

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Забайкальский государственный университет»
(ФГБОУ ВО «ЗабГУ»)

Факультет энергетический

Кафедра технических систем и робототехники

УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
для студентов заочной формы обучения
по дисциплине «Электрический привод»

для направления подготовки (специальности) 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Общая трудоемкость дисциплины (модуля)

Виды занятий	Распределение по семестрам в часах			Всего часов
	6 семестр	7 семестр	8 семестр	
1	2	3	4	5
Общая трудоемкость		108		108
Аудиторные занятия, в т.ч.:		16		16
лекционные (ЛК)		8		8
практические (семинарские) (ПЗ, СЗ)				
лабораторные (ЛР)		8		8
Самостоятельная работа студентов (СРС)		92		92
Форма промежуточного контроля в семестре*		зачет		
Курсовая работа (курсовой проект) (КР, КП)				

Краткое содержание курса

Электромеханическая и механическая характеристики двигателей. Режимы преобразования энергии и ограничения. Классификация механических характеристик. Жесткость механических характеристик. Статическая устойчивость работы электропривода. Двигатели постоянного тока независимого возбуждения. Их разновидности и особенности их применения в электроприводах. Уравнения электромеханической и механической характеристик. Управление координатами в электроприводе с электродвигателями постоянного тока независимого возбуждения. Естественные и искусственные характеристики двигателей при различных способах управления. Расчет пусковых сопротивлений аналитическим и графическим методами. Форсированный и нормальный режимы пуска. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения в относительных единицах. Пересчет сопротивлений якорной цепи на рабочую температуру. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения в тормозных режимах. Расчет тормозных сопротивлений. Двигатели постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения. Области их применения в электроприводах. Механические и электромеханические характеристики. Расчет пусковых сопротивлений и построение искусственных характеристик графическим методом. Тормозные режимы двигателей постоянного тока с последовательным и смешанным возбуждением. Асинхронные двигатели. Их разновидности и особенности применения в электроприводах. Электромеханические и механические характеристики. Управление координатами в асинхронном электроприводе. Естественные и искусственные характеристики двигателей при различных способах управления. Построение искусственных характеристик асинхронного двигателя. Расчет пусковых сопротивлений. Точный и упрощенный расчеты. Механические характеристики асинхронного двигателя в тормозных

режимах. Расчет тормозных режимов. Синхронные двигатели. Области их применения в электроприводах. Механические и электромеханические характеристики. Угловая характеристика. Способы пуска. Влияние тока возбуждения на энергетические характеристики синхронного электропривода. Электрические привода с вентильными, шаговыми и реактивно-индукторными двигателями. Механические и электромеханические характеристики.

Форма текущего контроля

Контрольная работа № 1

Контрольная работа включает три задачи. При выполнении контрольной работы номер варианта, который должен быть выполнен студентом, определяется по двум последним цифрам его зачетной книжки. Задания приведены в приложении 1.

Форма промежуточного контроля

Зачет

Теоретические вопросы

1. Классификация электроприводов и их общая характеристика.
2. Механические характеристики рабочих машин и электродвигателей. Определения, уравнения, графические изображения, понятия жёсткости.
3. Понятия, вывод уравнения и анализ статической устойчивости электропривода.
4. Основные соотношения для двигателя постоянного тока: баланс напряжений якорной цепи, выражения для ЭДС и электромагнитного момента.
5. Скоростные и механические характеристики двигателей постоянного тока.
6. Уравнения и графики скоростных и механических характеристик двигателей постоянного тока с независимым (параллельным) возбуждением для двигательного режима.

