИМ от минимального до максимального значения.

Если задающее устройство выполняет функцию задатчика интенсивности (апериодическое звено первого порядка), то, задаваясь временем пуска двигателя, рассчитывается соответствующая постоянная времени  $T_{зи}$  [3].

## 2.3 Расчет статических характеристик электропривода

Расчет статических характеристик спроектированной системы выполняется для максимального и минимального значений выходной координаты. Графики строятся в одних координатных осях для всех случаев. После построения характеристик определяются значения статизма характеристик.

Для проведения расчета статических характеристик замкнутой системы, структурная схема рассматриваемого электропривода сворачивается относительно возмущающего воздействия. В полученной передаточной функции нужно приравнять оператор Лапласа « $p$ » нулю и по полученному уравнению рассчитать изменение скорости при известном (задаваемом в задании на проектирование) приращении величин нагрузки. Алгебраическое суммирование этого прира-

щения скорости со скоростью идеального холостого хода двигателя определяет текущие точки рабочего участка статической характеристики замкнутой системы, которые вместе со скоростью идеального холостого хода для выбранного способа регулирования скорости образуют статическую характеристику замкнутой системы.

## ***2.4 Исследование динамических характеристик системы***

Исследование динамических характеристик спроектированной системы электропривода выполняется ее моделированием. При моделировании системы управления при необходимости учитываются нелинейности, присущие регуляторам и преобразователям. В результате моделирования получаются графики переходных процессов выходной и промежуточной координат системы ЭП, которые исследуются согласно заданию на проектирование и должны удовлетворять заданию на курсовое проектирование.

Моделирование можно производить в любом из перечисленных пакетов: MATLAB, SimInTech. Структурные схемы моделей, таблицы результатов расчета, графики должны быть приведены в пояснительной записке.

## **3 Регулируемый электропривод постоянного тока по системе управляемый выпрямитель – ДПТ независимого возбуждения**

Функциональная схема электропривода по системе УВ-ДПТ НВ (при однозонном регулировании скорости) представлена на рисунке 1.

Система автоматического регулирования (САР) электропривода использует принцип последовательной коррекции или подчиненного регулирования [6, 7], в соответствии с которым в схеме САР (см. рисунок 1) выделяют следующие контуры: внутренний контур тока якоря (датчик тока ДТ и ПИ-регулятор тока), внешний контур скорости (датчик скорости – тахогенератор ТГ и П-регулятор скорости). 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.

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 (см. рисунок 1) с внутренним контуром регулирования тока якоря представлена на рисунке 2, который при необходимости преобразуется в контур регулирования момента умножением сигнала тока на постоянную конструктивную величину  $c$  (цепь получения сигнала ЭДС двигателя на рисунке 2).

Тиристорный управляемый выпрямитель привода постоянного тока, работающий в режиме непрерывного тока, как звено системы автоматического

управления с достаточной точностью можно представить как вид апериодического звена [6]:

$$W_{III}(p) = \frac{k_{III}}{\tau_3 p + 1}, \quad (2)$$

где  $\tau_3$  – общее время запаздывания,  $\tau_3 = \tau_{СП} + \tau_{УУ}$ ;

$\tau_{yy}$  – время запаздывания устройства управления, которое принимают равным  $\tau_{yy} = 0$  для СИФУ вертикального типа;

$\tau_{СП}$  – время запаздывания силового преобразователя, которое принимается равным половине максимального времени запаздывания:

$$\tau_{CH} = \frac{1}{2f_{cemu}m_B},$$

где  $f_{сети}$  – частота сети;

$m_B$  – число фаз выпрямления.

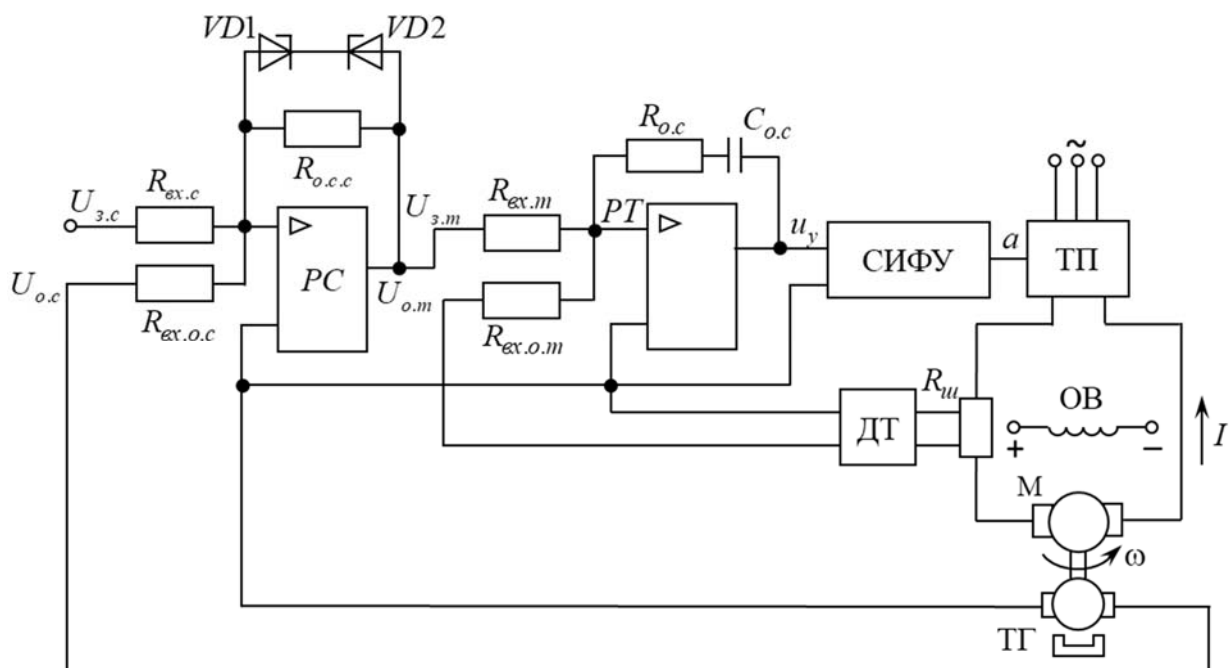


Рисунок 1 – Функциональная схема электропривода

Если блок управления тиристорами имеет на входе фильтр для защиты от высокочастотных помех, то передаточная функция тиристорного преобразователя примет вид

$$W_{III}(p) = \frac{k_{III}}{(T_{III}p+1) \cdot (T_{\phi}p+1)}.$$

Если нет данных о постоянной времени фильтра, то ее можно принять

равной  $T_{\phi} = 0,05 \dots 0,01$  с.

