

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие ко второму изданию . . . . .	10
Предисловие к первому изданию . . . . .	12
<b>Глава 1. Введение . . . . .</b>	<b>14</b>
1.1. Электроприводы . . . . .	14
1.2. Преимущества электроприводов . . . . .	15
1.3. Элементы электроприводов . . . . .	16
1.3.1. Электродвигатели . . . . .	17
1.3.2. Электромодуляторы . . . . .	18
1.3.3. Источники . . . . .	24
1.3.4. Блок управления . . . . .	25
1.4. Выбор электроприводов . . . . .	25
1.5. Электроприводы постоянного и переменного тока сегодня . . . . .	25
Задачи . . . . .	26
<b>Глава 2. Динамика электроприводов . . . . .</b>	<b>27</b>
2.1. Фундаментальные уравнения вращающего момента . . . . .	27
2.2. Отношения скорости и вращающего момента и мультисекторное действие . . . . .	28
2.3. Эквивалентные значения параметров двигателя . . . . .	31
2.3.1. Нагрузка с вращательным движением . . . . .	31
2.3.2. Нагрузка с поступательным движением . . . . .	32
2.3.3. Измерение момента инерции . . . . .	34
2.4. Компоненты нагружающего момента . . . . .	35
2.5. Характер и классификация нагружающего момента . . . . .	37
2.6. Вычисление потерь времени и энергии при работе в неустановившемся режиме . . . . .	39
2.7. Стабильность установившегося режима . . . . .	41
2.8. Уравнивание нагрузки . . . . .	43
Задачи . . . . .	47
<b>Глава 3. Управление электроприводами . . . . .</b>	<b>51</b>
3.1. Режимы работы . . . . .	51
3.2. Классификации регуляторов скорости и приводов . . . . .	54
3.3. Замкнутая система управления приводами . . . . .	55
3.3.1. Регулировка тока . . . . .	55
3.3.2. Замкнутая система регулировки вращающего момента . . . . .	56
3.3.3. Замкнутая система регулировки скорости . . . . .	56
3.3.4. Замкнутая система регулировки скорости многодвигательных электроприводов . . . . .	58
3.3.5. Измерение скорости . . . . .	61

3.3.6. Измерение тока . . . . .	62
3.3.7. Система фазовой автоматической подстройки частоты . . . . .	63
3.3.8. Замкнутая система позиционного регулирования . . . . .	64
Задачи . . . . .	65
<b>Глава 4. Выбор номинальной мощности двигателя . . . . .</b>	<b>66</b>
4.1. Термическая модель двигателя для нагрева и охлаждения . . . . .	67
4.2. Классификация режимов двигателей . . . . .	70
4.3. Определение характеристик двигателя . . . . .	72
4.3.1. Непрерывный режим . . . . .	73
4.3.2. Эквивалентные методы поставки тока, вращающего момента и питания для переменной и прерывистой нагрузки . . . . .	73
4.3.3. Кратковременный режим . . . . .	77
4.3.4. Неустойчивый периодический режим . . . . .	78
4.3.5. Частота работы двигателей при прерывистой нагрузке . . . . .	81
Задачи . . . . .	82
<b>Глава 5. Вращательные электроприводы постоянного тока . . . . .</b>	<b>84</b>
5.1. Двигатели постоянного тока и их работа . . . . .	84
5.1.1. Электродвигатели параллельного и независимого возбуждения . . . . .	85
5.1.2. Электродвигатель с последовательным возбуждением . . . . .	86
5.1.3. Электродвигатель постоянного тока смешанного возбуждения . . . . .	89
5.1.4. Универсальный электродвигатель . . . . .	89
5.1.5. Электродвигатели с постоянными магнитами . . . . .	90
5.1.6. Серводвигатели переменного тока . . . . .	91
5.1.7. Двигатели с вращающейся катушкой . . . . .	91
5.1.8. Электродвигатели с большим пусковым моментом . . . . .	93
5.2. Пуск . . . . .	93
5.3. Торможение . . . . .	94
5.3.1. Рекуперативное торможение . . . . .	94
5.3.2. Динамическое торможение . . . . .	95
5.3.3. Торможение электродвигателя противовключением . . . . .	100
5.4. Анализ переходных процессов . . . . .	102
5.4.1. Анализ переходных процессов электродвигателя с независимым возбуждением с управлением якорем . . . . .	103
5.4.2. Анализ переходных процессов пуска электродвигателя с независимым возбуждением с управлением якорем . . . . .	104
5.4.3. Анализ переходных процессов динамического торможения электродвигателя с независимым возбуждением . . . . .	106
5.4.4. Потери энергии при работе в неустановившемся режиме . . . . .	108
5.4.5. Анализ переходных процессов электродвигателя с независимым возбуждением с регулированием возбуждения . . . . .	111
5.5. Регулирование скорости . . . . .	116
5.6. Методы регулирования напряжения якоря . . . . .	121
5.7. Электропривод постоянного тока системы генератор-двигатель . . . . .	121
5.8. Управление трансформатором и нерегулируемым выпрямителем . . . . .	126
5.9. Двигатели постоянного тока с питанием от регулируемого выпрямителя . . . . .	127

