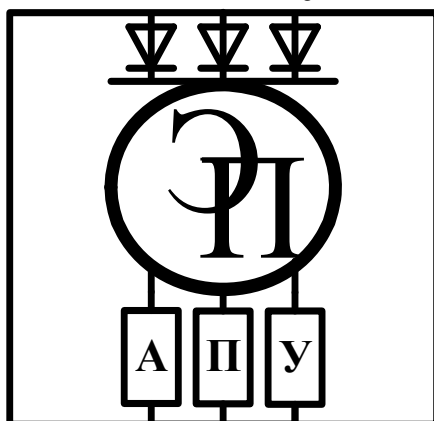


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

# ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

*Методические рекомендации к самостоятельной работе  
для студентов специальности  
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
заочной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 621.3.013  
ББК 31.27  
В24

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «27» сентября 2022 г., протокол № 2

Составитель ст. преподаватель Л. В. Жесткова

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

В методических рекомендациях к самостоятельной работе для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» заочной формы обучения даны вопросы для самостоятельной подготовки по дисциплине «Введение в электромеханические системы».

Учебно-методическое издание

## ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Ответственный за выпуск	С. М. Фурманов
Корректор	И. В. Голубцова
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 66 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, 2023

## Содержание

Введение.....	4
1 Контрольные вопросы теоретической части курса .....	5
1.1 Основные понятия автоматизированного электропривода (АЭП) как электромеханической системы (ЭМС).....	5
1.2 Источники электрической энергии ЭМС .....	6
1.3 Преобразователи электрической энергии (ПЭЭ) ЭМС .....	7
1.4 Вращающие электрические машины (электромеханические преобразователи) .....	8
1.5 Механические передачи в ЭМС.....	9
1.6 Система управления АЭП .....	9
1.7 Методология решения задач в области АЭП .....	10
2 Расчетные задания.....	11
2.1 Механические характеристики ДПТ с независимым возбуждением (НВ) .....	11
2.2 Механические характеристики асинхронного двигателя (АД).....	16
Список литературы .....	21

## Введение

Основной целью дисциплины «Введение в электромеханические системы» является формирование общего представления о составе и основных характеристиках современных электромеханических систем на примере основных компонентов автоматизированного электропривода (источников электрической энергии, силовых преобразовательных устройств, электродвигателей, устройств системы управления).

Задачами изучения дисциплины являются:

- 1) изучение основных понятий в области автоматизированного электропривода;
- 2) формирование общего представления у студентов о выбранной специальности;
- 3) ознакомление с основными элементами и подсистемами электромеханических систем: источниками электрической энергии, силовыми преобразовательными устройствами, электродвигателями и генераторами, устройствами передачи механической энергии, элементами системы управления;
- 4) изучение основных характеристик электромеханических систем их компонентов.

# 1 Контрольные вопросы теоретической части курса

В теоретической части дисциплины «Введение в электромеханические системы» изучается семь тем, состав каждой из которых дается в виде отдельных подразделов с указанием рекомендуемых для ее изучения источников.

## *1.1 Основные понятия автоматизированного электропривода (АЭП) как электромеханической системы (ЭМС)*

Вопросы для самостоятельного изучения.

- 1 Основные понятия электромеханической системы (ЭМС).
- 2 Состав компонентов системы автоматизированного электропривода (АЭП).
- 3 Краткая история развития АЭП.
- 4 Классификация ЭМС.
- 5 Цели и задачи АЭП.
- 6 Основные режимы работы ЭМС.
- 7 Определение понятия «электропривод».
- 8 Определение понятия «преобразователь электрической энергии (ПЭЭ)».
- 9 Определение понятия «электродвигатель».
- 10 Определение понятия «механическая передача».
- 11 Определение понятия «управляющее устройство».
- 12 Определение понятия «информационное устройство».
- 13 Определение понятия «устройство сопряжения».
- 14 Определение понятия «система управления электропривода».
- 15 Определение понятия «силовой канал».
- 16 Определение понятия «информационный канал».
- 17 Классификация систем ЭП по виду механического движения.
- 18 Классификация систем ЭП по функциональному назначению.
- 19 Классификация систем ЭП по виду системы управления.
- 20 Классификация систем ЭП по физическим принципам преобразования электрической энергии в механическую.
- 21 Классификация систем ЭП по структуре системы управления ЭП.
- 22 Классификация систем ЭП по особенностям технической реализации.
- 23 Классификация систем ЭП по виду используемого преобразователя электроэнергии.
- 24 Основные параметры АЭП.
- 25 Показатели качества механического движения АЭП.
- 26 Статический (установившийся) режим работы АЭП.
- 27 Динамический режим работы АЭП.
- 28 Перечислить основные режимы АЭП с точки зрения энергетического обмена в ЭМС.

- 29 Краткая история развития АЭП.
- 30 Основные понятия ЭМС.
- 31 Состав компонентов системы АЭП.
- 32 Краткая история развития АЭП.
- 33 Цели и задачи АЭП.
- 34 Двигательный режим работы ЭМС.
- 35 Генераторный режим работы ЭМС.
- 36 Режим холостого хода ЭМС.
- 37 Режим короткого замыкания в ЭМС.

## *1.2 Источники электрической энергии ЭМС*

Вопросы для самостоятельного изучения.

- 1 Показатели качества потребляемой электрической энергии.
- 2 Энергетические ресурсы.
- 3 Химические источники электрической энергии.
- 4 Физические источники электрической энергии.
- 5 Классификация систем энергоснабжения и основные требования к ним.
- 6 Структура и компоненты питающей электрической сети.
- 7 Классификация электрических сетей и электроприемников.
- 8 Заземление и защитные проводники ЭМС.
- 9 Основные показатели энергоэффективности.
- 10 Определение понятия «коэффициент полезного действия».
- 11 Определение понятия «коэффициент мощности».
- 12 Энергосбережение средствами АЭП.
- 13 Определение понятия «система электроснабжения».
- 14 Определение понятия «электроприемник».
- 15 Определение понятия «заземление».
- 16 Определение понятия «защитный проводник».
- 17 Определение понятия «защитное уравнивание потенциалов».
- 18 Определение понятия «сверхнизкое (малое) напряжение».
- 19 Определение понятия «сопротивление заземляющего устройства».
- 20 Виды линий электропередачи (ЛЭП) в ЭМС.
- 21 Классификация электроприемников по виду тока.
- 22 Классификация электроприемников по величине напряжения.
- 23 Классификация электроприемников по режиму нейтрали.
- 24 Классификация электроприемников по частоте.
- 25 Классификация электроприемников по графику нагрузки.
- 26 Подразделение потребителей электроэнергии по категориям.
- 27 Определение понятия «энергоаудит».

