

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет»
Инженерно-технический факультет
Кафедра электроэнергетики и электротехники

Г.В. Иванов, А.В. Мезенцева

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО МЕХАНИЗМА**

Учебно-методическое пособие

Нижевартовск
2019

УДК 62-83
ББК 31.291

Печатается по постановлению Редакционно-издательского совета
Нижневартковского государственного университета

Рецензенты:

ректор ЧОУ ВО «Академический институт прикладной энергетики»,
к.м.н., профессор *Т.В. Ковалева*;

доцент кафедры радиоэлектроники и электроэнергетики
БУ ВО ХМАО – Югры «Сургутский государственный университет»,
к.т.н., доцент *Е.Ю. Кислицин*

И 20 Иванов Г.В., Мезенцева А.В.

Проектирование системы электропривода производственного механизма: Учебно-методическое пособие. – Нижневартовск: НВГУ, 2019. – 64 с.

ISBN 978-5-00047-518-8

Учебно-методическое пособие содержит теоретические сведения о работе и основных характеристиках промышленных механизмов циклического действия; методические указания по выполнению курсового проекта, в котором предусматривается разработка электропривода по системе «генератор–двигатель» для механизма циклического действия.

Представленный материал апробирован и используется при изучении дисциплины «Электрический привод» студентами направления подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника.

ББК 31.291

ISBN 978-5-00047-518-8

© НВГУ, 2019

© Иванов Г.В., Мезенцева А.В., 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ	6
Глава 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	11
2.1. Основные сведения об электроприводе	11
2.2. Электропривод механизмов циклического действия	12
2.3. Механические передачи	13
2.4. Преобразовательное устройство	15
2.4.1. Система «генератор–двигатель»	15
Глава 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	16
3.1. Выбор типа и мощности электродвигателя	16
3.1.1. Определение сил и моментов	17
3.1.2. Предварительный расчет мощности электродвигателя	19
3.1.3. Определение передаточного числа редуктора	21
3.1.4. Построение тахограммы и нагрузочных диаграмм ...	24
3.1.5. Проверка двигателя по перегрузочной способности и мощности	27
3.1.6. Расчет и построение механических (электромеханических) характеристик электропривода	30
3.2. Расчет и построение переходных процессов	31
3.2.1. Расчет и построение переходных процессов системы «генератор–двигатель» со схемой возбуждения для рисунка 3.5а	36

3.2.2. Расчет и построение переходных процессов системы «генератор–двигатель» со схемой возбуждения для рисунка 3.6а	41
3.3. Проверка двигателя по условиям нагрева с учетом переходных режимов	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	46
ЛИТЕРАТУРА	47
ПРИЛОЖЕНИЯ	46

ВВЕДЕНИЕ

Курсовое проектирование является завершающим этапом изучения дисциплины «Электрический привод» обучающимися по профилю подготовки «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Целью курсового проекта является приобретение навыков в разработке, применении известных методов расчета и проектирования электрического привода производственного механизма.

В курсовом проекте предусматривается разработка электропривода по системе «генератор–двигатель» с приводным асинхронным двигателем для механизма циклического действия. Выбор такой системы электропривода обусловлен учебными задачами дисциплины для закрепления знаний.

Данное учебно-методическое пособие предназначено для обучающихся очной и заочной форм обучения, выполняющих курсовой проект. Поскольку для обучающихся заочной формы обучения, выполняющих курсовой проект до начала экзаменационной сессии, ограничено обеспечение учебной и научно-технической литературой и получение текущих консультаций, в учебно-методическом пособии несколько подробнее рассматриваются некоторые разделы курсового проектирования, чтобы обучающиеся могли сориентироваться в вопросах курсового проектирования. Даны рекомендации по методике расчета, приведены некоторые справочные материалы.

Данное учебно-методическое пособие может быть также полезно обучающимся при выполнении ВКР.

Глава 1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Задачей курсового проектирования является разработка разомкнутой системы реверсивного электропривода производственного механизма, выбор и расчет его силовых элементов, расчет и построение нагрузочных диаграмм и тахограммы, статических и динамических характеристик, кривых переходных процессов и проверка двигателя по нагреву.

На рисунке 1.1 приведена кинематическая схема механизма наклонного подъемника, электропривод которого необходимо разработать.

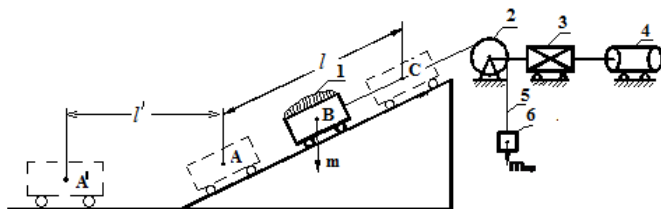


Рисунок 1.1 - Кинематическая схема механизма наклонного подъемника

1 – тележка, 2 – барабан, 3 – редуктор, 4 – двигатель, 5 – канат, 6 – противовес

Наклонный подъемник состоит из тележки, которая перемещается по рельсовому пути под некоторым углом к горизонту α . Тележка совершает движение по перемещению груза из нижнего положения, из точки А или А', в верхнее положение, в точку С, на расстояние l или $l+l'$. После разгрузки в верхнем положении пустая тележка возвращается в нижнее положение, где проводится ее загрузка, а затем цикл повторяется.

Перемещение тележки осуществляется при помощи троса, который наматывается на барабан. Барабан через редуктор соединен с двигателем. Для улучшения режима работы двигателя к барабану через трос присоединен противовес.

При остановках в нижнем и верхнем положениях тележка удерживается с помощью электромагнитных тормозов. При пуске двигателя растормаживание тормоза происходит мгновенно в момент времени, когда электромагнитный момент двигателя M_0 сравнивается со статическим моментом M_c . Если растормажива-

ние двигателя происходит в момент подачи управляющего сигнала на систему электропривода (напряжения питания обмотки возбуждения генератора U_g), то тележка под действием активного статического момента, пока M_∂ достигает его величины, может начать движение в противоположную сторону, что должно найти отражение при построении динамических характеристик. В зависимости от выполняемого варианта движение тележки может осуществляться и из точки A' , что также должно найти отражение при построении различных видов характеристик.

Цикл работы подъемника состоит из следующих этапов. Из нижнего положения в точке А (A') загруженная тележка, разгоняясь, осуществляет движение с постоянной рабочей скоростью $v_{\text{раб.}}$. После прохождения тележкой расстояния l'' ($l+l'$) подается сигнал на снижение напряжения питания обмотки возбуждения генератора, и двигатель переходит на новую статическую характеристику с меньшей угловой скоростью, а тележка, затормаживаясь под действием статических сил сопротивления, переходит на движение с ползучей скоростью $v_{\text{полз.}}$. Затем отключается возбуждение генератора, и тележка под действием сил сопротивления останавливается в точке С с последующим срабатываем. После остановки тележка разгружается и затем, разогнавшись до рабочей скорости $v_{\text{раб.}}$, движется вниз до отметки, отстоящей от точки С на расстоянии l''' , после чего снижается напряжение питания обмотки возбуждения генератора и двигатель переходит на статическую характеристику с меньшей угловой скоростью, а тележка, затормаживаясь под действием статических сил сопротивления, переходит на движение с ползучей скоростью. Остановка тележки в точке А (A') происходит аналогично остановке в точке С. Затем тележка загружается и на этом очередной цикл заканчивается.

Ходовая часть тележки, КПД редуктора и барабана характеризуются следующими величинами:

- диаметр колеса тележки $D_k = 0,25$ м;
- диаметр цапфы колеса $d_u = 0,05$ м;
- коэффициент трения качения колеса по рельсу $f = (5-6)10^{-4}$ м;
- коэффициент трения скольжения в подшипниках колес $\mu = 0,01-0,015$;

– коэффициент, учитывающий сопротивление движению колеса от трения его реборды о рельс, от трения на торцевых частях ступицы и т. д. $K = 2,2$;

– КПД редуктора $\eta_p = 0,92$;

– КПД барабана $\eta_b = 0,96$.

Варианты заданий для механизма наклонного подъемника приведены в таблицах 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1

Технические показатели транспортного средства

Наименование	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Масса тележки m_t , кг	50	600	900	1000	60	300	700	800	40	700
Масса груза m_z , кг	190	3100	4800	5350	240	2000	3500	4050	160	3200
Масса противовеса $m_{пр}$, кг	100	1200	1800	1850	115	710	1180	1600	85	1400
Рабочая скорость тележки $v_{раб}$, м/с	0,7	0,25	0,22	0,3	0,6	0,4	0,34	0,34	0,8	0,4
Ползучая скорость тележки $v_{полз}$, м/с	0,06	0,02	0,01	0,02	0,05	0,03	0,02	0,02	0,07	0,03
Допустимое ускорение тележки $a_{доп}$, м/с	0,8	0,7	0,55	0,6	0,66	1,0	0,76	0,68	0,9	0,8
Момент инерции барабана I_b , кгм ²	6	8	9	10	4	6	8	9	5	8
Диаметр барабана D_b , м	0,56	0,34	0,22	0,36	0,36	0,4	0,28	0,34	0,42	0,24
Угол наклона пути α , °	42	35	33	30	40	32	28	34	44	37

Таблица 1.2

Показатели работы транспортного средства

Наименование	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Время загрузки t_z , с	5	10	12	13	7	9	10	11	6	10
Врем разгрузки t_p , с	5	8	9	10	5	7	8	9	5	8
Длина пути движения между точками А и С l , м	30	10	9	15	24	20	14	15	36	16
Длина пути движения между точками А и А' l' , м	3	1,5	1	2	2	1,5	2	1	2	1
Длина пути разгона и движения груженой тележки с $v_{раб}$ l'' , м	28	9	8	13,5	22	18,5	12,5	13,5	34	14,5
Длина пути разгона и движения порожней тележки с $v_{раб}$ l''' , м	29	9,2	8,2	14	23	19	13	14	35	15

В качестве электропривода используется система «генератор–двигатель» с приводным асинхронным двигателем.

Заданием на курсовое проектирование предусмотрено:

1. Привести кинематическую схему механизма наклонного подъемника и в соответствии с вариантом записать его показатели.
2. Определить величины моментов сопротивления относительно вала барабана для обоих направлений движения тележки.
3. Определить предварительную мощность электрических машин системы с учетом ПВ% и рациональное передаточное число редуктора.
4. Рассчитать и построить тахограмму $\omega_o(t)$ и нагрузочные

диаграммы $M_o(t)$, $P_o(t)$ электропривода с учетом динамических нагрузок и при условии постоянства ускорений в периоды переходных процессов.

5. Проверить предварительно выбранный двигатель по мощности, используя методы эквивалентных (средних) величин, и по перегрузочной способности. Представить принципиальную схему электропривода.

6. Рассчитать и построить статические механические (электромеханические) характеристики для всех режимов работы привода: для груженной и порожней тележки при работе с $v_{\text{раб.}}$ и $v_{\text{полз.}}$

7. Рассчитать и построить графики переходных процессов электропривода: $e_r(t)$, $\omega_o(t)$ и $M_o(t)$ для всех участков, а также динамическую механическую характеристику $\omega_o(M_o)$.

8. Проверить двигатель по нагреву с учетом реальных переходных процессов.

Выбрать приводной асинхронный двигатель.

Вариант задания на курсовое проектирование обучающимся выдается преподавателем. Номер варианта состоит из двух цифр, при этом по первой цифре выбираются данные из таблицы 1.1, а по второй цифре – данные из таблицы 1.2.

Глава 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Основные сведения об электроприводе

Электроприводом называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств и предназначенная для приведения в движение рабочих органов машин и управления этим движением [4].

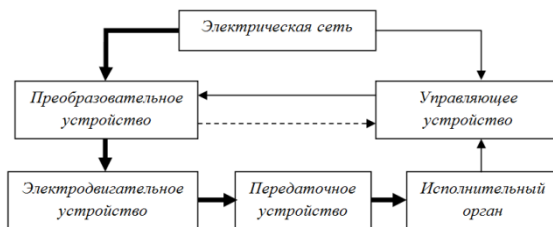


Рисунок 2.1 - Структурная схема электропривода

В общем случае электропривод состоит из четырех устройств:

- 1) преобразовательного;
- 2) электродвигательного;
- 3) передаточного;
- 4) управляющего.

Основным элементом электропривода является электродвигатель, который преобразует электрическую энергию в механическую. Для получения электроэнергии требуемых параметров между двигателем и источником энергии включают силовой преобразователь.

Преобразовательное устройство предназначается для управления потоком электрической энергии, поступающим из сети, с целью регулирования режимов работы двигателя и механизма.

Передаточное устройство содержит механические передачи и соединительные муфты, необходимые для передачи вырабатываемой двигателем механической энергии исполнительному механизму.

Управляющее устройство предназначено для фиксации и обработки поступающей информации о задающих воздействиях и

состоянии системы и выработки сигналов управления преобразовательным, электродвигательным и другими устройствами [10].

Различают следующие преобразовательные устройства.

- Вентильный электропривод, преобразовательным устройством которого является вентильный преобразователь энергии.

- Система «управляемый выпрямитель–двигатель» (УВ–Д) – вентильный электропривод постоянного тока, преобразовательным устройством которого является регулируемый выпрямитель.

- Система «преобразователь частоты–двигатель» (ПЧ–Д) – вентильный электропривод переменного тока, преобразовательным устройством которого является регулируемый преобразователь частоты.

- Система «генератор–двигатель» (Г–Д) – регулируемый электропривод, преобразовательным устройством которого является электромашинный преобразователь.

По роду механического передаточного устройства электропривод подразделяется на:

- Редукторный, содержащий один из видов механического передаточного устройства.

- Безредукторный, в котором электродвигатель непосредственно соединен с исполнительным органом.

2.2. Электропривод механизмов циклического действия

Технологический процесс промышленных механизмов циклического действия предусматривает циклическое повторение однотипных производственных операций. У таких механизмов динамичный режим работы с частыми пусками и остановками. Для обеспечения заданной производительности и качества выполнения производственных операций необходимо регулирование скорости электропривода механизмов и формирование диаграммы движения исполнительного органа.

Механизмы циклического действия, как правило, имеют реверсивный привод, рассчитанный для работы в интенсивном повторно-кратковременном режиме с частыми пусками, торможением и реверсами. Технические возможности электропривода оказывают существенное влияние на производительность механиз-

мов, на динамические нагрузки привода и механической части, на КПД механизма и другие показатели [5].

В связи с этим к электроприводу предъявляются следующие требования, в значительной мере общие для всей рассматриваемой группы механизмов:

1. Электропривод должен обеспечивать регулирование скорости в диапазоне, необходимом для качественного выполнения производственных операций и остановки рабочего органа машины с требуемой точностью. Диапазон регулирования для большинства механизмов циклического действия составляет 10:1, в редких случаях до 50:1.

2. Электропривод должен быть реверсивным и выдерживать значительное число (60–1 000 в час) пусков, остановов и реверсов.

3. Приводной двигатель должен обладать наименьшим моментом инерции и высокой перегрузочной способностью для быстрого пуска, останова и реверса механизма.

4. Электропривод должен обеспечивать ограничение момента и тока электродвигателя допустимыми значениями, как в переходных процессах пуска и торможения, так и при механических перегрузках.