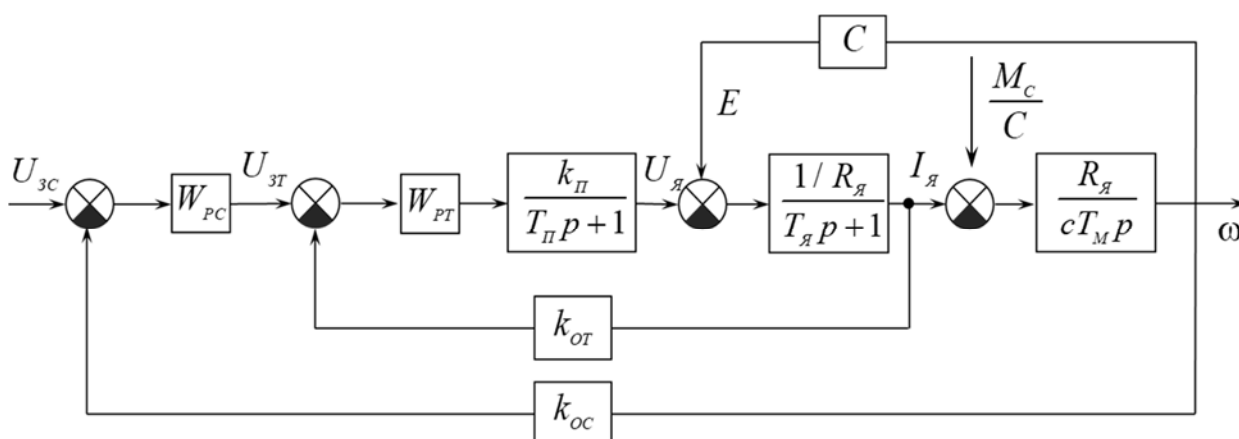


Рисунок 2 – Структурная схема электропривода с подчиненным регулированием координат

Для упрощения расчетов в итоге тиристорный преобразователь (1) можно представить инерционным звеном с передаточной функцией

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

где  $T_{\text{III}} = T_{\Phi} + \tau_3$ .

Структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при общепринятых допущениях имеет вид, представленный на рисунке 3. Расчет параметров двигателя в этой структурной схеме приведен в [6, 9].

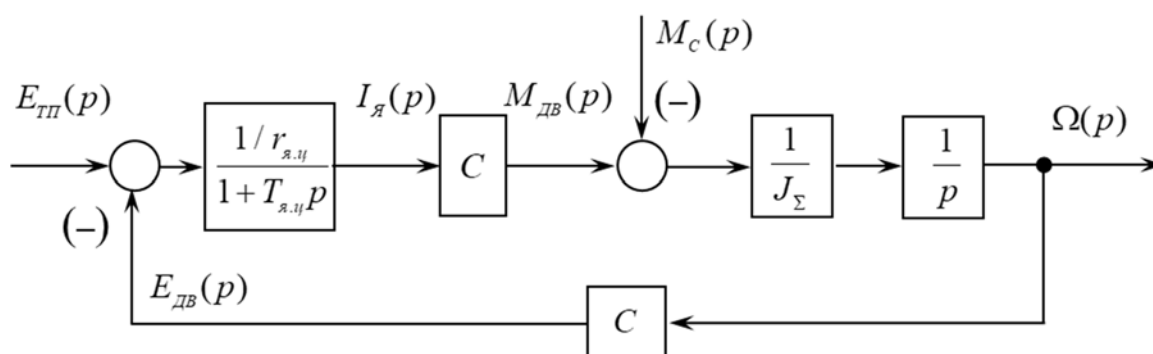


Рисунок 3 – Структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Структурная схема электропривода с обратными связями по току якоря и скорости на основе схемы двигателя (см. рисунок 3) показана на рисунке 4.

Для структурной схемы привода (см. рисунок 4) определение передаточных функций регуляторов тока и скорости осуществляется следующим образом [6].

Выбирается желаемая передаточная функция соответствующего разомкнутого контура. При настройке на технический оптимум желаемая передаточная

функция разомкнутого контура регулирования имеет вид

$$W(P)_{\text{ЖМО}} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} p \cdot (T_{\mu} p + 1)}, \quad (3)$$

где  $T_{\mu}$  – малая некомпенсируемая постоянная времени (принимается равной  $T_{\Pi}$ ).