### ***1.3 Преобразователи электрической энергии (ПЭЭ) ЭМС***

Вопросы для самостоятельного изучения.

- 1 Классификация силовых ПЭЭ в составе АЭП по величине выходного напряжения.
- 2 Классификация силовых ПЭЭ в составе АЭП по роду тока выходного сигнала.
- 3 Классификация силовых ПЭЭ в составе АЭП по типу силового вентиля.
- 4 Классификация силовых ПЭЭ по возможности изменения направления вращения двигателя.
- 5 Классификация силовых ПЭЭ по возможности изменения направления передачи электрической энергии.
- 6 Классификация силовых ПЭЭ по схеме преобразования электрической энергии.
- 7 Классификация силовых ПЭЭ по возможности регулирования параметрами преобразуемой электроэнергии.
- 8 Основные характеристики ПЭЭ.
- 9 Электромашинные ПЭЭ.
- 10 Генератор постоянного тока в качестве ПЭЭ.
- 11 Электромашинный усилитель в качестве ПЭЭ.
- 12 Магнитный усилитель в составе ПЭЭ.
- 13 Статические ПЭЭ.
- 14 Силовые полупроводниковые вентили ПЭЭ.
- 15 Полупроводниковые выпрямители АЭП.
- 16 Импульсные преобразователи постоянного тока и напряжения.
- 17 Регуляторы напряжения переменного тока в АЭП.
- 18 Основные характеристики и классификация преобразователей частоты (ПЧ).
- 19 Автономные инверторы напряжения АЭП.
- 20 Автономные инверторы тока АЭП.
- 21 Непосредственные преобразователи частоты (НПЧ).
- 22 Двухзвенный ПЧ со звеном постоянного тока.
- 23 Трехуровневый ПЧ.
- 24 ПЧ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).
- 25 Матричные преобразователи частоты (МПЧ).
- 26 Основы выбора и периферийное оборудование ПЭЭ в составе АЭП.
- 27 Назначение фильтров в составе АЭП.
- 28 Использование трансформаторов и дросселей в составе АЭП.
- 29 Трехуровневый преобразователь частоты.
- 30 Назначение устройства плавного пуска (УПП).

## ***1.4 Вращающие электрические машины (электромеханические преобразователи)***

Вопросы для самостоятельного изучения.

- 1 Классификация вращающихся электрических машин (ЭМ).
- 2 Основные характеристики вращающихся электрических машин (ЭМ).
- 3 Определение понятия «механическая характеристика».
- 4 Определение понятия «электромеханическая характеристика».
- 5 Основные режимы работы электродвигателя.
- 6 Принцип действия двигателя постоянного тока (ДПТ).
- 7 Конструкция двигателя постоянного тока (ДПТ).
- 8 Определение «статор ЭМ».
- 9 Определение «ротор ЭМ».
- 10 Определение «коллекторный узел ДПТ».
- 11 Классификация ДПТ по виду возбуждения.
- 12 Общий вид механической характеристики ДПТ с независимым возбуждением.
- 13 Общий вид механической характеристики ДПТ с последовательным возбуждением.
- 14 Механические характеристики при регулировании скорости ДПТ с независимым возбуждением (НВ) изменением сопротивления цепи якоря.
- 15 Механические характеристики при регулировании скорости ДПТ с НВ изменением напряжения цепи якоря.
- 16 Механические характеристики при регулировании скорости ДПТ с НВ изменением напряжения цепи возбуждения.
- 17 Принцип действия синхронного двигателя (СД).
- 18 Конструкция синхронного двигателя (СД).
- 19 Механические характеристики при регулировании скорости СД.
- 20 Принцип действия асинхронного двигателя (АД).
- 21 Конструкция асинхронного двигателя (АД).
- 22 Механические характеристики АД при частотном регулировании скорости.
- 23 Механические характеристики АД при изменении напряжения статора.
- 24 Механические характеристики АД при изменении активного сопротивления ротора АД.
- 25 Варианты конструктивной реализации вентильного двигателя (ВД).
- 26 Устройство вентильно-индукторного двигателя (ВИД).
- 27 Механические характеристики при частотном регулировании скорости ВИД.
- 28 Шаговые двигатели (ШД).
- 29 Промышленные серии электродвигателей.
- 30 Классификация электродвигателей по способу монтажного исполнения.
- 31 Классификация электродвигателей по способу охлаждения.



- 32 Степени защиты оболочек электродвигателей.
- 33 Классификация электродвигателей по климатическому исполнению.

### ***1.5 Механические передачи в ЭМС***

Вопросы для самостоятельного изучения.

- 1 Общая классификация устройств механических передач ЭМС.
- 2 Редукторы и муфты, используемые в АЭП.
- 3 Механические соединения в составе ЭМС.
- 4 Цилиндрические зубчатые механические передачи.
- 5 Конические зубчатые механические передачи.
- 6 Червячные механические передачи.
- 7 Гипоидные механические передачи.
- 8 Цепная механическая передача.
- 9 Зуборемненные механические передачи.
- 10 Винтовая механическая передача.
- 11 Волновая механическая передача.
- 12 Планетарная механическая передача.
- 13 Реечная механическая передача.
- 14 Фрикционные механические передачи.
- 15 Ременные механические передачи.
- 16 Основные характеристики механических передач.
- 17 Коробка скоростей в механической передаче ЭМС.
- 18 Вариатор в механической передаче ЭМС.
- 19 Виды муфт в механических передачах АЭП.
- 20 Виды резьбовых соединений в составе АЭП.
- 21 Шпоночное соединение.

### ***1.6 Система управления АЭП***

Вопросы для самостоятельного изучения.