7. Построение естественной и искусственной скоростных и механических характеристик ДПТ с независимым (параллельным) возбуждением по паспортным данным.
8. Искусственные скоростные и механические характеристики ДПТ с независимым (параллельным) возбуждением.
9. Уравнение скоростных и механических характеристик ДПТ с независимым (параллельным) возбуждением в относительных единицах.
10. Расчет пусковых сопротивлений ДПТ с независимым (параллельным) возбуждением аналитическим методом.
11. Расчёт пусковых и тормозных сопротивлений ДПТ с независимым (параллельным) возбуждением графическим методом.
12. Универсальные характеристики ДПТ с последовательным возбуждением.
13. Искусственные скоростные и механические характеристики ДПТ с последовательным возбуждением.
14. Тормозные режимы ДПТ. Виды тормозных режимов, способы их осуществления.
15. Тормозные режимы ДПТ с независимым (параллельным) возбуждением. Механические характеристики тормозных режимов.
16. Тормозные режимы ДПТ с последовательным возбуждением. Механические характеристики тормозных режимов.
17. Расчет пусковых и тормозных сопротивлений ДПТ с последовательным возбуждением.
18. Паспортные данные 3-х фазного асинхронного электродвигателя.
19. Механическая характеристика 3-х фазного асинхронного электродвигателя.
20. Анализ механической характеристики 3-х фазного асинхронного электродвигателя. Кратности пускового и максимального моментов. Определение критического скольжения.
21. Построение естественной механической характеристики 3-х фазного асинхронного электродвигателя по паспортным и каталожным данным.
22. Искусственные механические характеристики 3-х фазного асинхронного электродвигателя при измерении напряжения и активного сопротивления в обмотке статора.
23. Искусственные механические характеристики 3-х фазного асинхронного электродвигателя при измерении частоты тока и активного сопротивления в обмотке ротора.
24. Искусственные механические характеристики 3-х фазного асинхронного электродвигателя при измерении частоты и напряжения на статоре.
25. Построение искусственных реостатных механических характеристик 3-х фазных асинхронных электродвигателей с фазным ротором. Параметры, определяющие критическое скольжение.

26. Тормозные режимы 3-х фазных асинхронных электродвигателей (АД). Способы получения, область применения.
27. Расчет пусковых и тормозных сопротивлений 3-х фазных АД.
28. Способы уменьшения пусковых токов 3-х фазных АД с к.з. ротором.
29. Механические характеристики 1-фазных АД без пусковой обмотки. Пульсирующее магнитное поле 1-фазного электродвигателя как сумма вращающихся полей.
30. Назначение пусковой обмотки и ее роль в создании пускового момента в 1-фазном АД. Реостатные и конденсаторные схемы пуска в 1-фазных АД.
31. Использование 3-х фазных АД в 1-фазном режиме.
32. Механические характеристики пуска и угловая характеристика АД.
33. Уравнения движения электропривода и его анализ.
34. Приведение вращающих моментов и сил к скорости одного вала.
35. Приведение моментов инерции и масс к скорости одного вала.
36. Определение времени разбега электропривода с асинхронным электродвигателем.
37. Анализ механических переходных процессов электропривода с линейной механической характеристикой электродвигателя при постоянном моменте сопротивления.
38. Электромеханическая постоянная времени электропривода, ее влияние на характер переходных процессов электропривода и физический смысл.
39. Анализ механических переходных процессов электропривода с линейной механической характеристикой электродвигателя при моменте сопротивления, зависящем от скорости. Вывод уравнений, графики изменения определяющих величин.
40. Анализ механических переходных процессов электропривода с линейной механической характеристикой электродвигателя при моменте сопротивления, зависящем от времени. Вывод уравнений, графики изменения определяющих величин.
41. Регулирование частоты вращения электроприводов. Диапазон регулирования. Плавность регулирования. Жесткость характеристик. Зависимость момента и мощности от угловой скорости при различных способах регулирования.
42. Погрешности при регулировании частоты вращения. Экономичность и КПД при регулировании.
43. Регулирование частоты вращения ДПТ независимого возбуждения изменением сопротивления в цепи якоря.
44. Регулирование частоты вращения ДПТ независимого возбуждения изменением магнитного потока.
45. Регулирование частоты вращения ДПТ независимого возбуждения изменением подводимого к якорю напряжения. Система Г – Д.