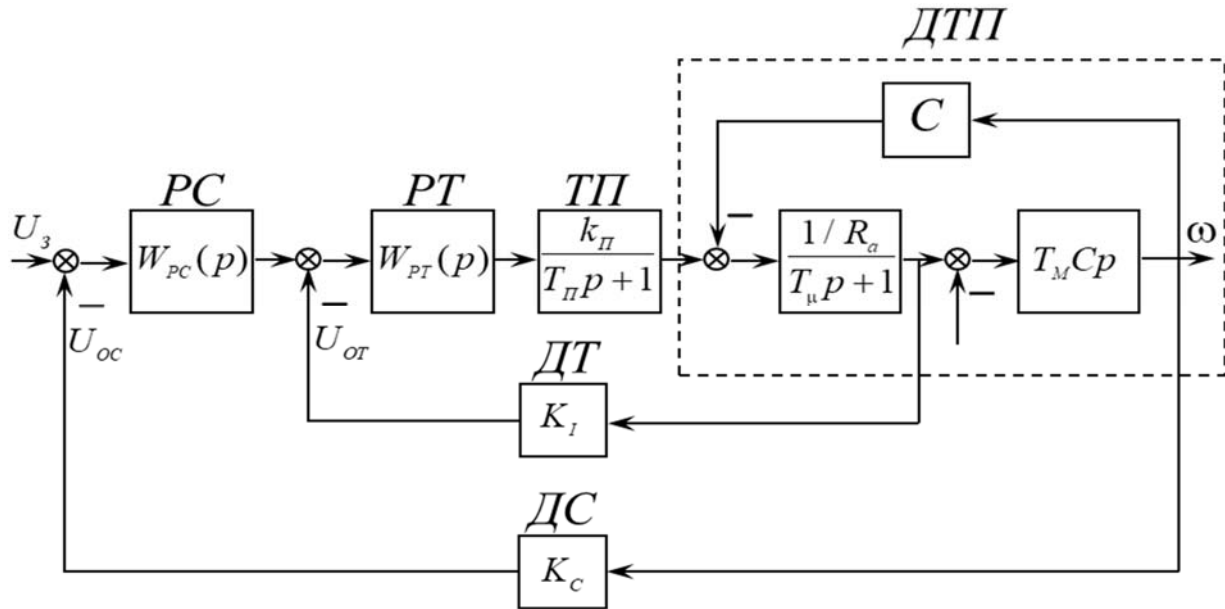


Рисунок 4 – Структурная схема электропривода с обратной связью по скорости и внутренним контуром регулирования тока якоря

При настройке на симметричный оптимум желаемая передаточная функция

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

Затем рассчитываются передаточные функции (1) регуляторов и их параметры.

Применительно к схеме (см. рисунок 4) расчет регуляторов начинается с внутреннего контура регулирования тока якоря (рисунки 5 и 6).

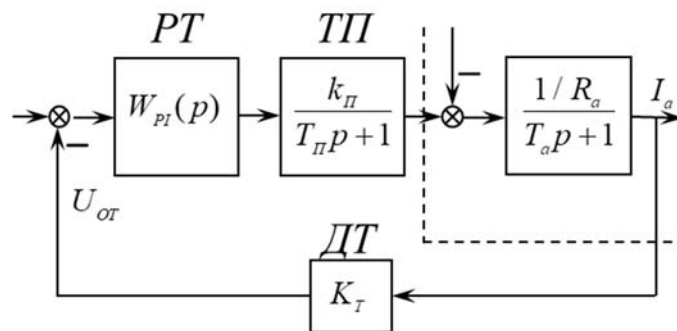


Рисунок 5 – Структурная схема контура регулирования тока

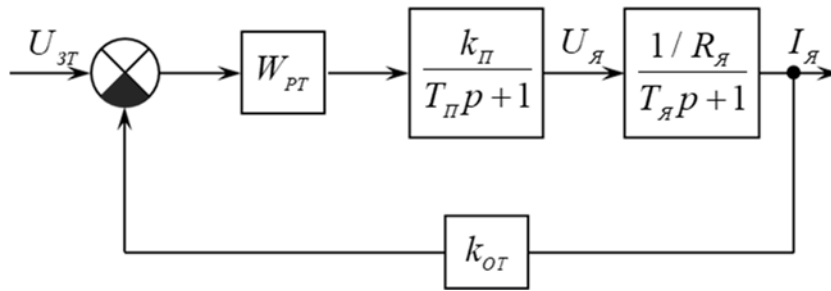


Рисунок 6 – Контур регулирования тока якоря

Передаточная функция разомкнутого контура регулирования тока с неизвестной передаточной функцией регулятора тока имеет вид

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

Искомая передаточная функция (1) регулятора тока находится следующим образом:

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

Это П-регулятор тока. Изменение регулируемой координаты при такой настройке (в общем случае:  $y$  – выходная координата,  $x$  – входная) показано на рисунке 7.

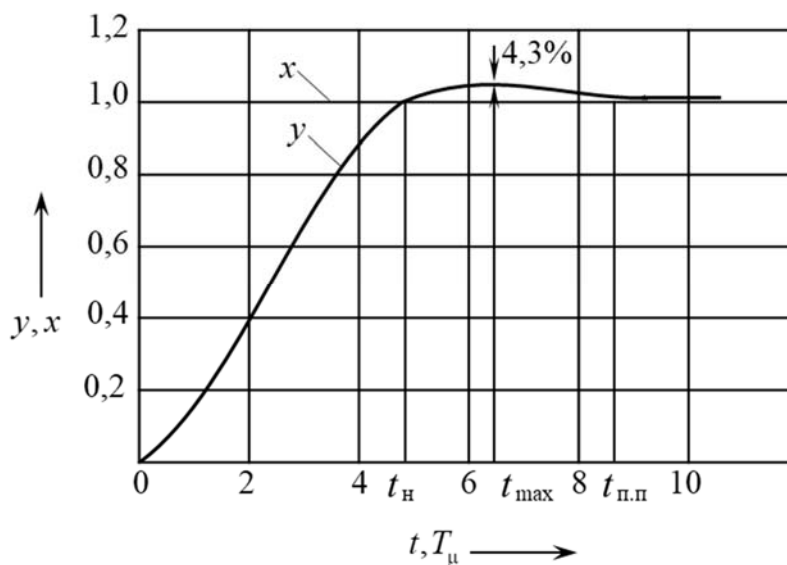


Рисунок 7 – Переходной процесс в контуре при настройке на технический оптимум

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  $T_{\Pi}^2$ ):

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

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

Структурная схема САУ электропривода приобретает вид, представленный на рисунке 8.