- 1 Общие сведения и классификация систем управления АЭП.
- 2 Основные функции подсистемы управления АЭП.
- 3 Основные функции информационной подсистемы АЭП.
- 4 Основные функции подсистемы сигнализации АЭП.
- 5 Основные функции исполнительной подсистемы АЭП.
- 6 Техническая реализация систем управления АЭП.
- 7 Основные структуры систем управления АЭП.
- 8 Понятие системы подчиненного регулирования.
- 9 Расчет последовательного корректирующего устройства.
- 10 Настройка последовательного регулятора на модульный оптимум.
- 11 Настройка последовательного регулятора на симметричный оптимум.
- 12 Основные показатели качества динамических систем АЭП.
- 13 Электромагниты в составе ЭМС.
- 14 Электромагнитные муфты в составе АЭП.

- 15 Электрический тормоз в составе АЭП.
- 16 Нагревательные элементы в составе АЭП.
- 17 Охладители в составе АЭП.
- 18 Сервопривода в составе ЭМС.
- 19 Электрическое реле в составе ЭМС.
- 20 Магнитные пускатели в составе ЭМС.
- 21 Контактторы в составе ЭМС.
- 22 Основные характеристики датчиков в составе ЭМС.
- 23 Выключатели и переключатели в составе ЭМС.
- 24 Автоматические выключатели в составе ЭМС.
- 25 Плавкие предохранители в составе ЭМС.
- 26 Электротепловые реле в составе ЭМС.
- 27 Арматура светосигнальная в составе ЭМС.
- 28 Арматура звукосигнальная в составе ЭМС.
- 29 Исполнительные элементы системы управления.
- 30 Датчики системы управления АЭП.
- 31 Основные управляющие устройства СУ АЭП.
- 32 Промышленные компьютеры в составе ЭМС.
- 33 Интерфейсы и сети систем управления АЭП.
- 34 Основные требования к системам управления ЭМС.

### ***1.7 Методология решения задач в области АЭП***

Вопросы для самостоятельного изучения.

- 1 Системный подход при рассмотрении ЭМС.
- 2 Жизненный цикл ЭМС.
- 3 Этапы проектирования ЭМС.
- 4 Исследование и опытно-конструкторские работы для ЭМС.
- 5 Техническое обслуживание ЭМС.
- 6 Ремонт ЭМС.
- 7 Особенности производства ЭМС.
- 8 Монтаж ЭМС.
- 9 Диагностика ЭМС.
- 10 Сертификация в ЭМС.
- 11 Эксплуатация ЭМС.
- 12 Утилизация ЭМС.
- 13 Согласование технического задания на проектирование ЭМС.
- 14 Этап технического проектирования ЭМС.
- 15 Этап эскизного проектирования ЭМС.
- 16 Этап разработки рабочей конструкторской документации ЭМС.
- 17 Методы анализа, применяемые при проектировании ЭМС.
- 18 Методы синтеза, применяемые при проектировании ЭМС.
- 19 Методы оптимизации, применяемые при проектировании ЭМС.
- 20 Метод экспертных оценок при проектировании ЭМС.
- 21 Общие принципы и методы решения задач анализа и синтеза ЭМС.

- 22 Основы диагностики состояния ЭМС.
- 23 Основные требования к надежности и безопасности ЭМС.
- 24 Основные требования к эргономичности ЭМС.
- 25 Основы математического моделирования ЭМС.
- 26 Основные принципы системного подхода.

## 2 Расчетные задания

В таблице 2.1 приведены варианты заданий. Номер варианта следует выбирать по последней и предпоследней цифрам шифра студента.

Таблица 2.1 – Выбор номера варианта

Предпоследняя цифра шифра	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1	11	21	6	16	25	15	5	20	10
1	2	12	22	7	17	24	14	4	19	9
2	3	13	23	8	18	23	13	3	18	8
3	4	14	24	9	19	22	12	2	17	7
4	5	15	25	10	20	21	11	1	16	6
5	6	16	1	11	21	20	10	25	15	5
6	7	17	2	12	22	19	9	24	14	4
7	8	18	3	13	23	18	8	23	13	3
8	9	19	4	14	24	17	7	22	12	2
9	10	20	5	15	25	16	6	21	11	1

### 2.1 Механические характеристики ДПТ с независимым возбуждением (НВ)

2.1.1 Расчет и построение естественной механической характеристики заданного электродвигателя. Исходные данные для расчёта характеристик ДПТ с НВ в соответствии с вариантами приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Исходные данные для расчёта ДПТ с НВ

Вариант	Тип двигателя	$P_{2н}$ , кВт	$U_{ян}/U_{вн}$ , В	Ток, А	$n_n/n_{max}$ , об/мин	КПД, %
1	2	3	4	5	6	7
1	4ПО80А2ГУХЛ4	0,25	220	1,8	1000/4000	58
2	4ПО80В1УХЛ4	0,37	220	2,4	1000/4000	65
3	4ПБ80А2ГУХЛ4	0,55	220	3,5	3000/4000	70
4	4ПБ80В1УХЛ4	0,80	220	4,6	3000/4000	79
5	4ПО100S1ГУХЛ4	1,1	220	6,4	2200/4000	73

Окончание таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6	7
6	4ПО100S2УХЛ4	1,5	220	8,7	2200/4000	73
7	4ПО100L1ГУХЛ4	2,2	220	12,7	2200/4000	74
8	4ПБ100S1УХЛ4	1,1	220	6,4	3000/4000	73
9	4ПБ100S2ГУХЛ4	1,5	220	8,3	3000/4000	77
10	4ПБ100L1УХЛ4	1,8	220	9,8	3000/4000	78
11	4ПО112M1ГУХЛ4	3,0	220	17,0	2200/4000	80
12	4ПО112M2УХЛ4	4,0	220	21,3	2200/4000	81
13	4ПБ112M1ГУХЛ4	2,2	220	12,0	3000/4000	79
14	4ПБ112M2УХЛ4	3,0	220	16,2	3000/4000	80
15	4ПФ132SГУХЛ4	7,5	440	22	670/4000	71
16	4ПФ132МУХЛ4	10	440	29,5	750/5000	73
17	4ПФ160SГУХЛ4	15	440	42,6	750/4000	76
18	4ПФ160ЛУХЛ4	25	440	62,4	800/4000	80
19	4ПФ200MГУХЛ4	41	220	223	2200/3500	82
20	4ПФ200ЛУХЛ4	33	220	191	1500/3500	78
21	4ПФ225MГУХЛ4	38	440/220	119	1400/2400	78
22	4ПФ225ЛУХЛ4	45	440/220	142	1250/2500	77
23	4ПФ225LГО4	41	440/220	127	1250/2500	76,5
24	4ПФ250МУХЛ4	80	440/220	234	2650/3000	84,5
25	4ПФ250LГУХЛ4	67	440/220	127	1250/2500	76,5

Порядок расчета.