5. Электропривод должен обеспечивать ограничение динамических и ударных нагрузок механического оборудования, обусловленных наличием упругих связей, зазоров в передачах и сочленениях рабочего оборудования, периодических возмущений, вызываемых кинематическими погрешностями передач.

6. Электродвигатели должны иметь повышенную механическую прочность и надежность.

Выполнение этих требований обеспечивается использованием двигателей повышенной прочности, а также автоматическими системами управления и регулирования.

2.3. Механические передачи

Передаточный механизм – устройство, которое служит для передачи энергии механического движения на расстояние и преобразования его параметров [11]. При помощи передачи решаются следующие основные задачи:

- Понижение скорости, ступенчатое или бесступенчатое её ре-

гулирование в широком диапазоне при постоянной мощности.

– Изменение характера движения, например, вращательного в поступательное, и наоборот.

– Приведение в движение нескольких механизмов одним двигателем, осуществление реверсивного движения.

Механические передачи подразделяют на следующие типы:

1) С непосредственным соприкосновением звеньев (фрикционные, зубчатые, червячные, шарнирно-рычажные).

2) С гибкой связью (ременные, цепные, канатные).

Передаточные механизмы характеризуются следующими основными величинами:

– Угловая скорость ω – векторная величина, характеризующая быстроту вращения твердого тела (рад/с).

– Частота вращения n – величина, равная отношению числа оборотов, совершенных телом, ко времени вращения (об/мин).

Отношение угловых скоростей двух валов ведущего к ведомому называют передаточным числом:

$$i = \omega_1 / \omega_2 = n_1 / n_2.$$

Передаточное число принимает положительное значение при одинаковом направлении вращения звеньев.

Отношение угловых скоростей двух любых валов, не зависящее от направления силового потока, называют передаточным отношением.

Редуктором называют механизм, состоящий из зубчатых или червячных передач, выполненный в виде отдельного агрегата и служащий для передачи вращения от вала двигателя к валу рабочей машины [11]. Работа указанных механизмов является наиболее распространенной тематикой курсового проектирования.

Назначение редуктора – понижение угловой скорости и, соответственно, повышение вращающего момента ведомого вала по сравнению с ведущим.

По виду звеньев передачи редукторы делятся на цилиндрические, конические и комбинированные. По числу пар передач редукторы бывают одноступенчатые ($i < 7$, мощность до 40 кВт) и многоступенчатые (двухступенчатые цилиндрические $i < 40$; трехступенчатые цилиндрические $i < 150$, двухступенчатые коническо-цилиндрические $i < 25$, червячные редукторы $i = 10\text{--}70$).

Единый стандартный ряд редукторов включает следующие передаточные числа: 1,0; 1,12; 1,25; 1,40; 1,60; 1,80; 2,00; 2,24; 2,50; 2,80; 3,15; 3,55; 4,0; 4,5; 5,00; 5,60; 6,30; 7,10; 8,00; 9,00; 10,0; 11,2; 12,5; 14,0; 16,0; 18,0; 20,0; 22,4; 25,0; 28,0; 31,5; 35,5; 40,0; 45,0; 50,0; 56,0; 63,0; 71,0; 80,0; 90,0; 100,0.

2.4. Преобразовательное устройство

Для осуществления автоматического регулирования предусматриваются управляемые преобразователи и регуляторы, позволяющие автоматически под воздействием обратных связей осуществлять регулирование координат электропривода, в частности, момента и скорости. В общепромышленных механизмах используются электромашинные и вентильные управляемые преобразователи напряжения постоянного тока и частоты переменного тока и соответствующие системы ЭП [5]:

- система «генератор–двигатель» (Г–Д);
- система «тиристорный преобразователь–двигатель» (ТП–Д);
- система «преобразователь частоты–асинхронный двигатель» (ПЧ–АД).

В настоящее время продолжает успешно применяться система Г–Д. Ее основными достоинствами являются отсутствие искажений потребляемого из сети тока и относительно небольшое потребление реактивной мощности [6].

2.4.1. Система «генератор–двигатель»

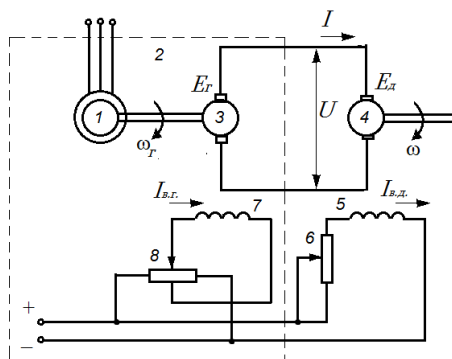


Рисунок 2.2 - Схема электропривода по системе «Генератор–двигатель»

На рисунке 2.2: 1 – приводной электродвигатель переменного тока, 2 – электромашинный выпрямитель, 3 – генератор постоянно-го тока, 4 – двигатель электропривода, 5 – обмотка возбуждения двигателя привода, 6 – резистор в цепи; 7 – обмотка возбуждения генератора, 8 – потенциометр в цепи возбуждения генератора.

В системе «Генератор–двигатель» якорь двигателя непосредственно присоединяется к якору генератора, образующего вместе с приводным двигателем электромашинный выпрямитель трехфазного переменного тока в постоянный, вращающийся со скоростью ω . Регулирование напряжения на якоре двигателя происходит за счет изменения тока возбуждения генератора $I_{вг}$ с помощью потенциометра. При этом изменяется ЭДС генератора E_r и, соответственно, напряжение на якоре двигателя U . Регулирование магнитного потока двигателя осуществляется изменением $I_{вд}$, за счет включения в цепь обмотки возбуждения двигателя резистора. В замкнутых ЭП питание обмотки возбуждения генератора происходит от регулируемого источника постоянного тока.

Глава 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

3.1. Выбор типа и мощности электродвигателя

При разработке и проектировании электрического привода производственного механизма необходимо прежде всего уяснить его технологические особенности работы:

- величину и характер изменения статического момента;
- плавность и пределы регулирования скорости;
- частоту и условия пусков и торможений;
- требования к статическим и динамическим режимам.

Это позволит правильно выбрать тип и мощность электрического двигателя, который обеспечит высокую производительность производственного механизма, его надежность и долговечность, а также возможность комплексной автоматизации данного производственного процесса.

В курсовом проекте предлагается использовать систему привода «генератор–двигатель» с приводным асинхронным двигате-

лем и, соответственно, рассчитать мощность двигателя с учетом технологического режима его работы.

Расчет мощности двигателя и его выбор проводится в два этапа: предварительный и уточненный. При этом двигатель должен иметь температуру нагрева $\tau_{max} \leq \tau_{don}$, где τ_{don} – допустимое превышение температуры двигателя, определяемое его классом изоляции. Класс изоляции двигателей указывается в каталогах. Очевидно, что расчет и выбор двигателя необходимо начинать с расчета и построения тахограммы и нагрузочных диаграмм.

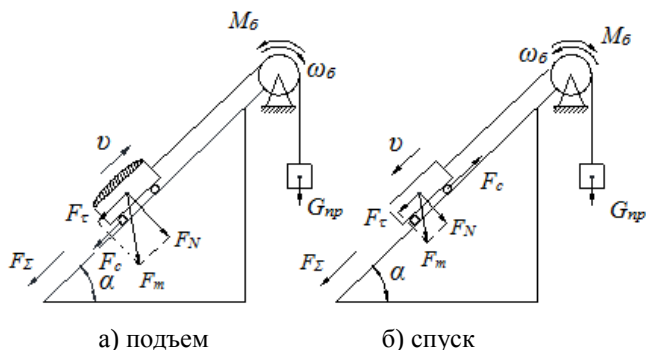
3.1.1. Определение сил и моментов

Элементы механической части привода связаны друг с другом и образуют единую кинематическую цепь от электродвигателя к исполнительному органу. Каждый элемент имеет свою скорость движения, момент инерции или массу, а также совокупность действующих на него сил и моментов. При движении любого элемента учитывается его взаимодействие с остальной частью кинематической цепи путем приведения сил и моментов, моментов инерции или масс, как правило, к валу электродвигателя [15].

Поскольку передаточное число редуктора неизвестно и его еще предстоит определить с учетом действующих сил, то целесообразно рассчитать мощность на валу барабана, являющегося последним кинематическим звеном производственного механизма перед редуктором.

Учитывая технологические особенности работы производственного механизма за период цикла (различия в скоростях и направлениях движения, масс грузовой тележки), тахограмма и нагрузочные диаграммы будут представлять собой ломаные графика с отрезками, расположенными по разные стороны от оси абсцисс (оси времени) и на различном от нее удалении. Учитывая сказанное, необходимо определить силы и моменты на соответствующих интервалах движения тележки.

Для выполнения операции приведения обратимся к рисунку 3.1, на котором показаны действия реактивных F_c и активных F_t , G_{np} составляющих статических сил сопротивления отдельно для каждого направления движения тележки: на подъем (рис. 3.1а) и на спуск (рис. 3.1б).



а) подъем б) спуск
а) $F_{\Sigma} > G_{np}$ – двигательный режим; б) $F_{\Sigma} < G_{np}$ – двигательный режим;
 $F_{\Sigma} < G_{np}$ – генераторный режим. $F_{\Sigma} > G_{np}$ – генераторный режим.

Рисунок 3.1- Силы и моменты, действующие на тележку при различных направлениях движения

Силы и моменты, действие которых совпадает с направлением движения, принимаются положительными, а действие которых не совпадает – отрицательными. Поскольку действие реактивных сил и моментов сопротивления направлено против движения, то они всегда отрицательны. Направление действия активных сил сопротивления постоянно и не зависит от направления движения, поэтому они могут быть как положительными, так и отрицательными [3].

Уравнение баланса сил будет иметь следующий вид.

Для рисунка 3.1а (подъем): $F_{\delta} - F_c - F_{\tau} + G_{np} = 0$;

для рисунка 3.1б (спуск): $F_{\delta} - F_c + F_{\tau} - G_{np} = 0$,

где F_{δ} – усилие, развиваемое барабаном при движении.

Затем уравнения записываются относительно силы F_{δ} .

Для рисунка 3.1а (подъем): $F_{\delta} = F_c + F_{\tau} - G_{np}$;

для рисунка 3.1б (спуск): $F_{\delta} = F_c - F_{\tau} + G_{np}$.

При такой форме записи F_c оказывается всегда положительной, а F_{τ} и G_{np} – положительными при встречном действии относительно движения и отрицательными при согласном действии относительно движения.

Величина и направление момента сопротивления на барабане M_{δ} при наличии противовеса определяется алгебраической

суммой моментов от результирующей силы F_{Σ} , определяемой статическими силами F_c , F_{τ} , и силы тяжести противовеса G_{np} .

$$M_{\delta} = (F_{\Sigma} \pm G_{np}) \cdot R_{\delta} = F_{\delta} \cdot R_{\delta}, \quad (3.1)$$

$$\text{где} \quad F_{\Sigma} = F_c \pm F_{\tau} \quad (3.2)$$

– результирующая реактивной F_c и активной (тангенциальной) F_{τ} сил, Н;

$F_c = \mu_f F_N = \mu_f F_m \cos \alpha$ – сила сопротивления от реактивной статической нагрузки, Н;

$\mu_f = (f + \mu z_u) 2K / D_k$ – коэффициент сопротивления движению, зависящий от коэффициентов трения качения по рельсу f , трения скольжения в подшипниках колес μ и коэффициента K , учитывающего трение реборды колеса о рельс, торцевых частей ступицы и т.д.;

r_u – радиус цапфы колеса, м;

D_k – диаметр колеса, м;

$F_N = F_m \cos \alpha$ – нормальная составляющая от веса тележки (при движении вверх $F_m = (m_r + m_t)g$, а при движении вниз $F_m = m_t g$), Н;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$F_{\tau} = F_m \sin \alpha$ – тангенциальная составляющая от веса тележки F_m , Н;

$G_{np} = m_{np} g$ – вес противовеса, Н;

R_{δ} – радиус барабана, м.

Расчет M_{δ} ведется отдельно при движении тележки вверх (груженная) и при движении тележки вниз (порожня). Если при этом получается $M_{\delta} > 0$, то имеет место двигательный режим, если $M_{\delta} < 0$, то генераторный режим (отдача энергии в сеть).

Мощность на барабане при любом j направлении движения тележки определяется по выражению:

$$P_{\delta j} = M_{\delta j} v / R_{\delta} = M_{\delta j} \omega_{\delta}, \quad (3.3)$$

где v – скорость движения тележки, м/с;

$\omega_{\delta} = v / R_{\delta}$ – угловая скорость барабана, с⁻¹.

3.1.2. Предварительный расчет мощности электродвигателя

Для точного расчета и выбора типа электрического двигателя необходимо иметь тахограмму и одну из нагрузочных диаграмм двигателя. В свою очередь его нагрузочная диаграмма определяется не только статическими нагрузками, обусловленными специ-

фикой технологического процесса производственного механизма, но и передаточным числом редуктора, выбор которого связан с параметрами двигателя, а также динамическими нагрузками, которые в значительной мере зависят от инерционных масс системы электропривода, в том числе и от момента инерции самого двигателя. При этих условиях нагрузочная диаграмма двигателя до его выбора построена быть не может. Поэтому возникает задача предварительного выбора двигателя с учетом ПВ% (по 3.16) по средним (эквивалентным) значениям момента или мощности статической нагрузки (нагрузочной диаграммы механизма) с последующей проверкой его по условиям нагрева и допустимого максимального момента по нагрузочной диаграмме двигателя [2].

Упрощенная нагрузочная диаграмма механизма (рис. 3.2) строится в соответствии с тахограммой (рис. 3.3) и допущением равномерного движения тележки с $v_{раб}$ на всем участке пути в обоих направлениях.

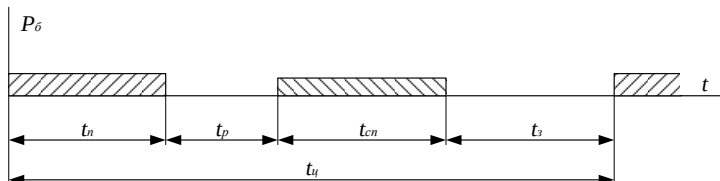


Рисунок 3.2 - Упрощенная нагрузочная диаграмма механизма

Предварительный выбор двигателя выполняется на основании расчета среднего или эквивалентного значения статической мощности за время работы в пределах цикла:

$$P_{с.ср} \geq K_3 \frac{P_{с.н}t_n + P_{с.гн}t_{гн}}{t_n + t_{гн}} \quad (3.4)$$

$$P_{с.э} \geq K_3 \sqrt{\frac{P_{с.н}^2 t_n + P_{с.гн}^2 t_{гн}}{t_n + t_{гн}}} \quad (3.5)$$

где $K_3 = 1,1-1,3$ – коэффициент, учитывающий отличие динамической нагрузочной диаграммы двигателя от статической. Значение K_3 принимается тем больше, чем большую долю составляют динамические нагрузки за цикл;

$P_{сг} = P_{\delta} \eta_p^{\pm 1} \cdot \eta_{\delta}^{\pm 1}$ – статические мощности на валу двигателя в двигательном (минус) и генераторном (плюс) режимах с учетом

КПД редуктора и барабана при движении тележки в j направлении (подъем или спуск);

η_b, η_p – предварительные значения КПД барабана и редуктора, равные, соответственно, 0,96 и 0,92.