46. Регулирование частоты вращения ДПТ с помощью управляемых тиристорных преобразователей. Принцип регулирования. Достоинства и недостатки.
47. Регулирование частоты вращения ДПТ последовательного возбуждения изменением сопротивления в цепи якоря.
48. Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей.
49. Регулирование частоты вращения АД с короткозамкнутым ротором изменением напряжения на обмотке статора.
50. Регулирование частоты вращения АД изменением числа пар полюсов.
51. Автоматическое регулирование угловой скорости асинхронных электродвигателей при помощи тиристорных регуляторов напряжения.
52. Системы преобразования частоты тока для регулируемого электропривода.
53. Регулирование частоты вращения АД введением сопротивления в цепи ротора.
54. Импульсное регулирование АД.
55. Регулирование частоты вращения АД изменением частоты питающего тока.
56. Нагрев и охлаждение электродвигателей. Понятие установившегося, допустимого и номинального превышения температуры.
57. Классификация режимов работы по ГОСТ 183 - 66.
58. Определение мощности электродвигателя, работающего при кратковременном режиме работы.
59. Расчет мощности электродвигателя при работе с ударной нагрузкой и выбор оптимальных размеров маховика.
60. Расчет мощности электродвигателей, работающих в продолжительном режиме по методу средних потерь.
61. Расчет мощности электродвигателей, работающих в продолжительном режиме по методу эквивалентных тока, момента, мощности.
62. Выбор мощности электродвигателя, работающего при повторно-кратковременном режиме работы.
63. Определение допустимой частоты включений асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и пути ее увеличения.
64. Автоматическое управление электроприводом в функции времени.
65. Схема реверсивного магнитного пускателя с блокировкой размыкающими контактами контактора.
66. Схема управления ДПТ с автоматическим пуском в функции времени и торможением в функции скорости (против ЭДС).
67. Схемы управления асинхронным электродвигателем с переключением обмотки со звезды на треугольник.
68. Схемы управления многоскоростным асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором.
69. Схема автоматического управления пуском АД с фазным ротором в функции скорости (против ЭДС).

70. Схема автоматического управления пуском АД с фазным ротором в функции времени.
71. Схема автоматического управления торможением АД с короткозамкнутым ротором противовключением с применением реле контроля скорости.
72. Схема автоматического управления при торможении противовключением АД с фазным ротором в функции скорости (против ЭДС).
73. Схемы управления электроприводами с применением командоаппарата.
74. Типовые схемы управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.
75. Типовые узлы схемы управления торможением. Принцип торможения, схемные решения.
76. Автоматическое управление электроприводами (АУП) в функции пути; с использованием программ, записанных на носителях информации; роботизированные системы управления. Общие положения по использованию, достоинства и недостатки
77. Автоматическое управление электроприводами (АУП) в функции тока.
78. Автоматическое управление электроприводами (АУП) в функции времени.
79. Схема реверсивного магнитного пускателя с блокировкой размыкающими контактами кнопочной станции.
80. Автоматическое управление электроприводами (АУП) в функции частоты вращения (ЭДС вращения). Пуск и торможения.

Оформление письменной работы согласно МИ 4.2-5/47-01-2013

[Общие требования к построению и оформлению учебной текстовой документации](#)

Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Основная литература

1. Кацман, Марк Михайлович. Электрический привод : учебник / Кацман Марк Михайлович. - 2-е изд., стер. - Москва : Академия, 2008. - 384с. - ISBN 978-5-7695-5570-1 : 221-00.
2. Онищенко, Георгий Борисович. Электрический привод : учебник / Онищенко Георгий Борисович. - 2-е изд., стер. - Москва : Академия, 2008. - 288с. - ISBN 978-5-7695-4919-9 : 287-00.

Издания из ЭБС:

1. Шичков, Леонид Петрович. Электрический привод : Учебник и практикум / Шичков Леонид Петрович; Шичков Л.П. - 2-е изд. - М. : Издательство Юрайт, 2017. - 330. - (Бакалавр. Академический курс). - ISBN 978-5-9916-9755-2 : 102.38.
2. Дементьев, Юрий Николаевич. Электрический привод : Учебное пособие / Дементьев Юрий Николаевич; Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. - 2-е изд. - М. : Издательство Юрайт, 2017. - 223. - (Университеты России). - ISBN 978-5-534-01415-0 : 91.73.