1 Определение номинальной скорости вращения электродвигателя. Номинальная скорость вращения электродвигателя,  $\text{с}^{-1}$ , определяется по формуле

$$\omega_n = \frac{\pi}{30} n_n. \quad (2.1)$$

2 Расчет значения номинального момента на валу. Номинальный момент на валу, Н·м, рассчитывается по формуле

$$M_n = \frac{1000 \cdot P_{2n}}{\omega_n}. \quad (2.2)$$

3 Расчет номинального сопротивления электродвигателя. Сопротивление цепи ДПТ, Ом, определяется по формуле

$$R_n = \frac{U_{ян}}{I_n}. \quad (2.3)$$

4 Расчет номинального сопротивления якорной цепи. Сопротивление якорной цепи ДПТ, Ом, определяется по формуле

$$R_{ян} = 0,5R_n(100 - \eta_n)/100, \quad (2.4)$$

где  $\eta_n$  – номинальное значение КПД, %.

5 Расчет номинального значения конструктивного коэффициента. Расчет конструктивного коэффициента, В·с, выполняется по формуле

$$k\Phi_n = \frac{U_n - I_n \cdot R_{ян}}{\omega_n}. \quad (2.5)$$

6 Расчет значения скорости холостого хода. Расчет скорости холостого хода ДПТ,  $c^{-1}$ , выполняется по формуле

$$\omega_0 = \frac{U_{ян}}{k\Phi_n}. \quad (2.6)$$

7 Построение графика механической характеристики ДПТ. Механическая характеристика ДПТ имеет вид прямой линии в осях координат, где по оси абсцисс откладывается значение момента, а по оси ординат – значение скорости. Для построения характеристики определяют точку номинального режима работы двигателя со значениями  $M_n$  и  $\omega_n$ , а также точку холостого хода, расположенную на оси ординат в значении  $\omega_0$ . Пример механической характеристики ДПТ с НВ представлен на рисунке 2.1.

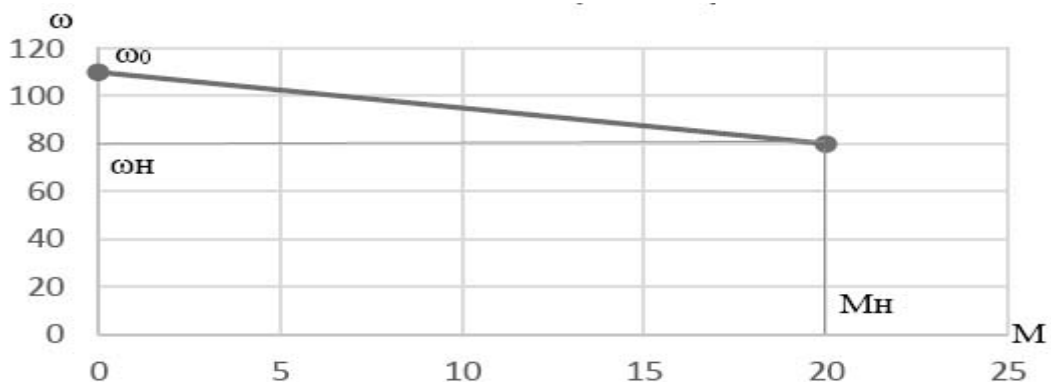


Рисунок 2.1 – Пример графика механической характеристики ДПТ с НВ

### 2.1.2 Расчет и построение искусственных механических характеристик ДПТ с НВ.

Скорость вращения ДПТ с НВ определяется по формуле

$$\omega = \frac{U_{я}}{k\Phi} - \frac{R_{ян} + R_{\partial}}{(k\Phi)^2} M, \quad (2.7)$$

где  $U_{я}$  – напряжение на обмотке якоря (ОЯ);

$M$  – электромагнитный момент;

$\Phi$  – магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения;

$R_{ян}$  – сопротивление якорной цепи;

$R_{\partial}$  – внешнее добавочное сопротивление, подключаемое последовательно с ОЯ;

$k$  – конструктивный коэффициент ДПТ.

Из уравнения электромеханической характеристики ДПТ с НВ следует, что возможны три способа регулирования его угловой скорости:

1) регулирование за счет изменения величины сопротивления реостата в цепи якоря;

2) регулирование за счет изменения потока возбуждения двигателя  $\Phi$ ;

3) регулирование за счет изменения подводимого к обмотке якоря двигателя напряжения  $U_{я}$ .

Ток в цепи якоря  $I_{я}$  и момент  $M$ , развиваемый двигателем, зависят только от величины нагрузки на его валу.

**Расчет и построение искусственных механических характеристик ДПТ с НВ при изменении сопротивления в цепи якоря.**

Для построения трех искусственных механических характеристик в уравнение (2.7) следует подставить значения внешних добавочных сопротивлений  $R_{\partial}$ , равные  $4R_{ян}$ ,  $8R_{ян}$ ,  $12R_{ян}$ , и определить  $\omega$  при номинальном моменте двигателя. Согласно уравнению (2.6)  $\omega_0$  не зависит от величины внешнего добавочного сопротивления, и для всех характеристик эта величина постоянна. На рисунке 2.2 представлены искусственные механические характеристики ДПТ при изменении внешнего добавочного сопротивления в цепи якоря.