5.10. Управление однофазным полностью регулируемым выпрямителем электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением . . . . .	129
5.11. Управление однофазным наполовину регулируемым выпрямителем электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением . . . . .	139
5.12. Управление трехфазным полностью регулируемым выпрямителем электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением . . . . .	143
5.13. Управление трехфазным полурегулируемым выпрямителем электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением . . . . .	145
5.14. Мультисекторная работа электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением с питанием от полностью регулируемого выпрямителя . . . . .	146
5.14.1. Один полностью регулируемый выпрямитель с переключателем полярности . . . . .	147
5.14.2. Двойной преобразователь . . . . .	148
5.14.3. Реверсирование тока возбуждения . . . . .	149
5.14.4. Сравнение обычной и статичной схем электропривода постоянного тока системы генератор–двигатель . . . . .	151
5.15. Управление выпрямителем электродвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением . . . . .	152
5.16. Управление маломощными электродвигателями . . . . .	153
5.17. Гармоника питания, коэффициент мощности и колебания тока двигателя . . . . .	154
5.18. Двигатели постоянного тока, управляемые прерывателем . . . . .	156
5.19. Управление прерывателем электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением . . . . .	156
5.20. Управление прерывателем электродвигателя с последовательным возбуждением . . . . .	162
5.21. Гармоники тока источника питания в прерывателях . . . . .	166
5.22. Характеристики преобразователя и замкнутая система управления . . . . .	167
Задачи . . . . .	169

<b>Глава 6. Асинхронные электроприводы . . . . .</b>	<b>177</b>
6.1. Трехфазные асинхронные электроприводы . . . . .	177
6.1.1. Анализ и работа . . . . .	177
6.1.2. Асинхронные электроприводы особого устройства . . . . .	180
6.2. Работа при несбалансированном напряжении источника и однофазный режим работы . . . . .	182
6.3. Работа при несбалансированном полном сопротивлении ротора . . . . .	187
6.4. Анализ асинхронного электропривода с питанием от источника несинусоидального напряжения . . . . .	188
6.5. Пуск . . . . .	191
6.5.1. Пусковой переключатель со звезды на треугольник . . . . .	192
6.5.2. Пусковой автотрансформатор . . . . .	192
6.5.3. Пуск электродвигателя через автотрансформатор . . . . .	192
6.5.4. Реакторный пускатель электродвигателя . . . . .	193
6.5.5. Плавный пуск помощи насыщающегося реакторного пускателя . . . . .	194
6.5.6. Несбалансированная схема для плавного пуска . . . . .	194