Тогда мощность двигателя с учетом ПВ%, согласно (3.16), для статической мощности P_c , рассчитанной по (3.4) или (3.5), определяется из выражения:

$$P_d = P_{cp} \sqrt{\frac{ПВ\%}{ПВ_{cm}\%}} \quad (3.6)$$

3.1.3. Определение передаточного числа редуктора

Величина передаточного отношения редуктора i_p существенным образом влияет на показатели (параметры, характеристики) производственного механизма. Наилучшее значение отдельных показателей может быть достигнуто при определенных соотношениях угловой скорости двигателя и рабочей машины, т. е. при наличии редуктора с соответствующим передаточным числом. Это значение передаточного числа является оптимальным по отношению к одному из показателей.

Общего решения для выбора оптимального передаточного числа, позволяющего минимизировать одновременно несколько показателей механизма, нет. Наилучшее значение отдельных показателей (моментов, времени разбега, рабочих, механических характеристик и т. п.) может быть достигнуто при определенных соотношениях угловой скорости двигателя и рабочей машины, т. е. при наличии редуктора с соответствующим передаточным числом, которое может быть разным при разных соотношениях угловой скорости двигателя и рабочей машины, а уравнения и методика определения этого соотношения – одна и та же.

Для механизма, работающего в длительном режиме, где пуск и торможение редки, выбор передаточного числа редуктора в основном определяется согласованием скорости двигателя и рабочей машины, минимизацией массо-габаритных и стоимостных показателей электродвигателя и редуктора [12].

Значительно сложнее обстоит вопрос с производственными механизмами, работающими с частыми пусками и торможениями, т. е. в повторно-кратковременном режиме. Технико-экономичес-

кая эффективность подобных механизмов характеризуется рядом весьма важных дополнительных критериев оптимума, например:

- минимальным временем перемещения рабочего органа на заданном участке пути при движении по графику определенной формы;
- минимальным временем разгона (торможения) двигателя;
- разгоном механизма с минимальным моментом на валу двигателя;
- наименьшими потерями энергии в электроприводе при пуске (торможении) или за цикл.

Имеет место еще целый ряд показателей, которые могут являться определяющими при выборе $i_{p.onm}$.

Исходным уравнением при выборе $i_{p.onm}$ в большинстве случаев является уравнение движения системы привода.

Так, например, для минимизации любого из четырех указанных выше показателей привода записывается уравнение движения системы относительно вала барабана [6]:

$$M_{\partial} i_p \eta_p^{\pm 1} \eta_{\partial}^{\pm 1} \pm M_{\partial} = (J_{\partial} i_p^2 + J_{\partial \Sigma}) \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.7)$$

где знак (+) относится к двигательному режиму (разгон), а знак (–) – к генераторному режиму (торможение);

$J_{\partial \Sigma} = J_{\partial} + m_{\Sigma} R_{\partial}^2$ – момент инерции производственного механизма, включающий момент инерции барабана J_{∂} и приведенный к валу барабана момент инерции поступательно движущихся масс $m_{\Sigma} R_{\partial}^2$, кгм²;

$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon$ – угловое ускорение барабана, с⁻².

Решая уравнение 3.6 относительно минимизируемого показателя (для первых двух критериев оптимума – время t , для третьего – момент двигателя M_{∂} , для четвертого – потери в якоре двигателя

$$A_{эл} = A - A_{мех} = \int_0^{t_{nm}} U I dt - \int_0^{t_{nm}} E I dt,$$

где U – напряжение, подводимое к якору двигателя;

I – ток якоря;

t_{nm} – время переходного процесса.

Затем, дифференцируя по искомому параметру i_p и приравнявая полученное выражение к нулю, находим уравнение

для определения оптимального передаточного числа редуктора $i_{p.onm}$.

Также можно определить $i_{p.onm}$, исходя из любого минимизируемого показателя рассматриваемого механизма, но с учетом технического задания на проектирование. Например, учитывая, что величины ускорения (торможения), рабочей и ползучей скоростей механизма (тележки) заданы, определение $i_{p.onm}$ из условия минимизации времени разгона (торможения) и времени перемещения рабочего органа (первые два показателя) исключается. По третьему показателю (разгон механизма с минимальным моментом на валу двигателя) $i_{p.onm}$ определяется из выражения [6]:

$$i_{p.onm} = \sqrt{\frac{J_{\delta\Sigma} + M_{\delta}/\varepsilon}{J_{\delta}}} \quad (3.8)$$

Поскольку двигатель еще не выбран и J_{δ} неизвестно, то аналитически $i_{p.onm}$ из данной формулы определить нельзя, но для вполне определенных значений $J_{\delta\Sigma}$ и ε момент на валу барабана M_{δ} будет минимальным при $J_{\delta} i_{p.onm}^2 = \min$.

Поэтому необходимо взять 3-4 двигателя требуемой мощности с различными номинальными угловыми скоростями, определить для них передаточное число $i_{pj} = \omega_{\delta nj} R_{\delta} / v_{\text{раб}}$, а затем найти произведения для рассматриваемых двигателей.

Передаточное число и двигатель с соответствующим $J_{\delta j}$ будут искомыми, если они взяты из рассматриваемого ряда с произведением, имеющим наименьшее значение:

$$J_{\delta j} \cdot i_{pj}^2 = \min. \quad (3.9)$$

Для дальнейших расчетов выбирается ближайшее меньшее стандартное передаточное число редуктора и его тип (таблица ПЗ), записываются тип и параметры двигателя (таблица П1), рассчитываются номинальные мощности генератора: $P_{\text{гн}} = U_{\text{дн}} I_{\text{дн}} / \eta_{\text{дн}}$ и приводного асинхронного двигателя: $P_{\text{адн}} = P_{\text{дн}} / \eta_{\text{дн}} \eta_{\text{гн}}$, записываются их типы и параметры (таблицы П1 и П2) [1; 7]. Номинальные угловые скорости приводного двигателя и генератора должны быть одинаковыми или близкими.

3.1.4. Построение тахограммы и нагрузочных диаграмм

Тахограмма представляет собой зависимость $\omega=f(t)$ на интервале цикла (рис. 3.3а).

Для построения тахограммы необходимо определить интервалы времени работы двигателя в каждом режиме [10].

1 интервал.

Время разгона двигателя и длина участка пути:

$$\Delta t_1 = t_1 - 0 = v_{\text{раб}}/a; \Delta S_1 = a\Delta t_1^2/2 = v_{\text{раб}}\Delta t_1/2.$$

2 интервал.

Время работы двигателя с $\omega_{\text{раб}}$, соответствующей рабочей скорости перемещения тележки $v_{\text{раб}}$, и длина участка пути:

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1 = (l'' - \Delta S_1)/v_{\text{раб}}; \Delta S_2 = v_{\text{раб}}\Delta t_2.$$

3 интервал.

Время перехода от $v_{\text{раб}}$ до $v_{\text{полз}}$ и длина участка пути:

$$\Delta t_3 = t_3 - t_2 = (v_{\text{раб}} - v_{\text{полз}})/a; \Delta S_2 = a\Delta t_3^2/2 = (v_{\text{раб}} - v_{\text{полз}})\Delta t_3/2.$$

4 интервал.

Время работы двигателя с $\omega_{\text{полз}}$, соответствующей «ползучей» скорости перемещения тележки $v_{\text{полз}}$, и длина участка пути:

$$\Delta t_4 = t_4 - t_3 = (l - l'' - \Delta S_3 - \Delta S_5)/v_{\text{полз}}; \Delta S_4 = v_{\text{полз}}\Delta t_4,$$

где ΔS_5 определяется на пятом интервале из условия, что после отключения напряжения обмотки возбуждения генератора остановка тележки произойдет в конечной точке при замедлении под действием статических сил сопротивления.

5 интервал.

Время замедления скорости тележки до «0» и длина участка пути:

$$\Delta t_5 = t_5 - t_4 = v_{\text{полз}}/a_3; \Delta S_5 = a\Delta t_5^2/2 = v_{\text{полз}}\Delta t_5/2,$$

где $a_3 = M_c R_\phi / J_{\text{пр}} i_p$ – замедление тележки под действием статических сил сопротивления после отключения напряжения обмотки возбуждения генератора (условно считаем, что при этом e_e и, соответственно, M_ϕ становятся мгновенно равными нулю);

$M_c = M_\phi / \eta_\phi \eta_p i_p$ – момент сопротивления, приведенный к валу двигателя (двигательный режим);

$J_{\text{пр}}$ определяется из (3.11).

6 интервал.

Время разгрузки:

$$\Delta t_6 = t_p; \Delta S_6 = 0.$$

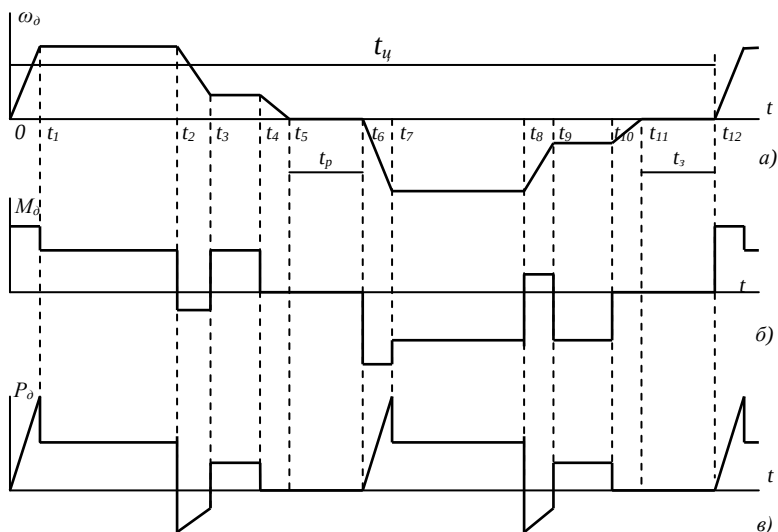


Рисунок 3.3 - Тахограмма и нагрузочные диаграммы двигателя

Интервалы на второй половине цикла рассчитываются аналогичным образом. По полученным результатам строится тахограмма двигателя, где линейная скорость перемещения тележки пересчитывается в угловую скорость вала двигателя:

$$\omega_\delta = v_{\text{тел}} i_p / R_\delta.$$

Нагрузочная диаграмма электропривода представляет собой зависимость $M_\delta(t)$ (рис. 3.3б), $I_\delta(t)$ или $P_\delta(t)$, (рис. 3.3в). Учитывая, что при построении нагрузочных диаграмм пренебрегаем электромагнитными постоянными времени системы Г–Д (скачкообразное изменение величин) и принимаем $\Phi_\delta = \text{const}$, то очевидно, что графики $M_\delta(t)$, $I_\delta(t)$ будут идентичными между собой на всех участках, а $P_\delta(t)$ – только в установившихся режимах (t_1 – t_2 , t_3 – t_4 и т. д.), так как в переходных режимах график $P_\delta(t)$ определяет мощность на валу двигателя и не учитывает мощность потерь.

Момент двигателя, развиваемый при перемещении тележки, определяется из уравнения движения электропривода, записанного относительно вала двигателя:

$$M_{\partial} - M_c = J_{np} d\omega_{\partial}/dt \quad (3.10)$$

где M_{∂} – момент двигателя, Нм;

M_c – момент статического сопротивления, приведенный к валу двигателя с учетом потерь в редукторе и барабане, Нм;

$$J_{np} = (I, I \div I, 2) I_{\partial} + I_{\partial \Sigma} / i_p^2 \quad (3.11)$$

J_{np} – момент инерции системы «производственный механизм–двигатель», приведенный к валу двигателя, кгм²;

$(I, I \div I, 2)$ – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора;

$I_{\partial \Sigma}$ – момент инерции производственного механизма, приведенный к валу барабана и определяемый согласно пояснению к выражению (3.7).

$$d\omega_{\partial}/dt = i_p d\omega_{\partial}/dt = (i_p/R_{\partial}) dV/dt = a_{ip}/R_{\partial} \quad (3.12)$$

угловое ускорение вала двигателя, с⁻².

Уравнение (3.12) выражает соотношения между угловыми ускорениями двигателя, барабана и линейным ускорением тележки.

На 1 интервале двигатель должен преодолеть как статическую, так и динамическую нагрузку. При этом величина его момента определяется из (3.10):

$$M_{\partial 1} = M_c + J_{np} d\omega_{\partial}/dt.$$

Мгновенное значение мощности, развиваемой на валу двигателем, определяется из уравнения:

$$P_{\partial 1} = M_{\partial 1} \omega_{pa\partial} t / \Delta t_1,$$

где t – текущее значение времени, изменяющееся в интервале от 0 до Δt_1 , с.

2 интервал: $d\omega_{\partial}/dt = 0$, $M_{\partial 2} = M_c$, $P_{\partial 2} = M_{\partial 2} \omega_{pa\partial}$.

3 интервал: $M_{\partial 3} = M_c - J_{np} d\omega_{\partial}/dt$ (имеет место замедление скорости движения тележки). Если $|M_c| > |J_{np} d\omega_{\partial}/dt|$, двигатель продолжает работать в двигательном режиме и графики $M_{\partial}(t)$, $P_3(t)$ на участке t_2-t_3 проходят выше оси абсцисс (знаки не изменяются).

Если $|M_c| < |J_{np} d\omega_{\partial}/dt|$, то двигатель переходит работать в генераторный режим и графики $M_{\partial}(t)$, $P_d(t)$ на участке проходят ниже оси абсцисс (рис.3.3б, в).

Мгновенное значение мощности, развиваемой двигателем

$$P_{\partial 3} = M_{\partial 3} \frac{\omega_{pa\partial}(\Delta t_3 - t) + \omega_{полз} t}{\Delta t_3},$$

где t изменяется в интервале от 0 до Δt_3 , с.

Следует обратить внимание, что полученные значения $P_{\partial 3}$ и $M_{\partial 3}$ откладываются относительно оси абсцисс (выше или ниже оси в зависимости от знака полученного значения).

4 интервал: $d\omega_{\partial}/dt = 0$ и $M_{\partial 4} = M_c$, $P_{\partial 4} = M_{\partial 4}\omega_{\text{полз}}$.

5 интервал: в момент времени t_4 напряжение двигателя становится равным нулю, исходя из принятого выше допущения, и тележка останавливается под действием сил статического сопротивления. При этом $M_{\partial 5} = 0$ и $P_{\partial 5} = 0$.

Аналогично рассчитываются и строятся графики $M_{\partial}(t)$, $P_{\partial}(t)$ для второй части цикла, когда порожняя тележка движется вниз.

3.1.5. Проверка двигателя по перегрузочной способности и мощности

Построенная нагрузочная диаграмма $M_{\partial}(t)$ позволяет проверить правильность выбора двигателя с точки зрения обеспечения перегрузочной способности. Если $M_{\partial \max} \leq \lambda M_{\partial \text{н}}$, где $M_{\partial \max}$ – максимальное значение момента двигателя, определяемое из нагрузочной диаграммы; λ – перегрузочная способность двигателя по моменту; $M_{\partial \text{н}}$ – номинальное значение момента двигателя, то двигатель обеспечит устойчивую работу механизма. Если данное условие не выполняется, то необходимо выбрать двигатель большей мощности [2].