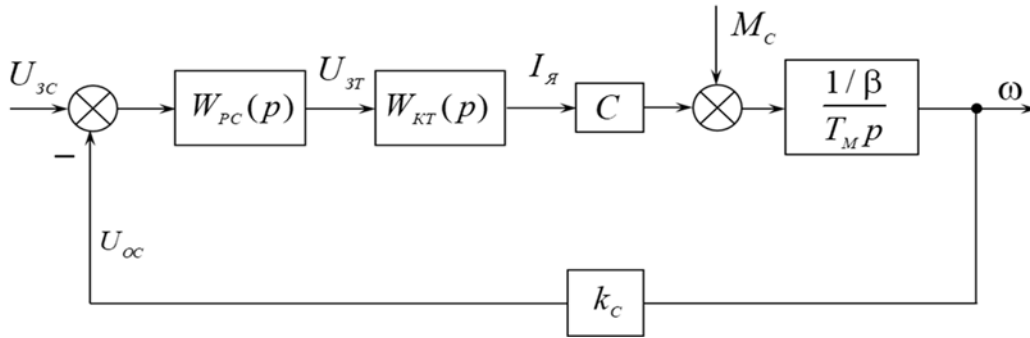


Рисунок 8 – Структурная схема регулирования скорости

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

$$W_{kc}(p) = W_{pc}(p) \cdot \frac{1}{1 + 2T_{\Pi} \cdot p} \cdot \frac{R_{я}}{T_M \cdot p} \cdot k_c.$$

Определяем требуемую передаточную функцию регулятора скорости:

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

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  $T_{\mu} = 2T_{\Pi}$ .

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

$$K_{PC} = \frac{T_M}{2 \cdot T_{\Pi} \cdot R_{\text{я}} \cdot k_c}; \quad T_{PC} = \frac{16T_{\Pi}^2 R_{\text{я}} k_c}{T_M}.$$

Характер переходных процессов при такой настройке показан на рисунке 9.

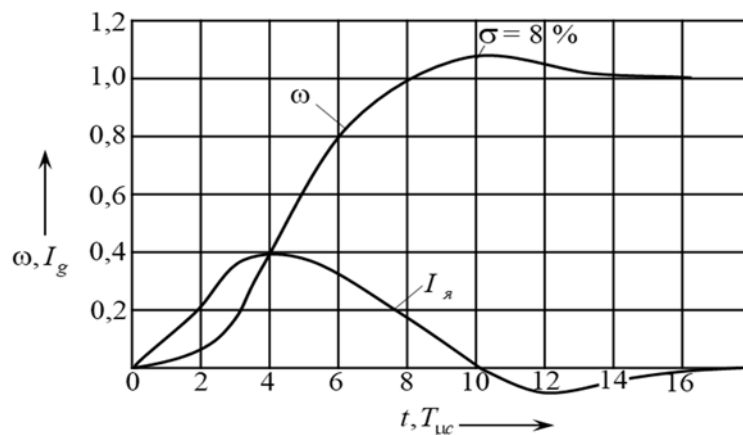


Рисунок 9 – Переходные режимы в контуре скорости

Если рассматривается в качестве исходной трехконтурная система автоматического регулирования подчиненного регулирования с внешним контуром регулирования положения в дополнение к контурам тока и скорости, то расчет аналогичен, но для расчета регулятора положения сворачивается и находится дополнительно передаточная функция замкнутого контура скорости, имеющая в этом случае вид

$$W(p) = \frac{1}{4T_{\mu}p + 1}.$$

Получается одноконтурная система регулирования положения с неизвестной передаточной функцией регулятора положения и объектом регулирования, содержащим интегрирующее звено, включающее понижающий редуктор и преобразующее частоту вращения двигателя в перемещение (линейное или угловое) рабочего механизма (рисунок 10).

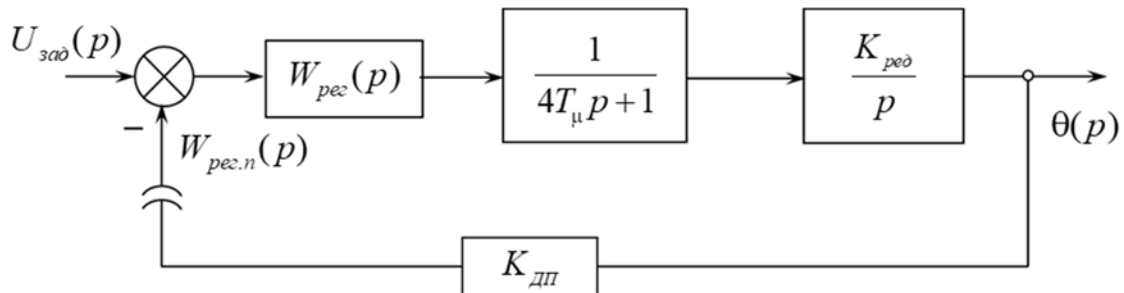


Рисунок 10 – Структурная схема разомкнутого контура регулирования положения

Алгоритм расчета регулятора положения аналогичен.

Для системы электропривода постоянного тока с ДПТ-НВ, но с двухзонным регулированием скорости, дополнительно рассчитывается регулятор тока возбуждения (методика расчета аналогична [6, 7]).

#### 4 Регулируемый асинхронный электропривод с фазовым регулированием скорости

Функциональная схема асинхронного электропривода с фазовым регулированием напряжения и обратной связью по скорости показана на рисунке 11.