6.5.7. Пуск электродвигателя с использованием части обмотки . . . . .	195
6.5.8. Устройство для пуска электродвигателя с помощью резистора в цепи ротора . . . . .	195
6.6. Торможение . . . . .	198
6.6.1. Рекуперативное торможение . . . . .	198
6.6.2. Торможение электродвигателя противовключением или обратным напряжением . . . . .	201
6.6.3. Динамическое (или реостатное) торможение . . . . .	204
6.7. Анализ переходных процессов . . . . .	215
6.7.1. Пуск и торможение противовключением . . . . .	216
6.7.2. Вычисление потерь энергии . . . . .	217
6.8. Регулирование скорости . . . . .	220
6.9. Переключение полюсов . . . . .	220
6.10. Амплитудная модуляция полюсов . . . . .	223
6.11. Регулирование напряжения статора . . . . .	226
6.11.1. Регулирование контроллерами переменного напряжения и плавным включением . . . . .	226
6.12. Регулирование частоты источников питания . . . . .	229
6.12.1. Регулирование переменной частоты асинхронного электропривода . . . . .	229
6.12.2. Регулирование скорости проскальзывания . . . . .	233
6.12.3. Ограничения вращающего момента и мощности и режимы работы . . . . .	
6.13. Управление инвертором источника напряжения . . . . .	
6.13.1. Асинхронные электроприводы с инвертором источника напряжения . . . . .	236
6.13.2. Торможение и мультисекторная работа асинхронного электропривода с инвертором источника напряжения . . . . .	239
6.14. Регулирование понижающим преобразователем частоты . . . . .	243
6.15. Замкнутая система регулирования скорости и характеристики преобразователя для инвертора источника напряжения и асинхронные электроприводы с понижающим преобразователем частоты . . . . .	244
6.16. Регулирование частоты источника тока . . . . .	252
6.17. Регулирование инвертором источника тока . . . . .	253
6.17.1. Рекуперативное торможение и мультисекторная работа . . . . .	255
6.17.2. Замкнутая система регулирования скорости двигателя с инвертором источника тока . . . . .	256
6.17.3. Сравнение двигателей с инвертором источника тока и инвертором источника напряжения . . . . .	257
6.18. Управление инвертором источника напряжения с регулированием тока . . . . .	260
6.19. Электромагнитный двигатель . . . . .	261
6.20. Регулирование сопротивления ротора . . . . .	263
6.20.1. Обычные методы . . . . .	264
6.20.2. Статическое регулирование сопротивления ротора . . . . .	265
6.21. Восстановление мощности скольжения . . . . .	268
6.21.1. Машина Шербиуса . . . . .	269
6.21.2. Машина Крамера . . . . .	272
6.22. Получение регулируемой скорости при постоянной частоте . . . . .	278
6.22.1. Схемы короткозамкнутой асинхронной электрической машины и понижающего преобразователя частоты . . . . .	278

6.22.2. Схемы асинхронного электродвигателя с фазным ротором и понижающего преобразователя частоты . . .	279
6.23. Однофазные асинхронные электроприводы. . . . .	279
6.24. Способы пуска и типы однофазных асинхронных электроприводов. . . . .	282
6.24.1. Двигатели с расщепленной фазой. . . . .	282
6.24.2. Асинхронные электродвигатели с конденсаторной работой . . . . .	283
6.24.3. Асинхронные электродвигатели с конденсаторным пуском . . . . .	283
6.24.4. Асинхронные электродвигатели с конденсаторным пуском и работой. . . . .	284
6.24.5. Электродвигатель с расщепленными полюсами. . . . .	285
6.25. Торможение однофазных асинхронных электроприводов. . . . .	286
6.26. Регулирование скорости однофазных асинхронных электроприводов. . . . .	287
6.27. Линейный асинхронный электродвигатель и его управление	289
Задачи . . . . .	290