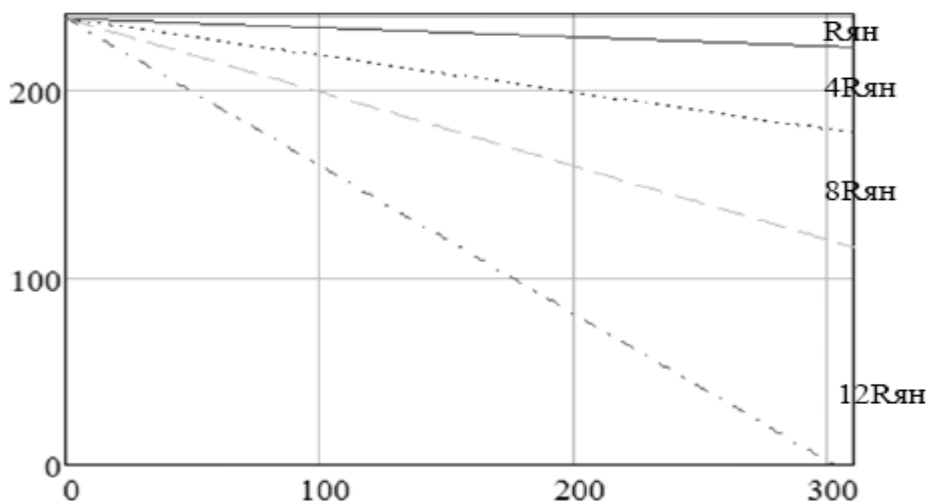


Рисунок 2.2 – Механические характеристики ДПТ при изменении сопротивления

**Расчет и построение искусственных механических характеристик ДПТ с НВ при изменении потока обмотки возбуждения.** При способе регулирования угловой скорости ДПТ с НВ осуществляется изменением величины магнитного потока  $\Phi$  за счет уменьшения напряжения возбуждения,

так как при увеличении напряжения фактически не происходит существенного повышения потока возбуждения из-за насыщения магнитной системы. При ослаблении потока угловая скорость холостого хода двигателя  $\omega_0$  возрастает.

Для построения трех искусственных механических характеристик в уравнение (2.7) следует подставить значения величины магнитного потока  $\Phi$ , равные  $\Phi_{вн}$ ,  $0,5\Phi_{вн}$ ,  $0,25\Phi_{вн}$ , и определить  $\omega$  при номинальном моменте двигателя. Значение скорости холостого хода  $\omega_0$  определяется по формуле (2.6). На рисунке 2.3 представлены механические характеристики ДПТ при регулировании потока  $\Phi$ .

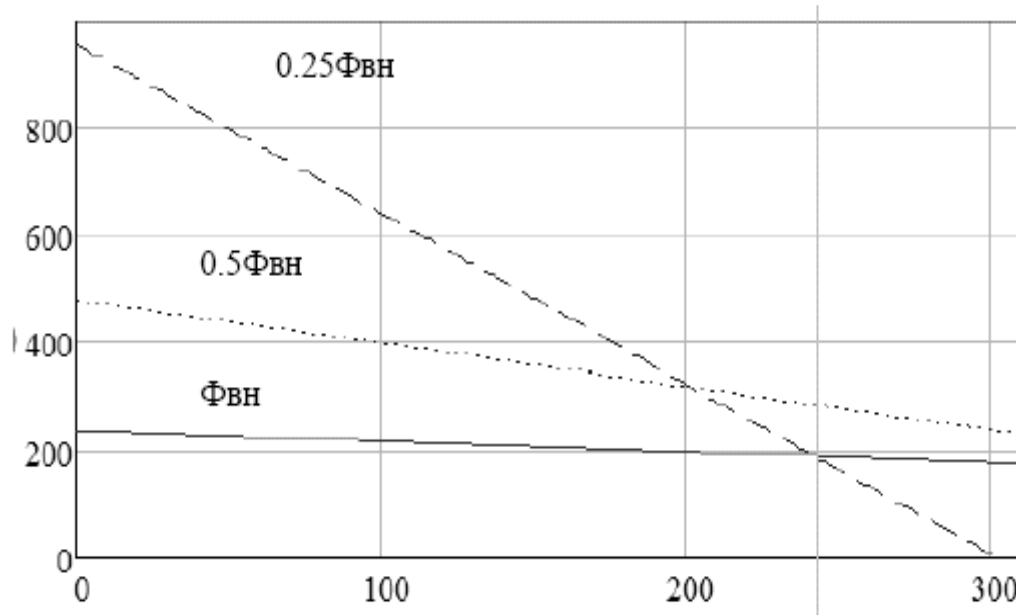


Рисунок 2.3 – Механические характеристики ДПТ при регулировании потока  $\Phi$

**Расчет и построение искусственных механических характеристик ДПТ с НВ при изменении напряжения обмотки якоря.** Этот способ регулирования скорости выполняется изменением напряжения, подводимого к обмотке цепи якоря ДПТ с НВ. Угловая скорость двигателя постоянного тока изменяется прямо пропорционально напряжению, подводимому к якорю.

Для построения четырех искусственных механических характеристик в уравнение (2.7) следует подставить значения напряжения  $U_{ян}$ , равные  $U_{ян}$ ,  $0,75 U_{ян}$ ,  $0,5 U_{ян}$ ,  $0,25 U_{ян}$  и определить  $\omega$  при номинальном моменте двигателя. Значение скорости холостого хода  $\omega_0$  определяется по формуле (2.6). На рисунке 2.4 представлены механические характеристики ДПТ при изменении напряжения обмотки якоря.