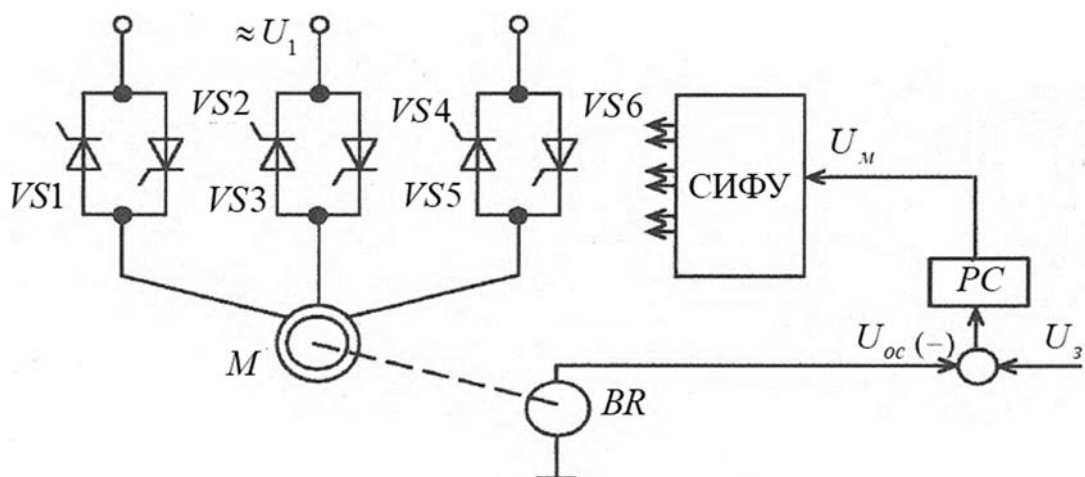


Рисунок 11 – Функциональная схема электропривода с фазовым регулированием скорости

Асинхронный двигатель  $M$  питается по цепи обмоток статора от регулятора напряжения, собранного из трех пар встречно-параллельно включенных тири-

торов  $VS1...VS6$ , управляемых от системы импульсно-фазового управления. Скорость вращения двигателя задается напряжением  $U_z$ , 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 12 [10].

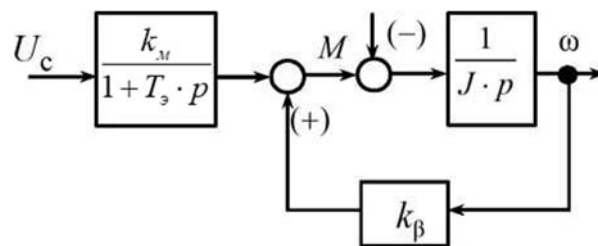


Рисунок 12 – Структурная схема асинхронного двигателя при регулировании напряжения на статоре

На рисунке 12 приняты следующие обозначения:  $J$  – момент инерции двигателя;  $k_\beta$  – 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,  $k_m = 2 \cdot M_{кн} \cdot \frac{U_{тек}}{U_{ном}}$ , где  $M_{кн}$  – критический момент двигателя.

Структурная схема асинхронного электропривода с регулированием напряжения на статоре двигателя и отрицательной обратной связью по скорости, соответствующая функциональной схеме на рисунке 11, показана на рисунке 13.

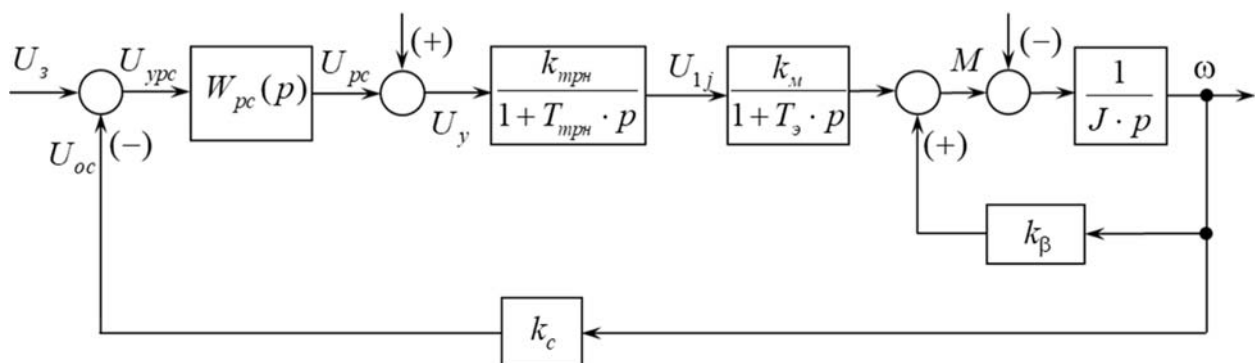


Рисунок 13 – Структурная схема асинхронного электропривода с отрицательной обратной связью по скорости

На рисунке 13 приняты следующие обозначения:  $W_{pc}(P)$  – передаточная функция регулятора скорости;  $k_c$  – коэффициент обратной связи по скорости;  $k_{трн}, T_{трн}$  – коэффициент передачи и постоянная времени тиристорного регулятора напряжения;  $J$  – момент инерции электропривода.

Расчет регулятора скорости соответствует рассмотренной выше методике расчета.

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

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

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

Передаточная функция разомкнутого контура скорости рассматриваемой системы (см. рисунок 13) определяется следующим образом (не учитывая с целью упрощения обратную связь со звеном  $k_\beta$ ):

$$W_{kc}(p) = W_{pc}(p) \cdot \frac{k_{трн}}{1 + T_{трн} \cdot p} \cdot \frac{k_m}{1 + T_\Theta \cdot p} \cdot \frac{1}{J \cdot p} \cdot k_c. \quad (5)$$

Понизим порядок передаточной функции контура скорости. Последовательно соединенные апериодические звенья могут быть заменены одним апериодическим звеном. Для чего найдем суммарную малую постоянную времени последовательно соединенных апериодических звеньев  $T_m = T_{трн} + T_\Theta$ , тогда выражение (5) преобразуется к виду

$$W_{kc}(p) = W_{pc}(p) \cdot \frac{k_{трн} \cdot k_m}{1 + T_m \cdot p} \cdot \frac{1}{J \cdot p} \cdot k_c.$$

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

$$W_{pc}(p) = \frac{J}{2 \cdot T_m \cdot k_c \cdot k_{трн} \cdot k_m} = k_{pc}.$$