Следующим этапом является проверка выбранного двигателя по условиям нагрева. Универсальным и наиболее точным методом проверки выбранного двигателя по условиям нагрева является метод средних потерь, когда определяются средние потери за цикл $\Delta P_{\text{ср}}$. Но он не позволяет проверить двигатель по имеющейся нагрузочной диаграмме, так как для определения значения ΔP_i необходимо знать параметры двигателя. Кроме того, данный метод является достаточно трудоемким. Поэтому целесообразно воспользоваться методом эквивалентных величин с учетом ограничений по его применению. В частности, метод эквивалентной мощности не может применяться для двигателей с частыми пусками и торможениями, так как на графике $P_{\partial}(t)$ (рис. 3.3в) на участках $(0-t_1)$, (t_2-t_3) и т. д. приводится лишь полезная мощность и не учтены потери при пуске и торможении. Использование метода эквивалентной мощности возможно только

после внесения поправок в нагрузочную диаграмму $P_o(t)$ с изменением ее конфигурации с учетом потерь.

Для двигателей постоянного тока, имеющих неизменными магнитный поток, постоянные потери и сопротивление якорной цепи на рассматриваемом участке, и для асинхронных двигателей в тех случаях, когда изменения нагрузки на валу соответствуют линейному участку механической характеристики, для которых справедливо соотношение $M = M_m I_p / I_{pn}$, применим метод эквивалентного тока или момента. В нашем случае имеется нагрузочная диаграмма $M_o(t)$, поэтому следует воспользоваться методом эквивалентного момента. Формула для определения эквивалентного момента, учитывающая изменение условий теплоотдачи, имеет вид:

$$M_{\Sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^m \beta_i t_i}}, \quad (3.13)$$

где m – число рабочих участков в цикле;

M_i – момент двигателя на i -м участке, Нм;

t_i – время работы двигателя на i -м участке, с;

β_i – коэффициент ухудшения теплоотдачи на i -м участке при соответствующей угловой скорости двигателя.

В общем случае $\beta_i = A_i/A_n$ и A_i и A_n – теплоотдача двигателя при работе с ω_i и ω_n и температуре охлаждающей среды $Q_{окр} = 40^\circ\text{C}$. Приближенно зависимость коэффициента ухудшения теплоотдачи от угловой скорости можно считать линейной. Тогда для установившейся угловой скорости ω_i

$$\beta_i = \beta_o + (1 - \beta_o) \frac{\omega_i}{\omega_n}, \quad (3.14)$$

где $\beta_o = A_o/A_n$ – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном якоре (роторе), значение которого для двигателей различного исполнения приводится в каталогах;

A_o – теплоотдача двигателя при стоянке, Дж/с; $^\circ\text{C}$.

Коэффициент ухудшения теплоотдачи при изменении угловой скорости двигателя находится как полусумма коэффициентов, соответствующих угловым скоростям двигателя в начале $\beta_{нач}$ и в конце $\beta_{кон}$ участка, определяемых по (3.14):

$$\beta_{ср} = (\beta_{нач} + \beta_{кон})/2. \quad (3.14a)$$

Так, коэффициент ухудшения теплоотдачи при пуске двигателя от 0 до ω_n и торможении его от ω_n до 0 $\beta_{ср, 0-\omega_n} = (1 + \beta_o)/2$.

Примерные значения коэффициентов β_o для двигателей различного исполнения приведены в таблице П4.

С помощью выражения (3.13) реальная многоступенчатая нагрузочная диаграмма двигателя приводится к типовой (S3) эквивалентной по нагреву одноступенчатой нагрузочной диаграмме (рис. 3.4) с эквивалентной продолжительностью включения

$$ПВ_э\% = \frac{t_{pэ}}{t_{pэ} + t_{oэ}} 100\%, \quad (3.15)$$

где $t_{pэ} = \sum_{i=1}^m t_{pi}$; $t_{oэ} = \sum_{j=1}^n t_{oj}$ – соответственно, суммарные продолжительности рабочего участка и паузы;

m, n – число реальных рабочих участков и пауз.

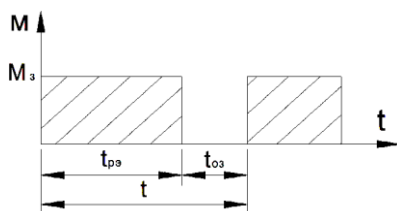


Рисунок 3.4 - Типовой S3 график режима работы двигателя

Как правило, рассчитанная ПВ% не совпадает со стандартной ПВ_{ст}% двигателей (ПВ_{ст}% = 15, 25, 40, 60, 100%), поэтому необходимо осуществить приведение полученных эквивалентных значений $M_э, I_э, P_э$ к ближайшим стандартным ПВ_{ст}%:

$$M_{э,ПВст} = M_э \sqrt{\frac{ПВ_э}{ПВст}}, \quad I_{э,ПВст} = I_э \sqrt{\frac{ПВ_э}{ПВст}}, \quad P_{э,ПВст} = P_э \sqrt{\frac{ПВ_э}{ПВст}} \quad (3.16)$$

и затем провести непосредственное сопоставление по любой из полученных эквивалентных величин с соответствующими номинальными данными двигателя и той же ПВ%. Если номинальное значение соответствующего параметра предварительно выбранного двигателя со стандартным ПВ_{ст}% будет больше или равно расчетному, например, $M_{н,ПВст} \geq M_{э,ПВст}$, то выбор двигателя сделан правильно. Если данное условие не выполняется, то необходимо взять другой двигатель [5].

3.1.6. Расчет и построение механических (электромеханических) характеристик электропривода

В курсовом проекте проводится расчет и построение механических $\omega_\partial(M_\partial)$ или электромеханических $\omega_\partial(I_\partial)$ характеристик разомкнутой системы электропривода для всех режимов его работы:

- при подъеме для рабочей и ползучей скоростей (I квадрант);
- при спуске для рабочей и ползучей скоростей (III квадрант).

При этом масштабы по осям следует выбирать таким образом, чтобы в каждом квадранте характеристика была представлена полностью.

Расчет и построение характеристик $\omega_\partial(I_\partial)$ или $\omega_\partial(M_\partial)$ проводится при допущении, что с изменением нагрузки двигателя ЭДС генератора остается неизменной, т. е. его приводной двигатель вращается с неизменной угловой скоростью. Тогда уравнение механической характеристики для i -режима можно записать в следующем виде [6]:

$$\omega_{\partial i} = \frac{E_{\Gamma i}}{K\Phi_n} - \frac{R_{яц}M_{ci}}{(K\Phi_n)^2}, \quad (3.17)$$

где $E_{zi} = \omega_{\partial i}C_\partial + M_{ci}\frac{R_{яц}}{C_\partial}$ – значение ЭДС, при которой двигатель работает в i -режиме, т. е. с $\omega_{раб}$ или $\omega_{полз}$ при движении тележки вверх или вниз, В;

$C_\partial = K\Phi_n = (U_{\partial n} - I_{\partial n}R_{я\partial})/\omega_{\partial n}$ – коэффициент ЭДС двигателя, Вс;

$R_{яц} = r_{я\partial} + r_{яз} + r_{np}$ – суммарное сопротивление контура якорных цепей двигателя, генератора и соединенных приводов, Ом;

r_{np} – сопротивление соединенных приводов, принимаемое равным $0,5\Gamma_{я\partial}$, Ом;

M_{ci} – статический момент сопротивления, приведенный к валу двигателя для i -го режима, Нм.

Так как механическая (электромеханическая) характеристика системы «генератор–двигатель» линейная, то для ее построения достаточно иметь две точки: $\omega_{раб}(\omega_{полз})$, $M_c(I_c)$ и $\omega_\partial = 0$, $M_{k3}(I_{k3})$. Координаты первой точки для каждого режима (с $\omega_{раб}$ и $\omega_{полз}$) берутся из расчетов тахограммы и нагрузочных диаграмм, а ток и момент короткого замыкания для соответствующего режима определяются из выражения:

$$I_{k3i} = E_{zi}/R_{яц}; M_{k3i} = C_\partial I_{k3i}.$$

3.2. Расчет и построение переходных процессов

Переходные (динамические) режимы в двигателе, связанные с изменением управляющего воздействия (ЭДС генератора), параметров якорной цепи или нагрузки на валу двигателя и т. д., приводят к изменению ЭДС, угловой скорости, момента, тока двигателя и, соответственно, механических, электромагнитных и тепловых переходных процессов. Обычно при расчете переходных процессов влияние тепловых процессов, ввиду их весьма большой инерционности, и электромагнитных процессов в якорной цепи двигателя (генератора), из-за их быстрого протекания, не учитывают. Однако, влиянием электромагнитных процессов в обмотке возбуждения генератора, вследствие большой их инерционности, сравнимой с инерционностью механических переходных процессов, пренебречь нельзя. Так, у машин постоянного тока мощностью 1,5; 15; 75; 3000 кВт и выше постоянная времени обмотки возбуждения составляет, соответственно, 0,2; 0,6; 0,8–0,9 и 2–4 с. Поэтому, как правило, при исследовании переходных процессов, когда управление осуществляется изменением тока возбуждения генератора, электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения генератора учитывается. Практически здесь имеет место нелинейная задача, поскольку генераторы обычно работают при насыщенном состоянии магнитной цепи. Насыщение же магнитной цепи, как известно, аналитическому учету не поддается. Однако, сделав определенные допущения, можно провести исследование переходных процессов аналитически и не прибегать к трудоемким и в ряде случаев весьма не точным графо-аналитическим методам [6]:

1. Магнитная система генератора не насыщена, т. е. имеется линейная зависимость между магнитным потоком и током возбуждения (рис. 3.7а);

2. Влияние гистерезиса и вихревых токов мало и не учитывается;

3. Реакция якоря и последовательная обмотка генератора отсутствуют, а ток якоря на цепь возбуждения не влияет;

4. Магнитный поток двигателя $\Phi_\delta = const$.

Если принять кривую намагничивания генератора линейной, (рис. 3.7а), то его ЭДС при $\omega_e = \text{const}$ будет пропорциональна току возбуждения:

$$E_e = \omega_e K_e W_e i_{e2} \operatorname{tg} \alpha = A_{ie}, \quad (3.18)$$

где ω – угловая скорость якоря генератора, с^{-1} ;

$K_e = PM/2\pi a$ – конструктивный коэффициент генератора;

W_e – число витков полюса;

α – угол наклона к оси абсцисс прямой, проведенной через начало координат и точку с координатами: $\Phi_e = 1$, $i_e = 0,8$, град;

i_{e2} – ток возбуждения генератора, А.

Расчет переходных процессов можно проводить как аналитически, так и с использованием программных средств.

При скачкообразном приложении напряжения к обмотке возбуждения ток в ней будет нарастать по экспоненциальному закону. Для ускорения протекания электромагнитного процесса применяют форсировку, заключающуюся в том, что на время пуска к обмотке возбуждения генератора прикладывается повышенное напряжение. На рисунке 3.5а представлена схема цепи возбуждения генератора с постоянно включенным дополнительным резистором R_2 . На схему возбуждения подается повышенное напряжение U'_e , и с ростом i_e происходит перераспределение напряжения между Z_0 и R_2 . На рисунке 3.5б представлены кривые $i_e(t)$ при различных U'_e и, соответственно, различных R_2 . На рисунке 3.7б кривая 1 показывает изменение напряжения на обмотке возбуждения.

На рисунке 3.6а представлена схема цепи возбуждения генератора с дополнительным резистором R_2 , шунтируемым на время пуска контактом K_2 . При достижении тока I_e величины I_{en} K_2 размыкается и напряжение на обмотке возбуждения ограничивается значением U_{en} (рис. 3.7б, кривая 2). Чем больше первоначальное напряжение U'_e , тем быстрее идет нарастание i_e и выше его линейность на участке $0-I_{en}$ (рис. 3.6б).

При выполнении курсового проекта можно принимать любой вариант схемы включения обмотки возбуждения генератора.

Выбрав схему включения обмотки возбуждения генератора, необходимо определить сопротивления резисторов R_1 и R_2 , величины которых влияют на интенсивность нарастания тока возбуждения генератора (ток возбуждения двигателя берется неиз-

менным $\Phi_0 = \Phi_{0n} = const$) и, соответственно, на интенсивность изменения E_z , M_0 и ускорение при разгоне (торможении) грузовой тележки.

От величины сопротивления резистора R_1 зависит значение перенапряжения (ЭДС) в обмотке возбуждения в момент ее отключения:

$$U_{\text{вmax}} = U_{\text{вн}} R_1 / r_6,$$

где $U_{\text{вн}}$ – номинальное значение напряжения обмотки возбуждения;

r_6 – значение активного сопротивления обмотки возбуждения.

Чрезмерное перенапряжение может привести к пробое изоляции обмотки возбуждения. Обычно принимают $R_1 / r_6 \leq 3-4$, тогда $U_{\text{вmax}} \leq (3-4)U_{\text{вн}}$ [13].

Сопротивление R_2 для каждой схемы включения определяется из соответствующего выражения.

Для схемы включения обмотки возбуждения (рис. 3.5а) сопротивление R_2 может быть определено из соотношения:

$$R_2 = \frac{R_1 r_6 (T_6 - T_6')}{(R_1 + r_6) T_6' - T_6 r_6}, \quad (3.19)$$

где $T_6 = L_6 / r_6$ – электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения генератора, с;

$T_{6i}' = \omega_{6i} / \varepsilon_p$ – электромагнитная постоянная времени контура возбуждения после введения R_1 и R_2 , с;

ω_{oi} – угловая скорость идеального холостого хода двигателя, работающего на i -характеристике, с^{-1} ;

$\varepsilon_p = d\omega_0 / dt$ – интенсивность разгона (торможения) двигателя, с^{-2} , определяемая через заданное ускорение тележки по (3.12).

В большинстве случаев в каталогах индуктивность обмотки возбуждения L_6 не приводится. Ее можно определить аналитически, используя кривую намагничивания генератора:

$$L_6 = 2P \Phi_z W_z \sigma / I_{6z}, \quad (3.20)$$

где $2P$ – число пар полюсов;

Φ_z – величина магнитного потока, соответствующего определенному значению току возбуждения I_{6z} , Вб (рис. 3.7а);

W_z – число витков на полюс;

$\sigma = 1,1-1,2$ коэффициент рассеяния магнитного потока под полюсами.

Из рисунка 3.7а очевидно, что отношение $\Phi_c/I_{\phi 2}$ (3.20) – величина переменная. Поэтому для упрощения расчетов берут усредненную величину, определяемую прямой 2 для конкретной кривой намагничивания генератора: $\Phi_c/I_{\phi 2} = tg\alpha$.

Из (3.19) следует, что при взятом соотношении $R_1/r_\phi = 3-4$ получить $T'_\phi < T_\phi/(4-5)$ невозможно, так как будут иметь место отрицательные значения R_2 , что физически невозможно. Чтобы обеспечить меньшее T'_ϕ , необходимо брать большие значения сопротивления R_1 , но в приемлемых пределах, так как увеличение R_1 приводит к росту $U_{\phi max}$ и может вызвать пробой изоляции обмотки возбуждения при ее отключении.