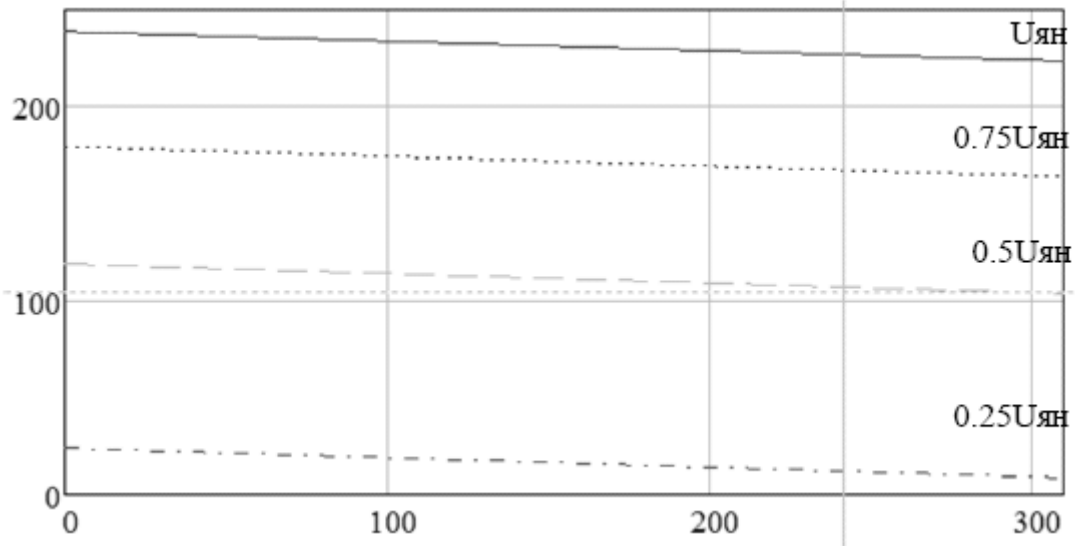


Рисунок 2.4 – Механические характеристики ДПТ с НВ при изменении  $U_{я}$

## 2.2 Механические характеристики асинхронного двигателя (АД)

2.2.1 Расчет и построение естественной механической характеристики АД. Исходные данные для расчёта характеристик АД в соответствии с вариантами приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Исходные данные для расчёта АД

Вариант	Тип электродвигателя	$P_{2н}$ , кВт	$I_{1н}$ , А	$n_n$ , об/мин	КПД, %	$\cos\varphi$	$\lambda_{к}$	$i_n$	$n_{max}$ , об/мин
1	АДЧР132М2У3	11	21,4	2905	89,4	0,88	3,5	7,5	4000
2	АДЧР160S2У3	15	30,0	2945	88,7	0,86	3,2	7,7	4000
3	АДЧР180М2У3	30	56	2940	92	0,88	3,5	7,8	4000
4	АДЧР200L2У3	45	81	2940	93,5	0,88	4,0	8,0	4000
5	АДЧР225М2У3	55	102	2955	93,1	0,88	4,0	7,5	4000
6	АДЧР250S2У3	75	137	2965	93,7	0,89	4,0	7,9	4000
7	АДЧР280М2У3	132	236	2964	94,6	0,90	3,5	8,5	4000
8	АДЧР315S2У3	160	294	2977	95,1	0,87	3,3	7,5	3600
9	АДЧР315МВ2У3	250	446	2978	95,5	0,89	3,1	7,1	3600
10	АДЧР132М4У3	11	23	1440	88,0	0,84	3,3	7,5	3000
11	АДЧР160S4У3	15	31	1465	89,0	0,84	3,1	7,3	3000
12	АДЧР180М4У3	30	57	1460	91,6	0,88	3,0	7,6	3000
13	АДЧР200L4У3	45	86	1460	92,5	0,88	3,2	7,0	3000
14	АДЧР225М4У3	55	105	1475	92,5	0,87	3,7	7,8	3000
15	АДЧР250S4У3	75	139	1470	93,0	0,89	3,2	7,0	3000
16	АДЧР280S4У3	110	201	1475	94,2	0,90	3,0	8,0	3000
17	АДЧР315М4У3	200	378	1480	95,7	0,87	3,3	7,4	3000
18	АДЧР160S6У3	11	24	970	86,7	0,82	2,9	6,5	2000



Окончание таблицы 2.3

Вариант	Тип электродвигателя	$P_{2n}$ , кВт	$I_{1n}$ , А	$n_n$ , об/мин	КПД, %	$\cos\varphi$	$\lambda_k$	$i_n$	$n_{\max}$ , об/мин
19	АДЧР180М6У3	18,5	37	970	89,5	0,85	3,0	6,0	2000
20	АДЧР200L6У3	30	60	983	90,6	0,84	3,0	7,0	2000
21	АДЧР225М6У3	37	71	980	91,6	0,86	3,0	6,5	2000
22	АДЧР250S6У3	45	86	985	91,9	0,87	2,8	7,0	2000
23	АДЧР280М6У3	90	165	990	93,5	0,89	3,2	7,7	2000
24	АДЧР315S6У3	110	199	990	94,6	0,89	2,5	7,0	2000
25	АДЧР315М6У3	132	237	990	94,9	0,90	2,8	7,7	2000

Порядок расчета.

1 Определение номинальной скорости вращения электродвигателя. Номинальная скорость вращения электродвигателя,  $c^{-1}$ , определяется по формуле

$$\omega_n = \frac{\pi}{30} n_n. \quad (2.8)$$

2 Расчет значения номинального момента на валу. Номинальный момент, Н·м, на валу рассчитывается по формуле

$$M_n = \frac{1000 \cdot P_{2n}}{\omega_n}. \quad (2.9)$$

3 Расчет номинального сопротивления электродвигателя. Максимальный (критический) момент АД, Н·м, определяется по формуле

$$M_k = \lambda_k \cdot M_n. \quad (2.10)$$

4 Определение синхронной частоты вращения магнитного поля статора. Синхронная частота вращения магнитного поля АД, об/мин, определяется на основе данных частоты питающей сети  $f_c$  и числа пар полюсов статора  $p_n$  по формуле

$$n_0 = \frac{60 f_c}{p_n}. \quad (2.11)$$

5 Расчет синхронной скорости АД. Синхронная скорость (скорость идеального холостого хода) АД,  $c^{-1}$ , определяется на основе синхронной частоты по формуле

$$\omega_0 = \frac{\pi}{30} n_0. \quad (2.12)$$

6 Расчет пускового тока статора электродвигателя. Расчет пускового тока статора,  $A$ , выполняется по формуле

$$I_n = I_{1n} \cdot i_n. \quad (2.13)$$

7 Расчет номинального скольжения. Значение номинального скольжения асинхронного определяется по формуле

$$s_n = (n_0 - n_n) / n_0. \quad (2.14)$$

8 Расчет значения критического скольжения. Расчет значения критического скольжения, которое соответствует значению критического (максимального) момента, приближенно определяется по формуле

$$s_k = s_n (\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1}). \quad (2.15)$$