## **Глава 7. Синхронные и бесщеточные электродвигатели постоянного тока . . .**

7.1. Синхронные электродвигатели . . . . .	298
7.1.1. Электродвигатель с обмоткой возбуждения и цилиндрическим ротором . . . . .	300
7.1.2. Явнополюсный электродвигатель с обмоткой возбуждения . . . . .	305
7.1.3. Двигатель с постоянными магнитами . . . . .	306
7.1.4. Синхронный реактивный электродвигатель. . . . .	306
7.1.5. Демпферная обмотка . . . . .	306
7.1.6. Гистерезисный синхронный электродвигатель. . . . .	306
7.1.7. Индукторный электродвигатель . . . . .	307
7.2. Работа от источника фиксированной частоты . . . . .	308
7.2.1. Пуск . . . . .	308
7.2.2. Вхождение в синхронизм . . . . .	309
7.2.3. Нестационарность из-за нарушения нагрузки . . . . .	310
7.2.4. Торможение . . . . .	311
7.3. Синхронный электродвигатель с регулированием частоты вращения . . . . .	312
7.3.1. Регулирование частоты. . . . .	312
7.3.2. Способы регулирования переменной частоты . . . . .	313
7.4. Регулирование частоты составных синхронных электродвигателей . . . . .	313
7.5. Самоуправляемый синхронный электродвигатель с тиристорным инвертором с естественной коммутацией. . . . .	317
7.6. Пуск больших синхронных электрических машин . . . . .	325
7.7. Самоуправляемый синхронный электродвигатель с понижающим преобразователем частоты. . . . .	325
7.8. Двигатель переменного тока с постоянными магнитами. . . . .	326
7.9. Синусоидальный двигатель переменного тока с постоянными магнитами . . . . .	327
7.9.1. Синусоидальный двигатель переменного тока с постоянными магнитами с питанием от инвертора источника напряжения с регулировкой тока . . . . .	329
7.10. Бесщеточный электродвигатель постоянного тока (или трапециевидный двигатель переменного тока с постоянными магнитами). . . . .	330

7.10.1. Бесщеточный электродвигатель постоянного тока для сервомоторов . . . . .	331
7.10.2. Дешевые бесщеточные электродвигатели постоянного тока . . . . .	334
7.10.3. Важные особенности и применения . . . . .	337
Задачи . . . . .	338
<b>Глава 8. Шаговые и коммутируемые реактивные электродвигатели . . . . .</b>	<b>341</b>
8.1. Шаговые двигатели . . . . .	341
8.1.1. Коммутируемый реактивный . . . . .	342
8.1.2. С постоянными магнитами . . . . .	345
8.1.3. Важные особенности шаговых двигателей . . . . .	348
8.1.4. Характеристики вращающего момента и частоты вращения шагового двигателя . . . . .	348
8.1.5. Задающая схема для шаговых двигателей . . . . .	349
8.2. Коммутируемый реактивный электродвигатель или двигатель с регулируемым магнитным сопротивлением . . . . .	352
8.2.1. Требования работы и управления . . . . .	353
8.2.2. Схемы преобразователя . . . . .	357
8.2.3. Режимы работы . . . . .	358
Задачи . . . . .	361
<b>Глава 9. Двигатели на солнечных батареях или аккумуляторах . . . . .</b>	<b>362</b>
9.1. Солнечные (или фотоэлектрические) панели . . . . .	362
9.2. Двигатели, подходящие для привода насоса . . . . .	363
9.3. Приводы насоса на солнечных батареях . . . . .	364
9.4. Транспортные средства на аккумуляторах . . . . .	369
9.5. Электрические наземные и водные транспортные средства на солнечной энергии . . . . .	371
Задачи . . . . .	371
<b>Глава 10. Тяговые двигатели . . . . .</b>	<b>372</b>
10.1. Электрические транспортные средства . . . . .	372
10.1.1. Электрические поезда . . . . .	372
10.1.2. Троллейбусы, трамваи и электрические вагонетки . . . . .	375
10.2. Природа тяговой нагрузки . . . . .	375
10.2.1. Коэффициент сцепления ( $C_A$ ) . . . . .	376
10.2.2. Рабочий цикл тягового двигателя . . . . .	379
10.2.3. Распределение нагрузки между тяговыми двигателями . . . . .	380
10.3. Конфигурации поездов магистральной линии и пригородных поездов . . . . .	381
10.3.1. Различия устройства поездов магистральной линии и пригородных поездов . . . . .	381
10.3.2. Приводная ось локомотивов . . . . .	382
10.4. Торможение . . . . .	382
10.5. Коэффициент мощности и гармоника . . . . .	384
10.6. Вычисления характеристик тягового двигателя и потребления энергии . . . . .	384
10.6.1. Тяговое усилие и характеристики двигателя . . . . .	386
10.6.2. Удельное энергопотребление . . . . .	388
10.6.3. Максимально допустимое тяговое усилие . . . . .	390
10.7. Важные особенности тягового двигателя . . . . .	397
10.8. Тяговые электродвигатели . . . . .	398