Для второго варианта включения обмотки возбуждения (рис. 3.6а) сопротивление резистора R_2 можно получить из схемы замещения для установившегося режима при $U'_\phi = \alpha U_{\phi n}$ и $I_{\phi yct} = I_{\phi n}$

$$R_2 = R_1 r_\phi (\alpha - 1) / (r_\phi + R_1) \quad (3.21)$$

где $\alpha = U'_\phi / U_{\phi n} = T_\phi \varepsilon_p / \omega_{oi}$ – коэффициент форсировки, показывающий, во сколько раз приложенное напряжение U'_ϕ выше номинального $U_{\phi n}$ (обычно берется в пределах $\alpha < (3-4)$, так как дальнейшее его увеличение мало сказывается на уменьшении времени нарастания тока возбуждения) [14].

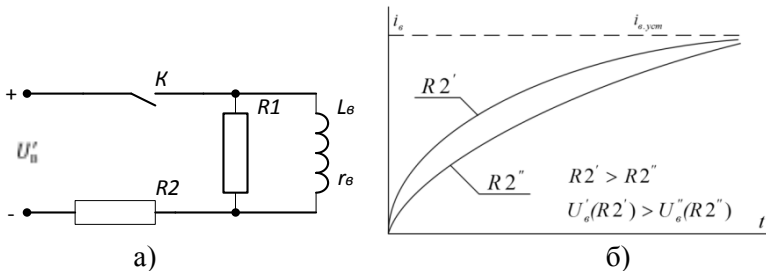


Рисунок 3.5 - а) схема включения обмотки возбуждения генератора;
б) кривые $I_\phi(t)$ в схеме с различными R_2

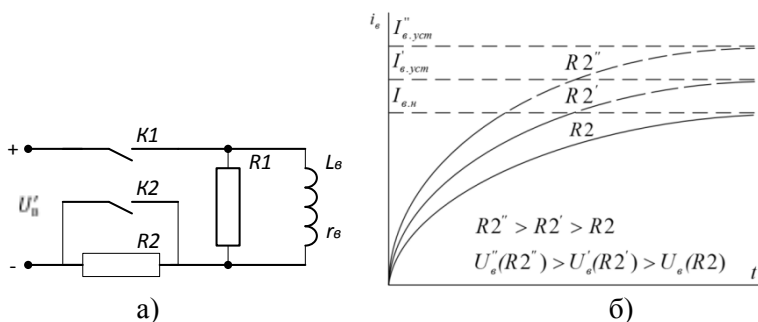


Рисунок 3.6 - а) схема включения обмотки возбуждения генератора; б) кривые $I_{\text{в}}(t)$ в схеме с различными R_2

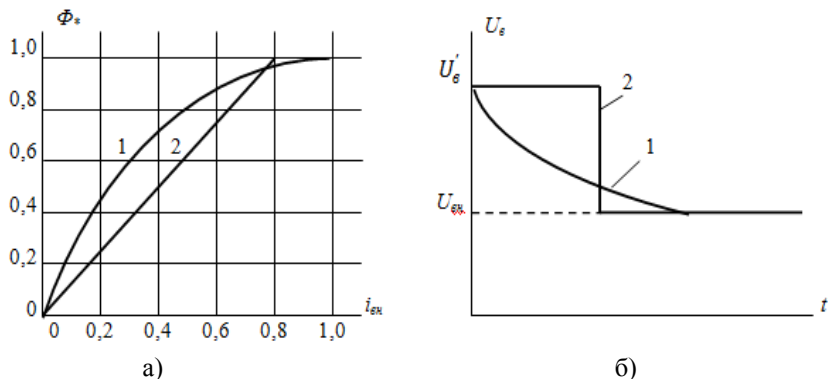


Рисунок 3.7 - а) кривая намагничивания генератора; б) кривые изменения $U_{\text{в}}(t)$ в схемах рисунка 3.5а (кривая 1) и 3.6а (кривая 2)

Величина напряжения на входе схемы возбуждения, обеспечивающая необходимую интенсивность нарастания тока возбуждения (ЭДС генератора), для обоих вариантов включения обмоток определяется в установившихся режимах одинаково:

$$U'_{\text{в}} = I_{\text{вн}}(r_{\text{в}} + R_2 + r_{\text{в}}R_2/R_I).$$

Построение переходных процессов в системе «генератор–двигатель» для каждой схемы включения обмоток возбуждения генератора ведется поэтапно (рис. 3.8 и 3.11).

3.2.1. Расчет и построение переходных процессов системы «генератор–двигатель» со схемой возбуждения для рисунка 3.5а

После подачи напряжения на схему возбуждения генератора ток обмотки возбуждения начинает увеличиваться, изменяясь по экспоненциальному закону:

$$i_{\theta} = I_{\text{вуст}}(1 - e^{-t/T_{\theta}'}) + I_{\text{внач}}e^{-t/T_{\theta}'}, \quad (3.22)$$

где $I_{\text{вуст}} = I_{\theta n} = U_{\theta}' / (r_{\theta} + R_2 + r_{\theta} R_2 / R_1)$;

$T_{\theta}' = L_{\theta}' / R_{\text{экв}} = L_{\theta}' / [r_{\theta} + R_1 R_2 / (R_1 + R_2)] = T_{\theta} / [1 + R_1 R_2 / (R_1 + R_2) r_{\theta}]$;

$R_{\text{экв}}$ – эквивалентное сопротивление схемы возбуждения генератора.

ЭДС генератора при ненасыщенном состоянии его магнитной цепи пропорциональна току возбуждения. Поэтому по аналогии с (3.22) ЭДС генератора:

$$E_z = E_{zo}(1 - e^{-t/T_{\theta}'}) + E_{zoнач}e^{-t/T_{\theta}'}, \quad (3.23)$$

где E_{zo} – ЭДС генератора, которая устанавливается после окончания переходного процесса, В;

$E_{zoнач}$ – ЭДС генератора, которая имела место до начала переходного процесса, В.

Количество участков на кривой переходного процесса для рисунка 3.5а меньше, чем для рисунка 3.6а. Для удобства сравнения кривых переходных процессов (рис. 3.8 и 3.11) на оси времени моменты перехода тележки на «ползучую» скорость для обоих рисунков обозначены одинаково, поэтому момент времени t_2 на рисунке 3.8 отсутствует.

Уравнение (3.23) позволяет списать изменение ЭДС генератора на всех участках движения тележки. На участке $0 - t_3$ используется только первое слагаемое, так как процесс начинается с момента подачи напряжения на схему возбуждения генератора и начальное значение его ЭДС $E_{zoнач} = 0$. При этом установившееся значение E_{zo} должно быть таким, чтобы обеспечивалось вращение двигателя с угловой скоростью $\omega_{\text{раб}}$ (рис. 3.8). Ее величина определяется, исходя из требуемой угловой скорости двигателя (скорости перемещения тележки):

$$E_{zo} = \omega_{\theta i} C_{\theta} + I_{ci} R_{яц} = v_{ip} C_{\theta} / R_{\theta} + I_{ci} R_{яц}, \quad (3.24)$$

где $\omega_{\theta i}$ – угловая скорость двигателя, соответствующая движению тележки со скоростями $v_{\text{раб}}$ или $v_{\text{полз}}$;

I_{ci} – величина тока двигателя при соответствующей статической нагрузке.

Если бы строилась кривая $e_z(t)$ на интервале от t_1 до t_3 , то в (3.23) должны учитываться оба слагаемых, где $E_{зонач} = I_{ci}R_{яц}$ – начальное значение ЭДС генератора, обеспечивающее протекание по цепи якоря тока I_{ci} , но при еще неподвижном якоре двигателя применяется уравнение (3.24).

При построении участка t_3 – t_4 , когда обмотка возбуждения генератора отключается от источника питания и оказывается закороченной на R_1 , используется второе слагаемое (3.23), где $E_{зонач} = E_{zo}$, определяемое по (3.24), а вместо T_e' записывается $T_e'' = L_e/(r_e + R_1)$. В момент времени t_4 , при снижении тока возбуждения до величины $i_{вполз}$, когда e_z в статическом режиме обеспечивала бы движение тележки с «ползучей» скоростью, обмотка возбуждения раскорачивается и на вход схемы возбуждения подается напряжение $U'_{вполз}$. ЭДС генератора уменьшается до $E_{зополз}$ и на участке t_4 – t_5 остается неизменной. Значение $E_{зополз}$ определяется в соответствии с (3.24).

Приравняв второе слагаемое (3.23) к $E_{зополз}$, можно получить выражение для определения длительности переходного процесса на данном участке

$$\Delta t_4 = t_4 - t_3 = T_e'' \ln(E_{зополз}/E_{зонач}). \quad (3.25)$$

В момент времени t_6 (последний участок) отключается питание обмотки возбуждения генератора и она оказывается закороченной на R_1 . При этом, как и при переходе на ползучую скорость, постоянная времени цепи возбуждения $T_e'' = L_e/(r_e + R_1)$. Для построения кривой $e_z(t)$ на последнем участке используется второе слагаемое уравнения (3.23), где $E_{зонач} = E_{зополз}$ и $T_e' = T_e''$.

Необходимо отметить, что на каждом очередном участке, описываемом выражением (3.23), отсчет текущего значения времени начинается с нуля.

Расчет переходных процессов $\omega_d(t)$, $i_d(t)$, $M_d(t)$ проводится с учетом изменения ЭДС генератора $e_z(t)$, а также с учетом электромеханической постоянной времени, обусловленной моментом инерции якоря двигателя и всех движущихся частей производственного механизма, приведенных к валу двигателя. Как правило, электромагнитная постоянная времени якорной цепи системы «генератор–двигатель» $T_{я} = L_{я}/r_{я}$ намного меньше (до двух поряд-

ков) постоянной времени обмотки возбуждения генератора T_6 , и ее обычно не учитывают. Ниже приводятся расчетные выражения без учета $T_я$.

На первом участке $0-t_1$ (рис. 3.11) после подачи напряжения на обмотку возбуждения (рис. 3.5а) двигатель будет неподвижен, пока его момент не достигнет величины M_c . Поэтому на первом участке рассматривается только электромагнитный переходный процесс и, следовательно, записывается уравнение равновесия ЭДС и напряжений якорной цепи системы «генератор–двигатель» при неподвижном якоре двигателя [6]:

$$i_d R_{яц} = e_z = E_{zo}(1 - e^{-t/T_6'}), \quad (3.26)$$

отсюда

$$i_d = E_{zo}(1 - e^{-t/T_6'})/R_{яц} = I_{кз}'(1 - e^{-t/T_6'}), \quad (3.27)$$

$$M_d = C_d i_d = C_d E_{zo}(1 - e^{-t/T_6'})/R_{яц} = M_{кз}'(1 - e^{-t/T_6'}) \quad (3.28)$$

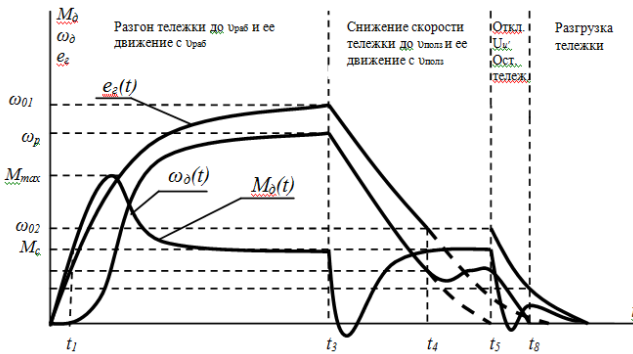


Рисунок 3.8 - Диаграммы зависимостей $\omega_d(M_d)$, $e_z(t)$, $\omega_d(t)$, $M_d(t)$ при движении груженой тележки снизу вверх и включении обмотки возбуждения генератора для рисунка 3.5а

Уравнения (3.27) и (3.28) справедливы на интервале первого участка $\Delta t_1 = t_1 - 0$. Продолжительность его можно определить из (3.28) при $M_d = M_c$:

$$\Delta t_1 = T_6' \ln[C_d E_{zo} / (C_d E_{zo} - M_c R_{яц})] = T_6' \ln[M_{кз}' / (M_{кз}' - M_c)]. \quad (3.29)$$

Для второго и последующих участков исходную систему уравнений можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} I_d R_{яц} + e_d &= e_z \\ M_d - M_c &= J_{пр} d\omega/dt, \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

где принято $M_d = C_d I_d$; $M_c = C_d I_c$; $e_d = C_d \omega_d$, $E_{zo} = C_d \omega_o$.

После преобразований получим исходные дифференциальные уравнения для определения $i_\delta(t)$ и $\omega_\delta(t)$:

$$\begin{aligned} di_\delta/dt + i_\delta/T_M &= I_c/T_M + 1/T_\delta'(I_{кз}' - I_{кзнач})e^{-t/T_\delta'} \\ d\omega_\delta/dt + \omega_\delta/T_M &= \omega_c/T_M - 1/T_M(\omega_o' - \omega_{онач})e^{-t/T_\delta'}, \end{aligned} \quad (3.31)$$

где $T_M = J_{пр}R_{яц}/C_\delta^2$ – электромеханическая постоянная времени электропривода, с;

$I_{кз}' = E_{zo}/R_{яц}$ – ток короткого замыкания, соответствующий электромеханической характеристике 2 (рис. 3.9), на которой будет работать двигатель после окончания переходного процесса в генераторе, А;

$I_{кзнач} = E_{zoнач}/R_{яц}$ – ток короткого замыкания, соответствующий электромеханической характеристике 1, на которой работал двигатель до начала переходного процесса в генераторе, А;

ω_o' – угловая скорость идеального холостого хода двигателя на характеристике 2, соответствующая E_{zo} , с⁻¹;

$\omega_{онач}$ – угловая скорость идеального холостого хода двигателя на характеристике 1, соответствующая $E_{zoнач}$, с⁻¹;

ω_o – угловая скорость двигателя при M_c , с⁻¹.

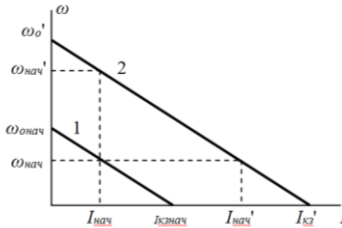


Рисунок 3.9 – Определение начальных условий при пуске

Решив исходные дифференциальные уравнения, получим:

$$i_\delta = \frac{i_{кз}' - i_{кзнач}}{T_\delta' - T_M} T_M (e^{-t/T_\delta'} - e^{-t/T_M}) + I_c (1 - e^{-t/T_M}) + I_{нач} e^{-t/T_M} \quad (3.32)$$

$$\omega_\delta = \frac{\omega_o' - \omega_{онач}}{T_\delta' - T_M} T_M' (e^{-t/T_M} - e^{-t/T_\delta'}) + (\omega_o' - \Delta\omega_c)(1 - e^{-t/T_M}) + \omega_{нач} e^{-t/T_M} \quad (3.33)$$

$$M_\delta = C_\delta i_\delta,$$

где $I_c = M_c/C_\delta$ – ток двигателя при M_c , А;

$I_{нач}$ – ток двигателя до начала переходного процесса, А;

$\omega_{нач}$ – угловая скорость двигателя до начала переходного процесса, с⁻¹.

Для участка t_1-t_3 $I_{кзнач} = I_c$, $I_{нач} = I_c$, $\omega_{онач} = \Delta\omega_c$, $\omega_{нач} = 0$.