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

Оценим в первом приближении устойчивость электропривода, выполненного в соответствии со структурной схемой (см. рисунок 13). Найдем передаточную функцию замкнутой системы по управляющему воздействию в виде

$$W(p) = \frac{k_{pc} \cdot k_{trn} \cdot k_m \cdot /k_\beta}{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0},$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты характеристического уравнения,

$$a_0 = \frac{k_{pc} k_{trn} k_m k_c}{k_\beta} + 1;$$

$$a_1 = T_m \pm T_{trn} \pm T_\gamma;$$

$$a_2 = T_m \cdot T_{trn} \pm T_m \cdot T_\gamma \pm T_\gamma \cdot T_{trn};$$

$$a_3 = T_m \cdot T_{trn} \cdot T_\gamma.$$

Для характеристического уравнения третьего порядка рассматриваемая система будет устойчива при выполнении условий [4]:

$$T_m \cdot T_{trn} \pm T_\gamma \cdot T_m > T_\gamma \cdot T_{trn};$$

$$T_m > T_{trn} + T_\gamma;$$

$$k_{pc} \cdot k_{trn} \cdot k_m \cdot k_c / k_\beta > 1.$$

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

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

где  $k_{pc}$  – коэффициент усиления регулятора скорости,

$$k_{pc} = \frac{4 \cdot J_\Sigma}{T_m \cdot k_c \cdot k_m \cdot k_{trn} \cdot 8};$$

$T_{pc}$  – постоянная времени интегрирования регулятора скорости,

$$T_{pc} = \frac{8 \cdot k_{trn} \cdot k_m \cdot k_c \cdot T_m^2}{J_\Sigma}.$$

## 5 Асинхронный электропривод со скалярным частотным регулированием скорости

Функциональная схема разомкнутой системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» при скалярном регулировании скорости двигателя представлена на рисунке 14 [9].

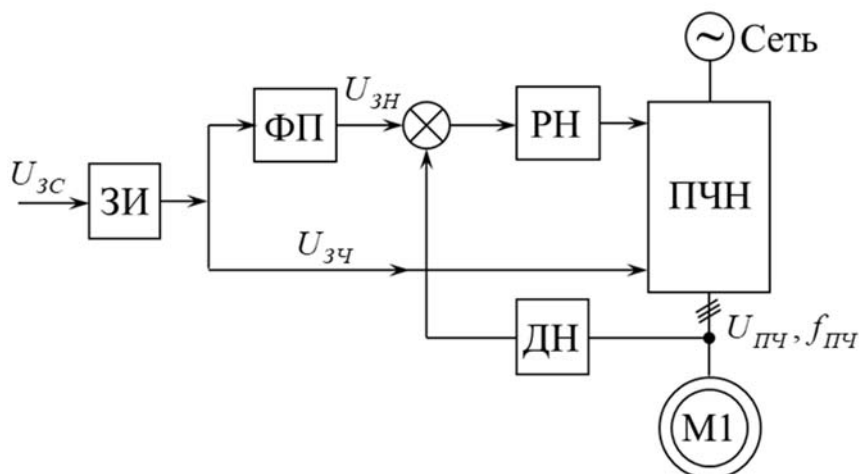


Рисунок 14 – Функциональная схема скалярного частотно-регулируемого электропривода

В системе регулирования (см. рисунок 14) 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 15).

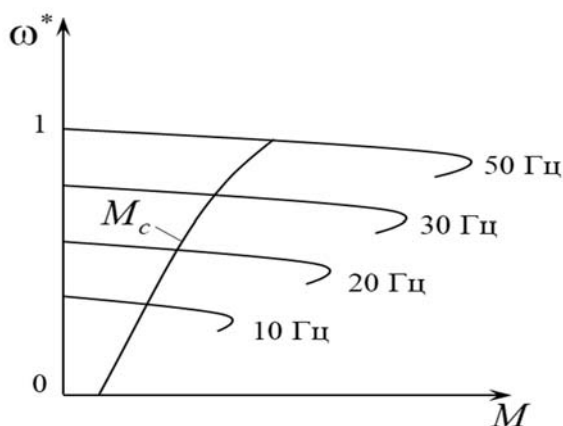


Рисунок 15 – Механические характеристики при регулировании частоты питания электродвигателя

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

$$U = k \cdot f_{\phi\pi} + I_1 \cdot r_1.$$

На схеме (рисунок 16) эту добавку обеспечивает датчик падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора  $ДН$ . Другие варианты поддержания потока асинхронного двигателя при частотном регулировании рассмотрены в [9].

Наиболее употребительные алгоритмы частотного скалярного управления для асинхронного двигателя представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики алгоритмов скалярного частотного регулирования

| Зависимость напряжения от частоты                             | Диапазон регулирования | Область использования                                                                      |
|---------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| $U_1^* = f_1^*$                                               | 5:1                    | Отсутствие требований к качеству регулирования                                             |
| $U_1^* = f_1^* + (I_1 r_1)$                                   | 10:1                   | Приводы с невысокими требованиями к качеству регулирования скорости                        |
| $U_1^* = f_1^* \sqrt{M_c^*}$                                  | 5:1                    | Приводы насосов и вентиляторов                                                             |
| $U_1^* = \text{const}$ , когда $f_1 > f_{1н}$                 | 1:6                    | Высокоскоростные электроприводы, $\omega > 3000$ об/мин                                    |
| Замкнутые системы регулирования с обратной связью по скорости | 50:1                   | Массовые электроприводы с ограниченными требованиями по точности и диапазону регулирования |

Функциональная схема скалярной системы частотно-регулируемого электропривода с отрицательной обратной связью по скорости приведена на рисунке 16 [9].

Механические характеристики (рассматриваются рабочие участки этих характеристик), поясняющие работу электропривода, при формировании статической характеристики замкнутой системы, приведены на рисунке 17.

Предположим, что двигатель работал в точке  $г$  на искусственной характеристике со скоростью идеального холостого хода  $\omega_{0г}$ . При приложении нагрузки скорость начнет снижаться. Как следствие, увеличивается разность сигналов  $u_{zc} - u_{oc}$ . Соответственно, увеличивается задание скорости холостого хода. В результате привод перейдет на механическую характеристику, соответствующую скорости со скоростью идеального холостого хода  $\omega_{0б}$  и будет работать в точке  $б$ . При этом ошибка по скорости уменьшится и будет равна отрезку  $аб$ . При дальнейшем изменении скорости привода под нагрузкой двигатель последовательно будет работать на соответствующих механических иску-

венных характеристиках двигателя. Как следствие, механические характеристики замкнутой системы будут представлять собой геометрическое место точек на соответствующих искусственных механических характеристиках двигателя, например  $\omega_{0\text{зад}} - \varepsilon - \delta - \theta - e$ . При этом жесткость механических характеристик замкнутой системы электропривода будет существенно выше жесткости механических характеристик разомкнутой системы.