Дополнительная литература

1. Кацман, Марк Михайлович. Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу : учеб. пособие / Кацман, Марк Михайлович. - 7-е изд., стер. - Москва : Академия, 2011. - 256 с. - (Среднее профессиональное образование). - ISBN 978-5-7695-8195-3 : 398-20.
2. Терехов, Владимир Михайлович. Системы управления электроприводов : учебник / Терехов Владимир Михайлович, Осипов Олег Иванович; под ред. В.М. Терехова. - 3-е изд., стер. - Москва : Академия, 2008. - 304 с. - ISBN 978-5-7695-5257-1 : 262-50.
3. Ильинский, Николай Федотович. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение : учеб. пособие / Ильинский Николай Федотович, Москаленко Владимир Валентинович. - Москва : Академия, 2008. - 208с. - ISBN 978-5-7695-2849-1 : 370-00.
4. Электропривод и электрооборудование : учебник / Коломиец Алексей Петрович [и др.]. - Москва : КолосС, 2008. - 328 с. : ил. - (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений). - ISBN 978-5-9532-0596-2 : 495-00.

Собственные учебные пособия

Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

1. ЭБС «Университетская библиотека онлайн»; Договор № 204-11/15/223/16-7 от 04.02.2016г. www.biblioclub.ru
2. ЭБС «Лань»; Договор № 223/17-28 от 31.03.2017г. www.e.lanbook.ru
3. ЭБС «Юрайт»; Договор № 223/17-27 от 31.03.2017г. www.biblio-online.ru
4. ЭБС «Консультант студента»; Договор № 223/17-12 от 28.02.2017г. www.studentlibrary.ru

Ведущий преподаватель

Дейс Д.А.

Заведующий кафедрой

Лапшакова Л.А.

Данные по вариантам

Исходные данные для проведения расчётов берутся из таблиц №1 (по предпоследней цифре номера зачётной книжки) и №2 (по последней цифре номера зачётной книжки). Значение «0» в номере зачётной книжки соответствует номеру варианта «10».

Таблица №1 – Технические данные рабочей машины

№ варианта	$n_{рм.н}$	$M_{рм.о}$	$M_{рм.н}$	$G \cdot D_{рм}^2$	X	$\eta_{пер}$
	об/мин	Н·м	Н·м	кг·м ²	-	-
1	242	15	150	4,8	1	0,7
2	230	20	170	3,9	1	0,75
3	150	12	130	4,6	1	0,72
4	400	18	180	4,2	1	0,74
5	320	16	150	5	1	0,8
6	356	19	140	5,2	1	0,84
7	212	14	120	4,4	1	0,82
8	298	11	190	4,8	1	0,77
9	300	15	170	3,9	1	0,7
10	458	20	130	4,6	1	0,75

Таблица № 2 – Технические данные электродвигателя

№ п/ п	Тип двигателя	Мощность, кВт	вращения, об/мин	КПД	$\cos \varphi$	$i_{п}$	$m_{п}$	$m_{м}$	$m_{к}$	$t_{п0}, c$	Момент инерции ротора, кгм ²
1	4A132M2Y3	11	2931	0,88	0,90	7,5	1,7	1,5	2,8	0,1	0,023
2	4A160S2Y3	15	2937	0,88	0,91	7	1,4	1,0	2,2	0,2	0,048
3	4A160M2Y3	18,5	2937	0,88	0,92	7	1,4	1,0	2,2	0,22	0,053
4	4A180S2Y3	22	2943	0,89	0,92	7,5	1,4	1,1	2,5	0,23	0,07
5	4A160M4Y3	18,5	1467	0,9	0,88	7	1,4	1	2,3	0,13	0,13
6	4A180S4Y3	22	1470	0,90	0,90	6,5	1,4	1	2,3	0,14	0,19
7	4A180M4Y3	30	1472	0,91	0,89	6,5	1,4	1	2,3	0,15	0,23
8	4A200M4Y3	37	1475	0,91	0,90	7	1,4	1	2,5	0,37	0,18
9	4A200M6Y3	30	977	0,91	0,89	6,5	1,3	1	2,4	0,4	0,13
10	4A200L6Y3	37	979	0,92	0,89	6,5	1,3	1	2,4	0,45	0,12

1.1 Рассчитать и построить механическую характеристику электродвигателя по пяти точкам

Каждая точка механической характеристики имеет две координаты: угловая скорость ω и момент, развиваемый электродвигателем, M .