Для участка t_3-t_4 , где происходит снижение скорости тележки до «ползучей», $I'_{кз} = 0$, $\omega'_o = 0$, так как отключается напряжение обмотки возбуждения, и она оказывается закороченной на резистор R_1 , что соответствует переходу с исходной характеристики 1 (рис. 3.10) на новую характеристику 2, проходящую через начало координат с $\omega'_o = 0$ и $I'_{кз} = 0$. $I_{кзнач}$ и $\omega_{oнач}$ соответствует току короткого замыкания и угловой скорости холостого хода исходной характеристики 1, на которой обеспечивается движение тележки с $v_{раб}$. $I_{нач} = I_c$, $\omega_{нач} = \omega_{раб}$, вместо T'_6 записывается T''_6 . При снижении тока возбуждения до величины $i_{вполз}$ и, соответственно, ЭДС генератора до $e_{гполз}$ на схему обмотки возбуждения генератора снова подается напряжение, равное $U_{дполз}$. На этом заканчивается рассматриваемый этап, длительность которого определяется по формуле (3.25).

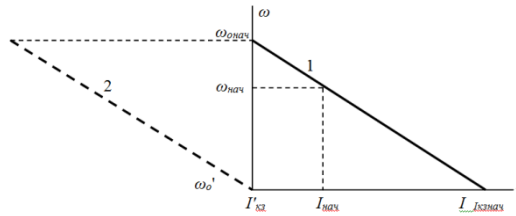


Рисунок 3.10 - Определение начальных условий при торможении

На участке t_4-t_5 в обмотке возбуждения генератора переходного процесса нет и двигатель работает на характеристике 1, $\omega_{нач}$ равны соответствующим значениям величин в конце предыдущего участка.

На участке t_5-t_6 после отключения питания обмотки возбуждения генератора изменения тока и угловой скорости (до остановки двигателя) описываются теми же уравнениями, что и на участке t_3-t_4 , т. е. $I'_{кз} = 0$, $\omega'_o = 0$. При этом $I_{кзнач}$ и $\omega_{онач}$ соответствуют току короткого замыкания и угловой скорости холостого хода исходной характеристики, где обеспечивалось движение тележки с $v_{полз}$: $I_{нач} = I_c$, $\omega_{нач} = \omega_{полз}$, $T'_6 = T''_6 = L_\sigma / (R_1 + r_\sigma)$. В момент времени t_6 двигатель останавливается, а ЭДС генератора $E_{зоост} = I_c R_{яц}$.

Время торможения двигателя определяется из (3.23), где второе слагаемое приравняется $e_z = I_c R_{яц}$, а $E_{зонач} = E_{зополз}$:

$$\Delta t_6 = t_6 - t_5 = T''_6 \ln(E_{зополз} / I_c R_{яц}). \quad (3.34)$$

На участке t_6-t_∞ , после остановки двигателя:

$$e_z = E_{\text{зонач}} e^{-t/T''_6} = i_0 R_{\text{яц}}, \quad (3.35)$$

где $E_{\text{зонач}}$ – ЭДС генератора в момент остановки двигателя, В.

$$M_\delta = C_\delta (E_{\text{зонач}}/R_{\text{яц}}) e^{-t/T''_6} = C_\delta I_c e^{-t/T''_6}. \quad (3.36)$$

Кривая динамической механической характеристики $\omega_\delta(M_\delta)$ строится по переходным кривым $\omega_\delta(t)$ и $M_\delta(t)$. При $t = t_i$ проводится вертикаль до пересечения с кривыми $\omega_\delta(t)$ и $M_\delta(t)$ и определяются координаты точки $\omega_{\delta i}$ и $M_{\delta i}$, которые наносятся в плоскости $\omega_\delta(M_\delta)$. Затем берется следующее t_i и через его конец проводится вертикаль. Точки пересечения вертикали с кривыми $\omega_\delta(t)$ и $M_\delta(t)$ определяют координаты следующей точки $\omega_{\delta i}$, $M_{\delta i}$ для плоскости $\omega_\delta(M_\delta)$ и т. д. Следует отметить, что максимальные значения тока якоря и, соответственно, момента двигателя зависят от соотношения постоянных времени электромеханической системы T_θ/T_m . Чем больше это соотношение, тем меньше отношение $I_{\text{нач}}/I_{\text{кз}}$. Поэтому максимумы момента в кривой будут меньше соответствующих моментов на нагрузочной диаграмме.

3.2.2. Расчет и построение переходных процессов системы «генератор–двигатель» со схемой возбуждения для рисунка 3.6а

Так же как и в предыдущем случае, после подачи напряжения на схему возбуждения генератора ток обмотки возбуждения начинает увеличиваться и изменяется по экспоненциальному закону:

$$I_g = \alpha I_{\text{вн}} (1 - e^{-t/T_6}) + I_{\text{внач}} e^{-t/T_6}. \quad (3.37)$$

При достижении тока возбуждения номинального значения $I_{\text{вн}}$ происходит расшунтирование резистора R_2 . Время нарастания тока возбуждения до $I_{\text{вн}}$ определяется по формуле:

$$t_{0.2} = T_6 \ln[\alpha/(\alpha-1)]. \quad (3.38)$$

По аналогии записывается и уравнение ЭДС генератора:

$$e_z = \alpha E_{\text{зо}} (1 - e^{-t/T_6}) + E_{\text{зонач}} e^{-t/T_6}. \quad (3.39)$$

Данное уравнение позволяет описать изменение ЭДС генератора на всех участках движения тележки (рис. 3.11).

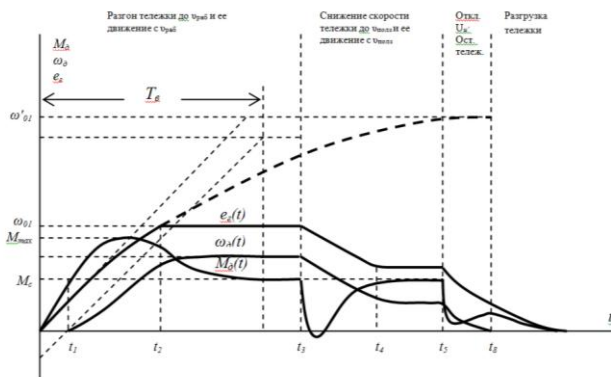


Рисунок 3.11 - Диаграммы зависимостей $\omega_d(M_d)$, $\alpha\omega_d(t)$, $\alpha\omega_c(t)$, $e_c(t)$, $\omega_d(t)$, $M_d(t)$ при движении груженой тележки снизу вверх и включении обмотки возбуждения генератора для рисунка 3.6а

На участке $0-t_2$ используется первое слагаемое, так как процесс начинается с момента подачи напряжения на схему возбуждения генератора и $E_{zoнач} = 0$. E_{zo} определяется по (3.24). В момент времени t_2 ЭДС генератора e_c достигает величины E_{zo} , которая обеспечивает вращение двигателя в установившемся режиме с $\omega_{раб.}$ и резистор R_2 расшунтируется. На интервале t_2-t_3 ЭДС генератора остается неизменной и равной E_{zo} .

В момент времени t_1 e_c достигнет величины, при которой обеспечивается протекание тока $i_d = I_c$ и $M_d = M_c$, после чего двигатель начнет вращаться. В соответствии с (3.24) $e_c = I_{ci}R_{яц.}$. В этом случае продолжительность интервала $0-t_1$ с учетом (3.40) определяется из выражения:

$$\Delta t_1 = T_\theta \ln[\alpha E_{zo} / (\alpha E_{zo} - I_{ci}R_{яц.})] = T_\theta \ln[\alpha I'_{кз} / (\alpha I'_{кз} - I_c)]. \quad (3.40)$$

Переход на полную скорость и последующая остановка тележки осуществляется аналогично предыдущей схеме включения обмотки возбуждения генератора.

Необходимо отметить, что на каждом очередном участке, описываемом соответствующим уравнением, отсчет текущего значения времени начинается с нуля.

Переходные процессы $\omega_d(t)$, $i_d(t)$ и $M_d(t)$ приведены на рисунке 3.11 и рассматриваются аналогично предыдущему варианту схемы возбуждения генератора. Ниже приводятся зависимости без учета постоянной времени якорной цепи.

На первом участке $0-t_1$, когда двигатель неподвижен, уравнение равновесия ЭДС и напряжений якорной цепи системы Г–Д с учетом (3.39) будет иметь вид:

$$i_{\delta} R_{яц} = e_z = \alpha E_{zo}(1 - e^{-t/T_6}), \quad (3.41)$$

тогда

$$i_{\delta} = \alpha E_{zo}(1 - e^{-t/T_6})/R_{яц} = \alpha I'_{кз}(1 - e^{-t/T_6}) \quad (3.42)$$

$$M_{\delta} = C_{\delta} i_{\delta} = C_{\delta} \alpha I'_{кз}(1 - e^{-t/T_6}), \quad (3.43)$$

где $I'_{кз}$ – ток короткого замыкания, соответствующий новой электрохимической характеристике I (рис. 3.9), на которой будет работать двигатель после окончания переходного процесса в генераторе. Продолжительность первого участка определяется из (3.40).

Для второго и последующих участков уравнение равновесия ЭДС и напряжений записывается, как и для (3.30), после преобразования которого получим исходные дифференциальные уравнения для определения $i_{\delta}(t)$, $M_{\delta}(t)$, $\omega_{\delta}(t)$, аналогично предыдущей схеме, где $T'_6 - T_6$, $I'_{кз} = \alpha I'_{кз}$, $\omega'_o = \alpha \omega'_o$. В уравнениях (3.32) и (3.33) необходимо провести те же замены, т. е. $T'_6 = T_6$, $I'_{кз} = \alpha I'_{кз}$, $\omega'_o = \alpha \omega'_o$.

На участке t_2-t_3 в момент времени t_2 происходит расшунтирование резистора R_2 и ЭДС генератора становится неизменной и равной E_{zo} , но величины $i_{\delta}(t)$ и $\omega_{\delta}(t)$ не достигнут еще своих установившихся значений, и переходный процесс будет еще продолжаться некоторое время. Зависимости $i_{\delta}(t)$ и $\omega_{\delta}(t)$ описываются уравнениями (3.32) и (3.33), где первые слагаемые равны нулю, так как $\alpha I'_{кз} = I_{кзнач}$ и $\alpha \omega'_o = \omega_{онач}$, а $I_{нач}$ и $\omega_{нач}$ равны соответствующим значениям в конце предыдущего участка.

На оставшихся участках все процессы рассматриваются точно так же, как и для схемы на рисунке 3.5а.

3.3. Проверка двигателя по условиям нагрева с учетом переходных режимов

Проверка предварительно выбранного двигателя проводится по нагреву путем определения наибольшего превышения температуры τ_{max} за цикл и сравнения его с допустимым превышением $\tau_{доп}$: $\tau_{max} \leq \tau_{доп}$. При этом требуется строить кривые нагрева. В курсовом проекте для этой цели можно воспользоваться одним из наиболее простых, хотя и менее точных, методов. При этом в ка-

жом конкретном случае необходимо приводить обоснование выбранного метода.

Метод средних потерь:

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_c + I_{\partial}^2 R, \quad (3.44)$$

где ΔP_c – мощность постоянных потерь;

$I_{\partial}^2 R$ – мощность переменных потерь, зависящая от нагрузки и определяемая через эквивалентный ток I_{∂} .

При построении графика $\Delta P(t)$ необходимо учитывать изменение условий теплоотдачи при различных угловых скоростях: $\Delta P_{cp} = \sum_{i=1}^m \Delta P_i t_i / \sum_{i=1}^n \beta_i t_i$. Затем определенные средние потери за цикл сопоставляются с номинальными:

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_n = P_n(1 - \eta_n) / \eta_n, \quad (3.45)$$

где P_n и η_n – номинальная мощность и КПД двигателя соответственно.

Данным методом можно пользоваться, если соблюдается условие: $t_{\eta} \ll T_n$ и $nt_{\eta} > 4T_n$, где t_{η} – время цикла; T_n – постоянная нагрева; n – число циклов. При этом условие расхождения между максимальным превышением температуры и его средним значением будет незначительно.

Метод эквивалентного тока:

$$I_{\partial} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i / \sum_{i=1}^n \beta_i t_i}, \quad (3.46)$$

где I_i – среднее значение тока на i -м участке, на которые разбивается кривая тока.

В общем случае при произвольной форме графика тока

$$I_{\partial} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \beta_i t_i} \int_0^{t_{\eta}} t^2(t) dt}. \quad (3.47)$$

Найденное значение эквивалентного тока сопоставляется с номинальным током двигателя. При $I_{\partial} \leq T_n$ двигатель отвечает условиям допустимого использования его по нагреву. Метод эквивалентного тока используется при условии неизменности сопротивления якорной цепи двигателя на всех участках графика нагрузки, потерь на возбуждение, постоянства потерь в стали и механических потерь от нагрузки.

Метод эквивалентного момента:

$$M_{\partial} = \sqrt{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i / \sum_{i=1}^n \beta_i t_i}. \quad (3.48)$$

Эквивалентный момент сопоставляется с номинальным моментом двигателя, если $M_3 \leq M_n$, то двигатель полностью используется по нагреву. Этот метод применим для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением, а также асинхронных и синхронных двигателей, работающих с номинальным (неизменным) магнитным потоком. При применении этого метода, как и предыдущего, должно выполняться условие неизменности постоянных потерь и активных сопротивлений двигателя.

Метод эквивалентной мощности:

$$P_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i \omega_n)^2 t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i t_i}}. \quad (3.49)$$

Выбор и проверка двигателя по нагреву проводится данным методом, если между мощностью и током существует прямая пропорциональность, т. е. при $\Delta P_c = const$, $R = const$, $\Phi = const$, $\omega = \omega_n = const$. Этим же методом можно воспользоваться и в случае переменной угловой скорости, если привести мощность при угловой скорости ω_i к эквивалентной мощности при $\omega = \omega_n$, используя соотношение $P_{3i} = P_i \omega_n / \omega_i$, как показано в вышеприведенной формуле. При этом должно выполняться условие: $P_3 \leq P_n$. Метод эквивалентной мощности может быть применен для проверки по нагреву асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока независимого возбуждения, работающих с номинальным потоком.

Все рассмотренные методы проверки двигателя по нагреву представляют собой методы эквивалентного преобразования реальной нагрузочной диаграммы к стандартной диаграмме соответствующего режима. К стандартному режиму S1 и, соответственно, к использованию двигателя продолжительного режима прибегают при переменной нагрузке или повторно-кратковременных режимах, когда продолжительность цикла $t_q > 10$ мин или ПВ% существенно превышает 60%. В последнем случае необходимо учитывать время пауз в знаменателе этих формул. К стандартному режиму S3 и, соответственно, к использованию двигателей определенной ПВ% прибегают, когда $t_q \leq 10$ мин и $ПВ\% \leq 60\%$. В этом случае необходимо сделать пересчет мощности двигателя, определяемой реальной нагрузочной диаграммой, на мощность ее стандартной ПВ%_{СТ}.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное назначение данного учебно-методического пособия – сформировать у студентов необходимые знания, умения и навыки по дисциплине «Электрический привод» для последующего углубленного изучения специальных дисциплин. Помимо этого, студент имеет возможность самостоятельно освоить разделы учебной дисциплины.