9 Расчет значения критической скорости АД. Значение критической скорости соответствует критическому скольжению АД, при этом на валу двигателя развивается максимальное значение момента. Значение скорости,  $c^{-1}$ , определяется из скольжения по формуле

$$\omega_k = \omega_0 (1 - s_k). \quad (2.16)$$

10 Построение графика механической характеристики АД. Механическая характеристика АД упрощенно определяется по формуле Клосса при изменении значения скольжения  $s$  от 0 (скорость идеального холостого хода) до 1 (останов или пуск):

$$M(s) = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}. \quad (2.17)$$

Значение частоты вращения также определяется по аналогичным данным скольжения по формуле

$$\omega(s) = \omega_0 (1 - s). \quad (2.18)$$

Полученные данные строятся в виде таблицы с колонками скольжения  $s$ , момента  $M$  и скорости  $\omega$ . Далее строится естественная механическая характеристика АД  $\omega = f(M)$ , у которой по оси абсцисс откладывается значение момента, а по оси ординат – скорости.

На рисунке 2.5 представлена естественная механическая характеристика АД.

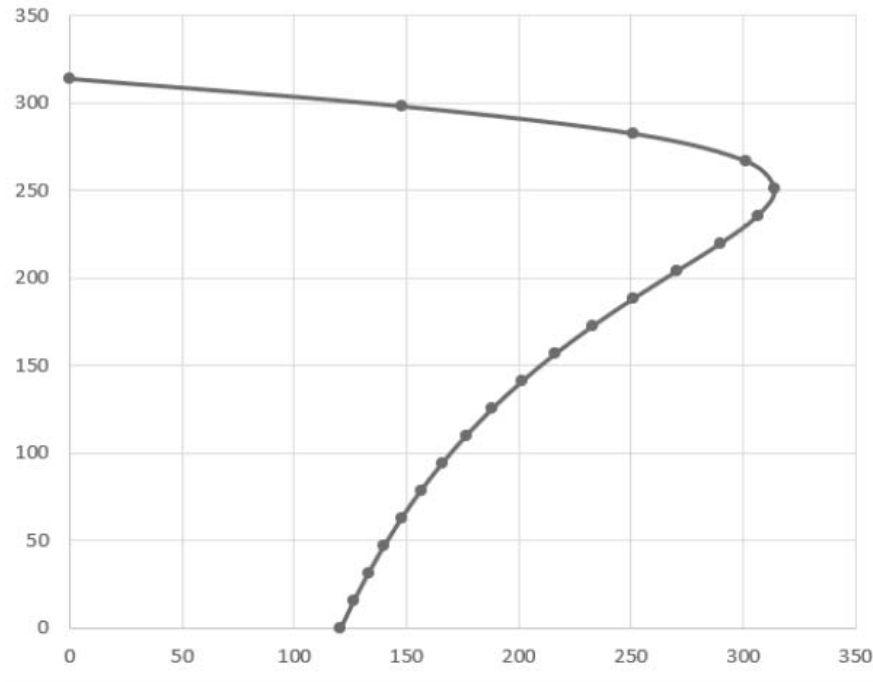


Рисунок 2.5 – Естественная механическая характеристика АД

### 2.2.2 Регулирование скорости АД с КЗ ротором напряжением статора.

При таком способе регулирования скорости статор АД с КЗ ротором подключается к тиристорному регулятору напряжения (ТРН). ТРН изменяет напряжение статора  $U_1$  при постоянной частоте  $f_1 = f_{1н} = \text{const}$ . Уравнение механической характеристики АД при регулировании напряжения статора имеет вид (2.17) и (2.18). Критический момент при таком регулировании будет снижаться пропорционально квадрату напряжения  $U_{12}$ , критическое скольжение  $s_k$  останется неизменным. На рисунке 2.6 представлены схема и искусственные характеристики АД при изменении напряжения статора.

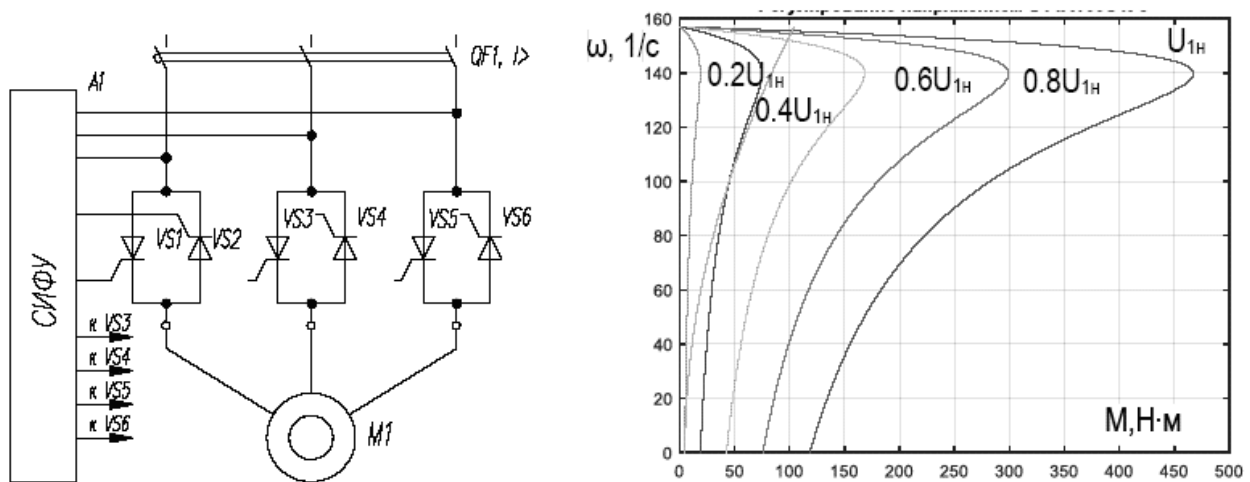


Рисунок 2.6 – Схема и характеристики АД при изменении напряжения статора

### 2.2.3 Частотное регулирование скорости АД с КЗ ротором.

Самый распространённый способ регулирования скорости АД, выполняемый подключением обмотки статора к выходам преобразователя частоты. На рисунке 2.7 представлены схема частотного регулирования и искусственные характеристики АД с КЗ ротором.