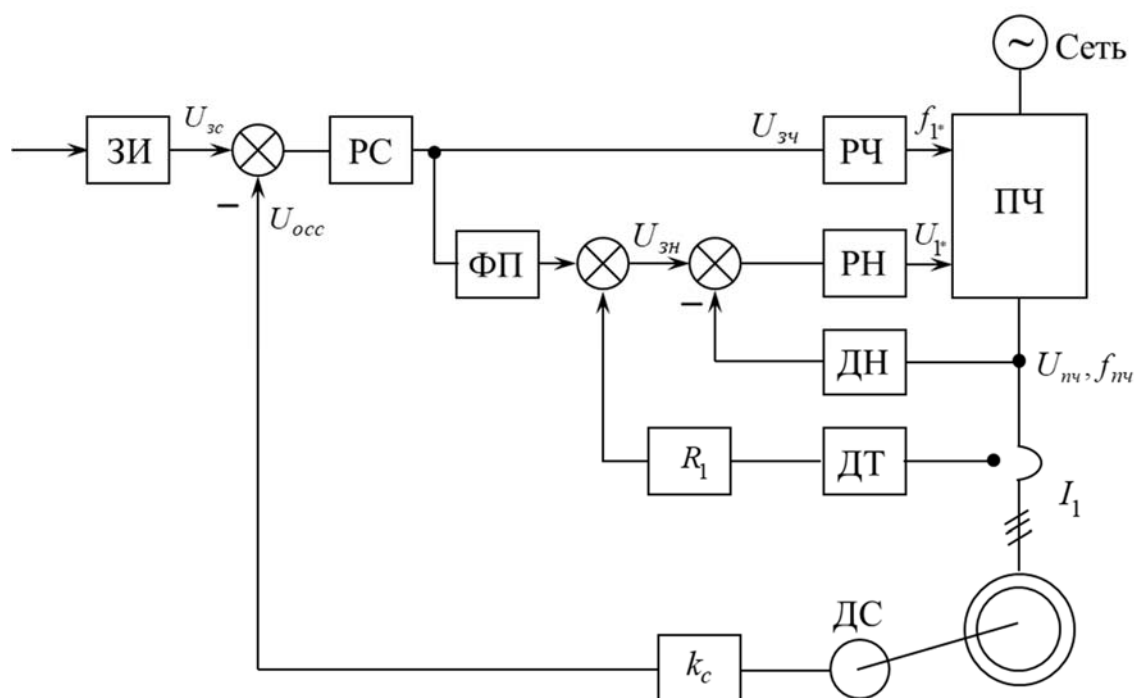


Рисунок 16 – Функциональная схема асинхронного электропривода с преобразователем частоты и обратной связью по скорости

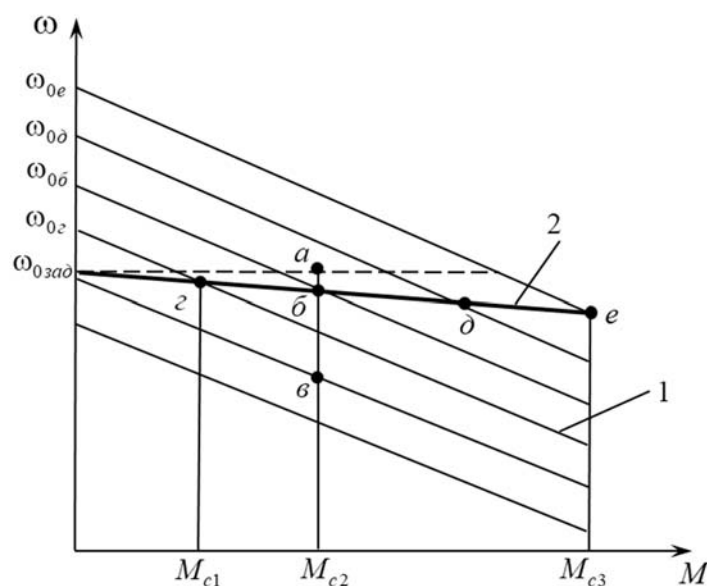


Рисунок 17 – Формирование статической характеристики в замкнутой системе электропривода с обратной связью по скорости

Анализ и синтез параметров регулятора скорости в рассматриваемом электроприводе можно произвести, используя структурную схему асинхронного двигателя, управляемого по цепи обмоток статора изменением частоты (рисунок 18) [10].

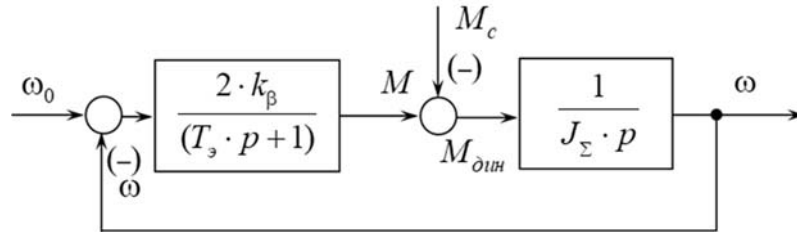


Рисунок 18 – Структурная схема асинхронного двигателя при частотном регулировании

На рисунке 18 приняты следующие обозначения:  $T_s$  – электромагнитная постоянная, учитывающая инерционность электромагнитных переходных процессов,  $T_s = \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2}$ ;  $k_\beta$  – 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 18), приведена на рисунке 19.