Предложенная методика выполнения курсового проекта дает студенту целостное представление о содержании и концепции изучаемого курса, о работе электропривода по системе «генератор–двигатель» и основных характеристиках промышленных механизмов циклического действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик и др. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
2. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977. 432 с.
3. Дранников В.Г., Звягин И.Е. Автоматизированный электропривод подъемнотранспортных машин. М.: Высшая школа, 1973. 280 с.
4. Капунцов Ю.Д., Елисеев В.А., Ильяшенко Л.А. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. М.: Высшая школа, 1979. 359 с.
5. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных установок. М.: Энергия, 1980. 360 с.
6. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебник для вузов. СПб.: Энергоатомиздат, 2000. 496 с.
7. Лихачев В.Л. Электродвигатели асинхронные. М.: Солон-Р, 2002. 304 с.
8. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под ред. И.П. Копылова и Б.К. Клопова. М.: Энергоатомиздат, 1988. Т. 1. 456 с.
9. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под ред. И.П. Копылова и Б.К. Клопова. М.: Энергоатомиздат, 1989. Т. 2. 688 с.
10. Соколов М.М. Автоматизированный электропривод для общепромышленных механизмов. М.: Энергия, 1976. 540 с.
11. Соколов Н.Г., Елисеев В.А. Расчеты по автоматизированному электроприводу металлорежущих станков. М.: Высшая школа, 1969. 296 с.
12. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. М.: Энергоатомиздат, 1983. 616 с.
13. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 2. Электротехнические устройства. 6 изд., испр. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1981. 640 с.
14. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 3. Использование электрической энергии. 7 изд., испр. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988. 616 с.
15. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1988. 344 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

**Таблица П1 - Двигатели постоянного тока типа П продолжительного режима, защищенные,
с самовентиляцией, независимого возбуждения**

Тип двигателя	Номинальная мощность двигателя P_n , кВт	Номинальная частота вращения двигателя n_n , об/мин	Номинальный ток якоря двигателя I_n , А	Сопротивление обмотки якоря и дополнительных полюсов $Z_a + Z_{дп}$, Ом	Число активных проводников яко- ря N	Сопротивление независимой об- мотки Z_b , Ом	Число витков независимой обмотки на полюс $W_{нз}$	Номинальный ток независимой обмотки $I_{Вн}$, А	Номинальный магнитный поток на полюс F_n , мВб	Номинальный КПД, %	Момент инерции якоря двигателя, кг*м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
П21	0,7	1500	4,3	6,75	2376	600	4800	0,3	3,1	73,6	0,042
П31	0,45	750	2,9	9,48	2844	605	5000	0,29	5,2	75	0,09
П31	0,7	1000	4,25	5,45	2160	470	4600	0,38	5,3	78,9	0,09
П31	1,5	1500	8,7	2,455	1512	470	4600	0,38	5,1	80,6	0,09
П32	0,7	750	4,2	4,98	1908	564	4600	0,31	8,1	81	0,116
П32	1	1000	5,7	3,17	1440	358	3600	0,49	4,3	83,6	0,116
П32	2,2	1500	12	1,205	936	358	3600	0,49	8,6	86,9	0,116
П41	1	750	6,8	5,35	1890	280	2100	0,6	3,6	66,9	0,15
П41	1,5	1000	9,3	2,9	1458	280	2100	0,6	3,8	75,2	0,15
П41	3,2	1500	18,4	1,032	972	198	1750	0,84	4	91,4	0,15
П42	1,5	750	9,75	2,92	1404	242	1800	0,69	5,1	74,1	0,18

Тип двигателя	Номинальная мощность двигателя Рн, кВт	Номинальная частота вращения двигателя n_n , об/мин	Номинальный ток якоря двигателя I_n , А	Сопротивление обмотки якоря и дополнительных полюсов $Z_a + Z_{дп}$, Ом	Число активных проводников якоря N	Сопротивление независимой обмотки Z_b , Ом	Число витков независимой обмотки на полюс $W_{нз}$	Номинальный ток независимой обмотки IBH, А	Номинальный магнитный поток на полюс Φ_n , мВб	Номинальный КПД, %	Момент инерции якоря двигателя, кг*м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
П42	2,2	1000	13,3	1,75	1080	243	1800	0,69	5,2	78,8	0,18
П42	4,5	1500	25,4	0,78	756	228	1350	0,73	5,1	82	0,18
П51	2,2	750	13,6	1,91	1364	168	1600	0,99	5,4	73,5	0,35
П51	3,2	1000	18,3	1,051	1054	168	1600	0,99	5,5	79,5	0,35
П51	6	1500	33,2	0,472	682	132	1500	1,27	5,8	82,2	0,35
П52	3,2	750	19	1,073	992	184	1650	0,91	7,7	81,5	0,4
П52	4,5	1000	25,2	0,632	744	184	1650	0,91	7,9	81,2	0,4
П52	8	1500	43,5	0,269	496	150	1500	1,11	8,2	83,6	0,4
П61	4,5	750	26	0,76	992	216	2200	0,77	7,7	78,7	0,56
П61	6	1000	32,6	0,494	744	158	1950	1,05	7,9	83,7	0,56
П61	11	1500	59,5	0,187	496	133	1800	1,25	8,2	84	0,56
П62	6	750	33,5	0,531	744	154	1800	1,08	10,5	81,4	0,65
П62	8	1000	43	0,328	558	136	1700	1,23	10,7	84,6	0,65
П62	14	1500	73,5	0,1275	370	116	1600	1,44	11,1	86,6	0,65
П71	7	750	42	0,546	810	106	1500	1,49	9,2	75,8	1,4
П71	10	1000	63	0,3	594	85	1400	1,85	9,7	82,8	1,4

Тип двигателя	Номинальная мощность двигателя P_n , кВт	Номинальная частота вращения двигателя n_n , об/мин	Номинальный ток якоря двигателя I_n , А	Сопротивление обмотки якоря и дополнительных полюсов $Z_a + Z_{дп}$, Ом	Число активных проводников якоря N	Сопротивление независимой обмотки Z_b , Ом	Число витков независимой обмотки на полюс $W_{нз}$	Номинальный ток независимой обмотки $I_{Вн}$, А	Номинальный магнитный поток на полюс Φ_n , мВб	Номинальный КПД, %	Момент инерции якоря двигателя, кг*м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
П71	19	1500	103	0,1235	396	76,8	1250	2,04	10,1	83,8	1,4
П72	10	750	58	0,357	594	92,5	1300	1,69	12,7	78,4	1,6
П72	12,5	1000	78	0,237	540	108	1450	1,46	10,7	72,8	1,6
П72	25	1500	132	0,0828	324	67	1100	2,34	12,5	86,1	1,6

$2P = 4$ – число полюсов (соединение последовательно).

$2a = 2$ – число параллельных ветвей якоря.

Таблица П2 - Основные технические характеристики электродвигателей серии 4А, 4АМ

Марка двигателя		Р, кВт	S, %	КПД %	Cosφ	M _{макс} / M _н	M _н / M _н	M _{мин} / M _н	I _н / I _н
Синхронная частота вращения 1500 об/мин									
4AA56A4 У3	4AAM56A4	0,12	8	63	0,66	2,2	2	1,2	5
4AA56B4 У3	4AAM56B4	0,18	8,7	64	0,64	2,2	2	1,2	5
4AA63A4 У3	4AAM63A4	0,25	8	68	0,65	2,2	2	1,2	5
4AA63B4 У3	4AAM63B4	0,37	9	68	0,69	2,2	2	1,2	5
4A71A4 У3	4AM71A4	0,55	8,7	70,5	0,7	2,2	2	1,6	4,5
4A71B4 У3	4AM71B4	0,75	8,7	72	0,73	2,2	2	1,6	4,5
4A80A4 У3	4AM80A4	1,1	6,7	75	81	2,2	2	1,6	5
4A80B4 У3	4AM80B4	1,5	6,7	77	0,83	2,2	2	1,6	5
4A90L4 У3	4AM90L4	2,2	5,4	80	83	2,2	2	1,6	6
4A100S4 У3	4AM100S4	3	5,3	82	0,83	2,2	2	1,6	6,5
4A100L4 У3	4AM100L4	4	5,3	84	0,84	2,2	2	1,6	6
4A112M4 У3	4AM112M4	5,5	5	85,5	0,86	2,2	2	1,6	7
4A132S4 У3	4AM132S4	7,5	3	87,5	0,86	2,2	2	1,6	7,5
4A132M4 У3	4AM132M4	11	2,8	87,5	0,86	2,2	2	1,6	7,5
4A160S4 У3	4AM160S4	15	2,7/2,5	89	0,88	2,2/2,6	1,4/1,6	1/1,3	7/7,5
4A160M4 У3	4AM160M4	18,5	2,7/2	90	0,88	2,2/2,6	1,4/1,6	1/1,3	7/7,5
4A180S4 У3	4AM180S4	22	2	90/90,5	0,9/0,89	2,2/2,5	1,4/1,6	1/1,3	7/6,5
4A180M4 У3	4AM180M4	30	2	91	0,89	2,2/2,5	1,4/1,5	1/1,3	7/6,5
4A200M4 У3	4AM200M4	37	1,7/2	91,5	0,9/0,89	2,2/2,4	1,4/1,5	1/1,2	7/6,5
4A200L4 У3	4AM200L4	45	1,8/2	92	0,9/0,89	2,2/2,4	1,4/1,5	1/1,2	7/6,5

4A225M4 Y3	4AM225M4	55	2	92,5	0,9/0,89	2,2	1,2/1,4	1/1,2	7/6,5
4A250S4 Y3	4AM250S4	75	1,4	93	0,9	2,2	1,2/1,3	1/1,2	7/6,5
4A250M4 Y3	4AM250M4	90	1,3	93	0,91	2,2	1,2/1,3	1/1,2	7/6,5
4A280S4 Y3	4AM280S4	110	2,3	92,5	0,9	2	1,2	1	7
4A280M4 Y3	4AM280M4	132	2,3	93	0,9	2	1,2	1	6,5
4A315S4 Y3	4AM315S4	160	2	93,5	0,91	1,9	1	0,9	7
4A315M4 Y3	4AM315M4	200	1,7	94	0,92	1,9	1	0,9	7
4A355S4 Y3	4AM355S4	250	1,7	94,5	0,92	1,9	1	0,9	7
4A355M4 Y3	4AM355M4	315	1,7	94,5	0,92	1,9	1	0,9	7
Синхронная частота вращения 1000 об/мин									
4AA63A6 Y3	4AAM63A6	0,18	11,5	56	0,62	2,2	2	1,2	4
4AA63B6 Y3	4AAM63B6	0,25	10,8	59	0,62	2,2	2	1,2	4
4A71A6 Y3	4AM71A6	0,37	8	64,5	0,69	2,2	2	1,6	4
4A71B6 Y3	4AM71B6	0,55	8	67,5	0,71	2,2	2	1,6	4
4A80A6 Y3	4AM80A6	0,75	8	69	0,74	2,2	2	1,6	4
4A80B6 Y3	4AM80B6	1,1	8	74	0,74	2,2	2	1,6	4
4A90L6 Y3	4AM90L6	1,5	6,4	75	0,74	2,2	2	1,6	5,5
4A100L6 Y3	4AM100L6	2,2	5,1	81	0,73	2,2	2	1,6	5,5
4A112MA6 Y3	4AM112MA6	3	5,5	81	0,76	2,2	2	1,6	6
4A112MB6 Y3	4AM112MB6	4	5,1	82	0,81	2,2	2	1,6	6
4A132S6 Y3	4AM132S6	5,5	4,1	85	0,8	2,2	2	1,6	7
4A132M6 Y3	4AM132M6	7,5	3,2	85,5	0,81	2,2	2	1,6	7
4A160S6 Y3	4AM160S6	11	3/2,5	86/86,5	0,86/0,82	2/2,5	1,2/1,5	1/1,3	6/6,5
4A160M6 Y3	4AM160M6	15	3/2,5	87,5/88	0,87/0,82	2/2,5	1,2/1,5	1/1,3	6/6,5
4A180M6 Y3	4AM180M6	18,5	2,7/2,5	88	0,87/0,85	2	1,2/1,5	1/1,3	6/6,5

4A200M6 Y3	4AM200M6	22	2,5/2	90	0,9/0,86	2/2,3	1,2/1,5	1/1,3	6,5
4A200L6 Y3	4AM200L6	30	2,3/2	90,5	0,9/0,86	2/2,3	1,2/1,5	1/1,3	6,5
4A225M6 Y3	4AM225M6	37	2	91	0,89/0,86	2	1,2/1,5	1/1,2	6,5
4A250S6 Y3	4AM250S6	45	1,5	91,5	0,89/0,85	2	1,2/1,3	1/1,1	7/6,5
4A250M6 Y3	4AM250M6	55	1,5	92	0,88/0,85	2	1,2/1,3	1/1,1	7/6,5
4A280S6 Y3	4AM280S6	75	2	92	0,89	1,9	1,2	1	7
4A280M6 Y3	4AM280M6	90	2	92,5	0,89	1,9	1,2	1	7
4A315S6 Y3	4AM315S6	110	2	93	0,9	1,9	1	0,9	7
4A315M6 Y3	4AM315M6	132	2	93,5	0,9	1,9	1	0,9	7
4A355S6 Y3	4AM355S6	160	1,8	93,5	0,9	1,9	1	0,9	7
4A355M6 Y3	4AM355M6	200	1,8	94	0,9	1,9	1	0,9	7
Синхронная частота вращения 750 об/мин									
4A71B8 Y3	4AM71B8	0,25	9,3/10	56/58	0,65/0,66	1,7	1,6	1,2	3,5
4A80A8 Y3	4AM80A8	0,37	10	61,5/62	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5
4A80B8 Y3	4AM80B8	0,55	10	64	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5
4A90LA8 Y3	4AM90LA8	0,75	6/7	68/70	0,62/0,66	1,7	1,6	1,2	3,5
4A90LB8 Y3	4AM90LB8	1,1	7	70/72	0,68/0,7	1,7	1,6	1,2	3,5
4A100L8 Y3	4AM100L8	1,5	7/10	74/76	0,65/0,73	1,7	1,6	1,2	5,5
4A112MA8	4AM112MA8	2,2	6	76,5	0,71	2,2	1,8	1,4	6
4A112MB8	4AM112MB8	3	6,5	79	0,74	2,2	1,8	1,4	6
4A132S8 Y3	4AM132S8	4	4,1	83	0,7	2,2	1,8	1,4	6
4A132M8 Y3	4AM132M8	5,5	4,5	83	0,74	2,2	1,8/2	1,4	6
4A160S8 Y3	4AM160S8	7,5	2,7	86	0,75	2,2	1,4/1,5	1/1,1	6
4A160M8 Y3	4AM160M8	11	2,7	87	0,75	2,2	1,4/1,5	1/1,1	6
4A180M8 Y3	4AM180M8	15	2,6/2,5	87/88	0,82/0,83	2/2,2	1,2/1,4	1/1,1	6/5,5