Точка 1: координаты - $\omega_0, M_0=0$.

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}, \quad (1)$$

где ω_0 – угловая синхронная скорость, рад/с;

n_0 – синхронная скорость, об/мин (таблица №2).

Точка 2: координаты – ω_H, M_H .

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - S_H), \quad (2)$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (3)$$

где ω_H – угловая номинальная скорость, рад/с;

$S_H = (n_0 - n)/n_0$ – номинальное скольжение;

M_H – номинальный момент, Н·м;

P_H – номинальная мощность двигателя, Вт (таблица №2).

Точка 3: координаты – ω_K, M_K .

$$M_K = m_K \cdot M_H, \quad (4)$$

$$\omega_K = \omega_0 \cdot (1 - S_K), \quad (5)$$

где ω_K – угловая скорость, соответствующая критическому моменту, рад/с;

$$S_K = \frac{S_H \cdot \left[m_K + \sqrt{m_K^2 + 2 \cdot S_H \cdot (m_K - 1)} - 1 \right]}{1 - 2 \cdot S_H \cdot (m_K - 1)} \text{ – критическое скольжение;}$$

M_K – критический момент, Н·м;

m_K – кратность критического момента (таблица №2).

Точка 4: координаты – ω_M, M_M .

$$M_M = m_M \cdot M_H, \quad (6)$$

$$\omega_M = \omega_0 \cdot (1 - S_M), \quad (7)$$

где ω_M – угловая скорость, соответствующая минимальному моменту, рад/с;

S_M – минимальное скольжение, $S_M = 0,85 \dots 0,87$;

M_M – минимальный момент, Н·м;

m_M – кратность минимального момента (таблица №2).

Точка 5: координаты – $\omega_{\Pi} = 0$, M_{Π} .

$$M_{\Pi} = m_{\Pi} \cdot M_H, \quad (8)$$

где M_{Π} – пусковой момент, Н·м;

m_{Π} – кратность пускового момента (таблица №2).

Результаты расчета точек сводим в таблицу №3.

1.2 Расчет механической характеристики по формуле Клосса

Формула Клосса имеет следующий вид:

$$M_i = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{S_i}{S_K} + \frac{S_K}{S_i} + 2 \cdot \varepsilon}, \quad (9)$$

Принимаем $\varepsilon = S_K$.

Задаемся S_i : $0, S_H, 0,8S_K, S_K, 1,2S_K, 0,6, 0,7, S_M, 1$.

Значения критического скольжения S_K и момента M_K принимаем из предыдущих расчётов механической характеристики.

Подставляем в формулу (9) значения S_i из вышеприведённого ряда значений, рассчитываем значения моментов M_i и сводим результаты в таблицу №3.

1.3 Расчет электромеханической характеристики

Точка 1: имеет координаты – ω_0, I_0 .

$$I_o = I_H \cdot \left(\sin \varphi_H - \frac{\cos \varphi_H}{2 \cdot m_K} \right), \quad (10)$$

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H}, \quad (11)$$

$$\sin \varphi_H = \sqrt{1 - (\cos \varphi_H)^2}, \quad (12)$$

где I_0 – ток на холостом ходу, А;

I_H – номинальный ток, А;

$U_H = 380$ – номинальное напряжение, В;

η_H – КПД при номинальной скорости (таблица №2);

$\cos \varphi_H$ – коэффициент мощности при номинальной скорости (таблица №2).

Значение скоростей ω_0 , ω_H , ω_K берём из предыдущих расчётов механической характеристики электродвигателя по пяти точкам.

Точка 2: имеет координаты – ω_H , I_H (формула 11).

Точка 3: имеет координаты – ω_K , I_K .

$$I_K = (0.7...0.8) \cdot I_{II}, \quad (13)$$

$$I_{II} = i_{II} \cdot I_H, \quad (14)$$

где I_{II} – пусковой ток, А;

I_K – ток при критическом моменте, А;

i_{II} – кратность пускового тока (таблица №2).