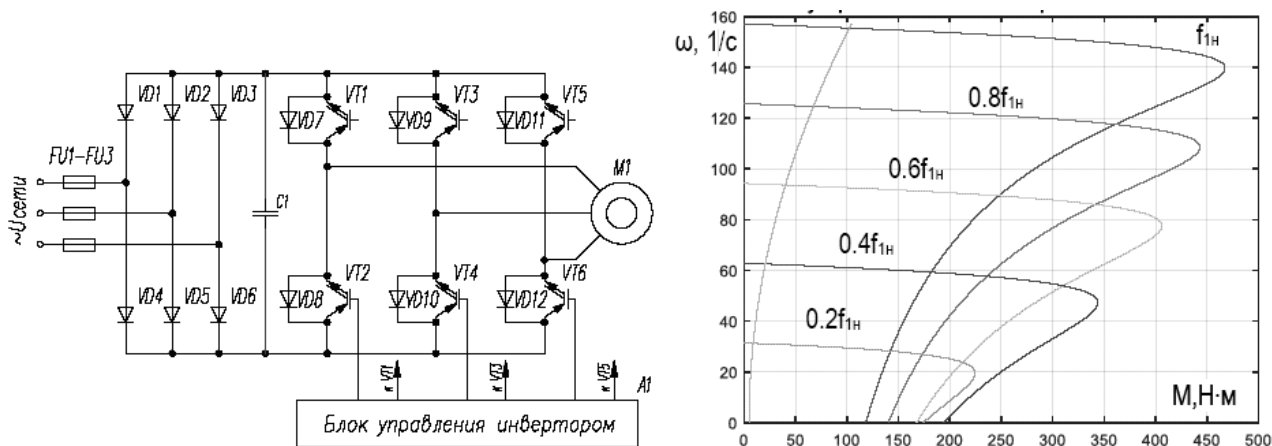


Рисунок 2.7 – Схема частотного регулирования и механические характеристики АД

### 2.2.4 Регулирование скорости АД с фазным ротором введением сопротивления в цепь ротора.

Фазный ротор обеспечивает дополнительный канал, по которому можно воздействовать на двигатель – за счет изменения параметров цепи ротора. При этом самым простым способом регулирования скорости вращения АД с ФР является изменение активного сопротивления цепи ротора за счет подключения дополнительных внешних резисторов в каждую фазу ротора. Схема и искусственные характеристики имеют вид регулирования скорости вращения АД с ФР, представленный на рисунке 2.8.

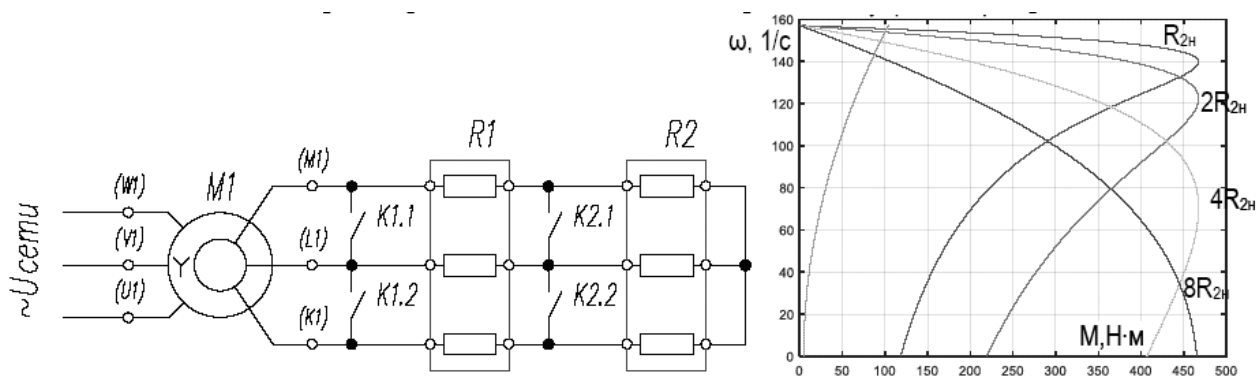


Рисунок 2.8 – Схема и характеристики реостатного регулирования в цепи ротора АД

## Список литературы

- 1 **Епифанов, А. П.** Электромеханические преобразователи энергии: учебное пособие для вузов / А. П. Епифанов. – Санкт-Петербург: Лань, 2004. – 208 с.
- 2 **Ильинский, Н. Ф.** Основы электропривода: учебное пособие / Н. Ф. Ильинский. – 3-е изд., стер. – Москва : МЭИ, 2007. – 224 с.
- 3 **Кацман, М. М.** Электрические машины: учебник для вузов / М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – Москва : Академия, 2006. – 496 с.
- 4 **Москаленко, В. В.** Электрический привод : учебник / В. В. Москаленко. – Москва : ИНФРА-М, 2019. – 364 с.
- 5 **Электротехнический справочник:** в 4 т. Т. 1: Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В. Г. Геращенко [и др.]. – 9-е изд., стер. – Москва : МЭИ, 2003. – 440 с.
- 6 **Электротехнический справочник:** в 4 т. / Под общ. ред. В. Г. Геращенко [и др.]. – 9-е изд., стер. – Москва : МЭИ, 2003. – Т. 2. – 518 с.
- 7 **Электротехнический справочник:** в 4 т. / Под общ. ред. В. Г. Геращенко [и др.]. – 9-е изд., стер. – Москва : МЭИ, 2004. – Т. 3. – 964 с.
- 8 **Электротехнический справочник:** в 4 т. / Под общ. ред. В. Г. Геращенко [и др.]. – 9-е изд., стер. – Москва : МЭИ, 2004. – Т. 4. – 696 с.
- 9 **Онищенко, Г. Б.** Электрический привод: учебник / Г. Б. Онищенко. – Москва : Академия, 2008. – 288 с.