4A200M8 Y3	4AM200M8	18,5	2,5/2	88,5	0,84/0,8	2,2/2	1,2/1,4	1/1,1	6/5,5
4A200L8 Y3	4AM200L8	22	2,7/2	88,5	0,84/0,8	2	1,2/1,4	1/1,1	6/5,5
4A225M8 Y3	4AM225M8	30	2	90	0,81/0,8	2	1,2/1,4	1/1,1	6/5,5
4A250S8 Y3	4AM250S8	37	1,6/1,5	90/90,5	0,83/0,8	2	1,2/1,4	1/1,1	6/5,5
4A250M8 Y3	4AM250M8	45	1,4/1,5	91,5	0,82/0,8	2	1,2/1,3	1/1,1	6/5,5
4A280S8 Y3	4AM280S8	55	2,2	92	0,84	1,9	1,2	1	6,5
4A280M8 Y3	4AM280M8	75	2,2	92,5	0,85	1,9	1,2	1	6,5
4A315S8 Y3	4AM315S8	90	2	93	0,85	1,9	1	0,9	6,5
4A315M8 Y3	4AM315M8	110	2	93	0,85	1,9	1	0,9	6,5
4A355S8 Y3	4AM355S8	132	2	93,5	0,85	1,9	1	0,9	6,5
4A355M8 Y3	4AM355M8	160	2	93,5	0,85	1,9	1	0,9	6,5

Таблица ПЗ-Технические характеристики редукторов

Частота вращения вх. вала, об/мин	Режим работы	Номинальный крутящий момент, Нм								
Передаточное число	номин.	50,00	40,00	31,50	22,40	20,00	16,00	12,50	10,00	8,00
	фактич.	48,57	40,17	31,50	23,34	20,49	15,75	12,64	10,35	8,23
PM-250										
600	Особо легкий	1779	1791	1756	1747	1729	1655	1650	1549	1389
	ПВ = 15%	928	895	903	929	946	903	865	791	734
	ПВ = 25%	773	768	802	818	816	777	745	692	642
	ПВ = 40%	657	640	702	706	685	652	624	593	550
	ПВ=100%	271	256	276	279	277	301	302	297	288
750	Особо легкий	1795	1792	1724	1693	1723	1628	1610	1492	1323
	ПВ = 15%	928	870	882	921	940	804	741	726	651
	ПВ = 25%	805	768	762	802	809	704	644	634	567
	ПВ = 40% .	681	666	642	683	679	603	547	528	473
	ПВ = 100%	248	256	281	267	261	281	290	290	294
1000	Особо легкий	1670	1766	1716	1672	1705	1590	1549	1406	1240
	ПВ = 15%	835	922	783	803	784	690	666	614	537
	ПВ = 25%	742	806	692	691	686	600	581	535	466
	ПВ = 40%	650	691	602	647	588	510	496	455	395
	ПВ = 100%	255	250	271	268	274	300	290	297	296

1250	Особо легкий	1781	1781	1711	1638	1664	1560	1474	1311	1147
	ПВ = 15%	816	798	723	712	722	624	592	514	466
	ПВ = 25%	705	706	627	623	628	540	514	450	403
	ПВ = 40%	594	614	530	534	534	456	437	387	340
	ПВ = 100%	260	246	265	267	267	288	301	292	296
1500	Особо легкий	1761	1741	1688	1624	1598	1530	1401	1241	1056
	ПВ = 15%	742	742	623	641	668	550	559	462	400
	ПВ = 25%	649	640	543	551	576	480	446	403	348
	ПВ = 40%	556	538	462	462	485	410	381	343	296
	ПВ = 100%	247	243	271	268	262	300	308	297	291
PM-350										
600	Особо легкий	4254	4222	4113	3977	3817	3762	3643	3593	3460
	ПВ = 15%	2166	2175	2357	2304	2251	2332	2254	2142	2005
	ПВ = 25%	1856	1855	2056	2007	1958	2031	1952	1862	1743
	ПВ = 40%	1624	1599	1705	1710	1664	1730	1671	1582	1481
	ПВ=100%	657	608	602	595	587	677	684	692	695
750	Особо легкий	3836	4145	4253	3925	3837	3692	3623	3428	3407
	ПВ = 15%	2166	2098	2327	2230	2140	2247	2109	2004	1835
	ПВ = 25%	1856	1842	2006	1933	1853	1946	1836	1740	1594
	ПВ = 40% .	1609	1586	1725	1635	1592	1665	1562	1477	1352
	ПВ = 100%	588	563	602	595	600	682	692	738	681

1000	Особо легкий	4037	4068	3973	3835	3759	3611	3502	3362	3184
	ПВ = 15%	2135	2111	2257	2141	2055	2092	1944	1790	1691
	ПВ = 25%	1856	1842	1956	1851	1801	1821	1691	1552	1463
	ПВ = 40%	1624	1535	1655	1583	1527	1550	1437	1315	1242
	ПВ = 100%	580	576	602	602	607	692	688	692	684
1250	Особо легкий	4121	4053	3900	3746	3680	3491	3333	3204	3019
	ПВ = 15%	2116	2057	2167	2034	2020	1938	1710	1661	1541
	ПВ = 25%	1819	1781	1878	1766	1754	1685	1488	1432	1352
	ПВ = 40%	1633	1535	1589	1498	1488	1433	1266	1218	1151
	ПВ = 100%	594	583	602	607	595	686	686	688	623
1500	Особо легкий	4022	3889	3772	3642	3524	3361	3180	3164	2778
	ПВ = 15%	2042	1996	2147	1933	1932	1816	1691	1714	1415
	ПВ = 25%	1794	1740	1866	1680	1684	1575	1465	1384	1232
	ПВ = 40%	1516	1484	1585	1427	1436	1344	1248	1173	1059
	ПВ = 100%	588	588	602	610	600	692	684	626	687
PM-400										
600	Особо легкий	8507	8251	7875	7322	7015	5768	5233	4862	4259
	ПВ = 15%	3480	3710	3160	11150	9788	2984	2858	2670	2503
	ПВ = 25%	3016	3198	2759	3010	3034	2608	2496	2324	2175
	ПВ = 40%	2552	2750	2357	2564	2578	2207	2113	1978	1848
	ПВ=100%	1237	1215	1254	1264	1272	1329	1349	1351	1337

750	Особо легкий	8476	8187	7785	6987	6656	5517	5072	4549	4036
	ПВ = 15%	3217	3377	3050	3092	3132	2648	2512	2360	2202
	ПВ = 25%	2784	2917	2648	2706	2715	2307	2190	2057	3491
	ПВ = 40% .	2351	2507	2247	2289	2323	1966	1868	1754	1625
	ПВ = 100%	1176	1126	1244	1249	1253	1344	1353	1345	1342
1000	Особо легкий	8353	8059	7373	6690	6264	5191	4649	4153	3578
	ПВ = 15%	2691	3070	2739	2720	2643	2317	2246	2077	1769
	ПВ = 25%	2320	2686	2378	2364	2290	2016	1956	1810	1549
	ПВ = 40%	1995	2264	2016	2007	1860	1715	1667	1543	1282
	ПВ = 100%	1160	1151	1234	1249	1253	1279	1340	1335	1337
1250	Особо легкий	8353	7983	6982	6244	5873	4815	4299	3797	3271
	ПВ = 15%	2747	2825	2408	2408	2427	2095	1913	1819	1541
	ПВ = 25%	2376	2456	2095	2105	2114	1830	1662	1519	1352
	ПВ = 40%	2005	2088	1782	1784	1801	1553	1411	1329	1145
	ПВ = 100%	1151	1136	1252	1249	1253	1264	1353	1345	1352
1500	Особо легкий	8198	7804	6721	5946	5547	4514	3985	3527	3093
	ПВ = 15%	2475	2507	2147	2215	2127	1886	1731	1549	1363
	ПВ = 25%	2166	2200	1886	1933	1918	1645	1497	1351	1179
	ПВ = 40%	1825	1868	1605	1635	1631	1394	1272	1147	1006
	ПВ = 100%	835	1151	1244	1264	1266	1274	1296	1233	1195

PM-500										
600	Особо легкий	14230	13113	13292	13194	13051	12540	11875	10712	9304
	ПВ = 15%	7193	7100	7423	7805	7341	7022	6642	6180	5766
	ПВ = 25%	6265	6205	6470	6541	6460	6144	5837	5439	4980
	ПВ = 40%	5336	5245	5467	5575	5481	5141	4931	4532	4259
	ПВ=100%	2166	2047	2157	2156	2153	2332	2315	2324	2320
750	Особо легкий	13921	14072	13442	13082	12920	12239	10949	9888	8597
	ПВ = 15%	7177	7062	6982	7284	7178	6220	5958	5669	5137
	ПВ = 25%	6249	6141	6059	6244	6264	5417	5153	4878	4456
	ПВ = 40%	5321	5219	5136	5382	5325	4615	4347	4153	3774
	ПВ = 100%	2042	1945	2167	2170	2166	2307	2319	2320	2317
1000	Особо легкий	13689	13624	13091	12710	12529	11286	10023	8900	7627
	ПВ = 15%	6775	6946	7223	6244	6166	5342	5193	4796	4128
	ПВ = 25%	5893	6025	5447	5463	5383	4665	4529	4153	3617
	ПВ = 40%	5012	5143	4635	4527	4503	3912	3864	3510	3067
	ПВ = 100%	1995	1996	2167	2163	2153	2317	2319	2324	2107
1250	Особо легкий	13550	13509	12760	12309	12685	10353	9178	8069	6856
	ПВ = 15%	6274	6601	5537	5619	5622	4815	4589	4114	3586
	ПВ = 25%	5457	5680	4936	4906	4855	4213	4009	3520	3114
	ПВ = 40%	4640	4820	4165	4192	3994	3551	3381	3006	2642
	ПВ = 100%	2005	1996	2167	2159	2161	2323	2319	2096	2170

1500	Особо легкий	13302	13305	12640	12041	11746	9630	8373	7317	5897
	ПВ = 15%	5816	5885	5216	5500	5220	4364	4025	3626	3171
	ПВ = 25%	5043	5117	4514	4757	4503	3812	3502	3131	2752
	ПВ = 40%	4300	4350	3852	4014	3785	3210	2979	2670	2333
	ПВ = 100%	1980	1996	2167	2170	2166	2307	2013	2110	2097
PM-650										
600	Особо легкий	33256	32622	31600	30847	29690	24076	21536	19282	17561
	ПВ = 15%	15855	16631	14797	15609	15824	13794	13083	12360	11270
	ПВ = 25%	13844	14392	12790	13565	13703	11913	11472	10712	9829
	ПВ = 40%	11756	12281	10784	11521	11583	10032	9661	9064	8322
	ПВ=100%	5182	4925	5166	5129	5155	5517	5535	5521	5504
750	Особо легкий	32792	32238	30898	29137	27668	22471	19966	17799	15307
	ПВ = 15%	14540	15351	13242	14123	14356	12038	11432	11075	9960
	ПВ = 25%	12684	512	11637	12190	12398	10634	9983	9625	8702
	ПВ = 40% .	10766	11258	9831	10406	10571	8928	8453	8174	7339
	ПВ = 100%	4764	4708	5136	5173	5090	5517	5636	5537	5032
1000	Особо легкий	32483	31470	29794	26536	24862	20013	17873	15624	13839
	ПВ = 15%	13225	13816	12189	12264	12529	10383	10265	9394	8335
	ПВ = 25%	11601	12089	10684	10704	10963	9029	8816	8207	7077
	ПВ = 40%	9745	10170	9029	9031	9201	7674	7548	6922	5976
	ПВ = 100%	4687	4912	5116	5129	5188	5568	5555	4994	5032

1250	Особо легкий	31555	30703	28410	24440	22708	18418	16134	14002	
	ПВ = 15%	12251	12588	10955	10971	11432	9510	8888	8069	
	ПВ = 25%	10580	10899	9510	9544	9945	8246	7729	6922	
	ПВ = 40%	9095	9364	8065	8295	8457	6982	6569	5854	
	ПВ = 100%	4715	4759	5176	5173	5168	5537	5024	5023	
1500	Особо легкий	30781	29935	26484	22448	21012	16954			
	ПВ = 15%	11292	11386	9731	10258	10506	8527			
	ПВ = 25%	9899	9850	8427	8920	9136	7423			
	ПВ = 40%	8353	8443	7223	7582	7830	6320			
	ПВ = 100%	4702	4708	5116	5129	5155	5016			
PM-750										
600	Особо легкий	49497	46694	44641	43483	42741	39374	35021	31148	26865
	ПВ = 15%	24749	24626	25581	26016	25449	24076	23146	21260	19788
	ПВ = 25%	21655	21428	22070	22671	22186	21067	20127	18458	17167
	ПВ = 40%	18175	18230	18809	19326	18924	17806	17108	15657	14546
	ПВ=100%	7347	7036	7273	7247	7341	7900	7850	7828	7863
750	Особо легкий	46404	46054	44139	42517	41501	36515	32203	28347	24637
	ПВ = 15%	24749	24306	24076	24975	24796	21468	20449	19381	17613
	ПВ = 25%	21346	20980	20866	21704	21664	18659	17712	16876	15307
	ПВ = 40% .	18258	17910	17856	18434	18271	15850	15136	14371	13000
	ПВ = 100%	6806	6703	7303	7284	7308	7825	7809	7911	7129

1000	Особо легкий	45476	44519	42434	40807	40131	32352	28379	24721	
	ПВ = 15%	23666	23795	21668	21630	21142	18358	17994	16612	
	ПВ = 25%	20418	20724	18960	18954	18402	15950	15699	14437	
	ПВ = 40%	17169	17654	15950	16055	15661	13543	13284	12262	
	ПВ = 100%	6729	6716	7163	7805	7341	7825	7125	7120	
1250	Особо легкий	44176	43905	41411	39246	36020	28891	25119		
	ПВ = 15%	21531	22413	19261	19445	19263	16612	15651		
	ПВ = 25%	18933	19650	16853	16947	16914	14446	13719		
	ПВ = 40%	15963	16579	14205	14271	14408	12279	11593		
	ПВ = 100%	6719	6755	7343	7314	7282	7102	7149		
1500	Особо легкий	43620	42216	40127	36422	33279	26584			
	ПВ = 15%	20108	20213	17255	17839	17619	15048			
	ПВ = 25%	17324	17654	15048	15461	15400	13041			
	ПВ = 40%	14849	15096	12640	13231	13051	11135			
	ПВ = 100%	6651	6780	7323	7136	7308	7123			

Таблица П4- Примерные значения коэффициентов β_o для двигателей различного исполнения

Закрытый с независимой вентиляцией	1
Закрытый без принудительного охлаждения	0,95–0,95
Закрытый самовентилируемый	0,45–0,55
Самовентилируемый защищённый	0,25–0,35

Учебное издание

**Иванов Геннадий Викторович
Мезенцева Антонина Викторовна**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО МЕХАНИЗМА

Учебно-методическое пособие

Литературный редактор *Т.А. Фридман*
Технический редактор *Т.А. Фридман*

Изд. лиц. ЛР № 020742. Подписано в печать 29.05.2019
Формат 60×84/16. Бумага для множительных аппаратов
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. листов 3,9
Заказ 2081

*Отдел издательской политики и обеспечения публикационной деятельности
628615, Тюменская область, г. Нижневартовск, ул. Дзержинского, 11
Тел./факс: (3466) 43-75-73, e-mail: izdatelstvo@nggu.ru*