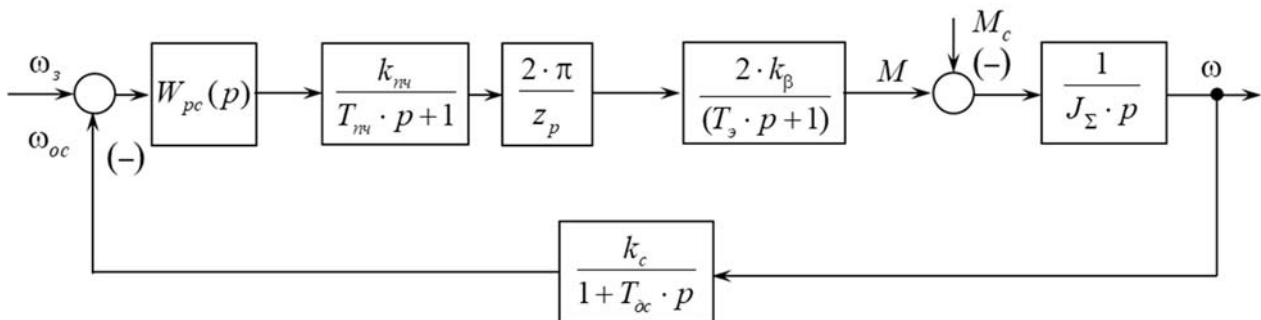


Рисунок 19 – Структурная схема асинхронного электропривода при частотном регулировании скорости

На рисунке 19 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;  $J_\Sigma$  – момент инерции электропривода.

Методика синтеза параметров регулятора скорости аналогична рассмотренной выше.

Если контур скорости настроить на модульный оптимум, то желаемая пере-

даточноная функция разомкнутого контура скорости определяется выражением

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

Передаточноная функция разомкнутого контура скорости рассматриваемой системы (см. рисунок 19) определяется следующим образом:

$$W_{kc}(p) = W_{pc}(p) \cdot \frac{k_{nc}}{1 + T_{nc}p} \cdot \frac{2\pi}{z} \cdot \frac{2k_{\beta}}{1 + T_{\beta}p} \cdot \frac{1}{J_{\Sigma}p} \cdot \frac{k_c}{1 + T_{dc}p}. \quad (6)$$

Понизим порядок передаточноной функции контура скорости. Для чего заменим два апериодических звена в схеме одним и найдем суммарную малую постоянную времени  $T_m = T_{nc} + T_{\beta} + T_{dc}$ . Выражение (6) преобразуется к виду

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

Соответственно, получаем после преобразований передаточноную функцию регулятора скорости:

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

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 передаточноной функцией

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

где

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

## Список литературы

- 1 **Леневский, Г. С.** Дипломное проектирование: метод. рекомендации / Г. С. Леневский. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – 48 с.
- 2 Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования / под ред. Ю. Г. Барыбина [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 630 с.
- 3 **Анхимюк, В. Л.** Теория автоматического регулирования / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михеев – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с.
- 4 **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2003. – 752 с.
- 5 **Архангельский, В. И.** Системы реверсивных электроприводов / В. И. Архангельский. – Киев: Техника, 1972. – 250 с.
- 6 **Терехов, В. М.** Системы управления электроприводов: учебник / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. – 3-е изд., стер. – М. : АСАДЕМА, 2008. – 304 с.
- 7 **Анучин, А. С.** Системы управления электроприводов / А. С. Анучин. – М. : МЭИ, 2015. – 373 с.
- 8 **Коваль, А. С.** Электрические аппараты: метод. рекомендации / А. С. Коваль. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 32 с.
- 9 **Фираго, Б. И.** Теория электропривода: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2007. – 585 с.
- 10 **Чернышев, А. Ю.** Электропривод переменного тока / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев. – Томск : ТПУ, 2011. – 213 с.
- 11 **Башарин, А. В.** Примеры расчетов автоматизированного электропривода / А. В. Башарин, Ф. Н. Голубев, В. Г. Кепперман. – Л. : Энергия, 1971. – 440 с.
- 12 Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболевская. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
- 13 **Ключев, В. И.** Теория электропривода: учебник / В. И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
- 14 **Онищенко, Г. Б.** Электрический привод : учебник / Г. Б. Онищенко. – М. : Академия, 2013. – 288 с.
- 15 **Фираго, Б. И.** Регулируемые электроприводы переменного тока: учебник / Б. И. Фираго. – Минск : Техноперспектива, 2006. – 363 с.
- 16 **Фираго, Б. И.** Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов: учеб. пособие / Б. И. Фираго. – Минск : Техноперспектива, 2012. – 639 с.

## **Приложение А (обязательное)**

### **Структура курсовой работы по дисциплине «Системы управления электроприводами»**

#### **Содержание расчетно-пояснительной записки.**

Техническое задание.

Введение.

1 Расчетная часть.

1.1 Составление функциональной схемы СУЭП.

1.2 Составление структурной схемы СУЭП.

1.2.1 Расчет параметров объекта управления.

1.2.2 Определение передаточных функций элементов силовой части ЭП.

1.2.3 Синтез корректирующих устройств.

1.3 Исследование частотных свойств СУЭП.

1.3.1 Расчет частотных характеристик СУЭП.

1.3.2 Анализ частотных характеристик.

1.4 Расчет статических характеристик системы.

1.4.1 Расчет статических характеристик замкнутой системы.

1.5 Расчет динамических характеристик.

1.5.1 Математическое описание динамических процессов СУЭП.

1.5.2 Построение математической модели.

1.5.3 Анализ переходных процессов.

1.6 Составление схемы электрической принципиальной СУЭП.

1.6.1 Описание схемы электрической принципиальной.

1.6.2 Расчет и выбор элементов управления схемы электрической принципиальной.

Заключение.

Список литературы.

Приложение 1: модель СУЭП.

Приложение 2: результаты моделирования.

Перечень элементов.

#### **Графическая часть проекта.**

Лист 1: функциональная схема СУЭП, структурная схема СУЭП, схема модели СУЭП для моделирования, статические характеристики системы, частотные характеристики системы, динамические характеристики.

Лист 2: схема электрическая принципиальная системы электропривода.