Точка 4: имеет координаты – $\omega_{II}=0$, I_{II} (формула 14).

Данные расчетов сводим в таблицу №3.

1.4 Расчет механической характеристики при понижении напряжения на 25%

Как известно, снижение напряжения на зажимах асинхронного электродвигателя приводит к снижению момента на валу. Данная зависимость отображается с помощью нижеприведённой формулы

$$M_u = M_j \cdot \left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right)^2, \quad (15)$$

где $\Delta U = 25$ – падение напряжения на зажимах электродвигателя, %;

M_j – момент двигателя при номинальном напряжении, Н·м;

Значения данного момента берутся из расчётов механической характеристики асинхронного двигателя и принимаются равными M_0 , M_H , M_K , M_M и M_P .

M_u – момент двигателя при пониженном на ΔU напряжении, Н·м.

Расчеты точек сводим в таблицу №3.

2 Расчет механической характеристики рабочей машины

Момент сопротивления рабочей машины, приводим к валу электродвигателя:

$$M_c = \frac{1}{i_p \cdot \eta_{пер}} \left[M_{р.м.о} + (M_{р.м.н} - M_{р.м.о}) \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_n} \right)^x \right], \quad (16)$$

$$i_p = \frac{\omega_n}{\omega_{р.м.н}}, \quad (17)$$

$$\omega_{р.м.н} = \frac{\pi \cdot n_{р.м.н}}{30}, \quad (18)$$

где $\omega_{р.м.н}$ – угловая номинальная скорость вала рабочей машины, рад/с;

$n_{р.м.н}$ – номинальная скорость вала рабочей машины, об/мин (таблица №1).

$M_{р.м.н}$ – момент сопротивления рабочей машины при номинальной частоте вращения, Н·м (таблица №1);

$M_{р.м.о}$ – момент сопротивления рабочей машины, не зависящий от скорости, Н·м (таблица №1);

i_p – передаточное отношение редуктора между двигателем и рабочей машиной;

$\eta_{пер}$ – КПД передачи между двигателем и рабочей машиной (таблица №1);

x – степень уравнения (таблица №1).

ω_i – угловая скорость электродвигателя, рассчитанная в пункте 1.1 и принимаемая равной ω_0 , ω_H , ω_K , ω_M и ω_P .

Расчеты точек сводим в таблицу №3.

Таблица №3 – Расчетные данные к построению механической и электромеханической характеристик асинхронного двигателя

Расчётное скольжение			0	$S_{H=}$	$0,8S_{K=}$	$S_{K=}$	$1,2S_{K=}$	0,6	0,7	$S_{M=}$	1
скорость	ω	рад/с			-		-	-	-		
пункт 1.1	M	H·м			-		-	-	-		
пункт 1.2	M_i	H·м									
пункт 1.3	I	A			-		-	-	-	-	
пункт 1.4	M_U	H·м			-		-	-	-		
пункт 2	M_C	H·м			-		-	-	-		

В первую строку (расчётное скольжение) заносятся значения скольжений из пункта 1.2. Во вторую строку (скорость) заносятся значения скорости двигателя из пункта 1.1. Остальные строки заполняются из соответствующего пункта расчётов. Ячейки с прочерком не заполняются.

По результатам расчетов, приведенных в таблице №3, далее построим заданные графики.

3 Расчет потерь энергии при пуске и реверсе электродвигателя

Потери энергии в двигателе при пуске на холостом ходу:

$$A_{no} = J_{\delta} \cdot \omega_0^2, \quad (19)$$

При торможении противовключением от ω_0 до 0 на холостом ходу:

$$A_{mno} = 3 \cdot J_{\delta} \cdot \omega_0^2, \quad (20)$$

Потери энергии при пуске с нагрузкой:

$$A_n = 0,81 \cdot \frac{1 - \eta_n}{\eta_n \cdot (1 + \alpha)} \cdot P_n \cdot i_n^2 \cdot t_n, \quad (21)$$

где $\alpha = 0,6$ – коэффициент, учитывающий способ пуска.