10.8.1. Двигатели, используемые при тяге . . . . .	398
10.8.2. Управление тяговыми двигателями . . . . .	399
10.9. Тяговые приводы . . . . .	400
10.10. Обычные тяговые электроприводы постоянного и переменного тока . . . . .	401
10.10.1. Тяговые электроприводы постоянного тока с регулированием сопротивления . . . . .	401
10.10.2. Тяговый электропривод переменного тока 25 кВ, 50 Гц с переключением ответвлений обмотки трансформатора . . . . .	404
10.11. Двигатели, управляемые полупроводниковым преобразователем . . . . .	406
10.12. Тяговый электропривод переменного тока 25 кВ с двигателем постоянного тока, управляемым полупроводниковым преобразователем . . . . .	407
10.13. Тяговый электропривод постоянного тока с двигателем постоянного тока с полупроводниковым прерывателем . . .	412
10.14. Многофазные двигатели переменного тока для тяговых электроприводов . . . . .	415
10.15. Тяговые электроприводы постоянного тока с многофазными двигателями переменного тока . . . . .	415
10.15.1. Асинхронный электропривод с инвертором источника напряжения и широтно-импульсным модулятором. . . . .	416
10.15.2. Синхронный электропривод с питанием от инвертора с естественной коммутацией . . . . .	417
10.16. Тяговые электроприводы переменного тока с многофазными двигателями переменного тока . . . . .	419
10.16.1. Асинхронный электропривод с короткозамкнутым ротором и инвертором источника тока . . . . .	419
10.16.2. Асинхронный электропривод с короткозамкнутым ротором, инвертором источника напряжения и широтно-импульсным модулятором. . . . .	420
10.16.3. Синхронный электропривод с инвертором с естественной коммутацией. . . . .	423
10.17. Дизель-электрический тяговый привод . . . . .	423
10.17.1. Электродвигатель постоянного тока с последовательным возбуждением с питанием от генератора постоянного тока с приводом от дизельного двигателя . . . . .	424
10.17.2. Электродвигатель постоянного тока с питанием от трехфазного генератора переменного тока с приводом от дизельного двигателя . . . . .	426
10.17.3. Асинхронный электродвигатель с короткозамк- нутым ротором с питанием от синхронного гене- ратора переменного тока с приводом от дизель- ного двигателя через диодный мост и инвертор. . .	427
Задачи . . . . .	428
<b>Глава 11. Сохранение энергии в электроприводах . . . . .</b>	<b>432</b>
11.1. Потери в электроприводе . . . . .	432
11.2. Способы сохранения энергии в электроприводах . . . . .	433
11.3. Применение эргономичных полупроводниковых преобразователей . . . . .	433

11.3.1. Замена реостатных регуляторов . . . . .	433
11.3.2. Замена электромагнитных муфт сцепления . . . . .	434
11.3.3. Замена электроприводов постоянного тока системы генератор-двигатель . . . . .	434
11.4. Применение эргономичных двигателей. . . . .	435
11.5. Применение электродвигателей с регулированием частоты вращения. . . . .	435
11.6. Эргономичная работа двигателей . . . . .	436
11.7. Увеличение коэффициента мощности. . . . .	438
11.8. Применение двигателя с хорошими характеристиками . . . .	442
11.9. Улучшение качества питания . . . . .	442
11.10. Применение однофазных и трехфазных полупроводни- ковых преобразователей в сельской местности . . . . .	443
11.11. Регулярное и профилактическое обслуживание двигателей, трансформаторов и парного оборудования . . .	443
Задачи . . . . .	444
<b>Глава 12. Системы электроприводов и их элементы . . . . .</b>	<b>445</b>
12.1. Системы электроприводов . . . . .	445
12.2. Элементы, используемые для получения сигналов для блокировки, упорядочения и защиты . . . . .	454
Задачи . . . . .	464
Литература . . . . .	465
Ответы на численные задачи . . . . .	467
Предметный указатель . . . . .	472