

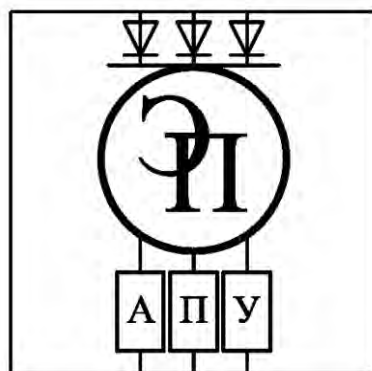
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТИПОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов специальности  
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
очной и заочной форм обучения*

Часть 2



Могилёв 2019



УДК 62-83  
ББК 31.291  
А 22

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой ЭПиАПУ «4» февраля 2019 г., протокол № 7

Составитель ст. преподаватель Л. В. Жесткова

Рецензент канд. техн. наук, доц. В. М. Ковальчук

Даны задания к практическим занятиям по дисциплине «Автоматизированный электропривод типовых производственных и транспортных механизмов» для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» очной и заочной форм обучения.

Учебно-методическое издание

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТИПОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Часть 2

Ответственный за выпуск	Г. С. Леневский
Технический редактор	А. А. Подошевка
Компьютерная вёрстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 115 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, Могилёв.

© Белорусско-Российский  
университет, 2019



## Содержание

Введение.....	4
1 Расчёт моментов нагрузки механизма подъёма мостового крана и построение нагрузочных и скоростных диаграмм.....	5
1.1 Постановка задачи.....	5
1.2 Рекомендации к выполнению расчётов .....	6
2 Расчёт моментов нагрузки механизма передвижения мостового крана и построение нагрузочных и скоростных диаграмм .....	8
2.1 Постановка задачи.....	8
2.2 Рекомендации к выполнению расчётов .....	9
3 Выбор электродвигателя крановых механизмов методом эквивалентного КПД.....	10
3.1 Постановка задачи.....	10
3.2 Рекомендации к выполнению расчётов .....	11
4 Расчёт моментов нагрузки механизма подъёма пассажирского лифта и построение нагрузочных и скоростных диаграмм. Расчёт мощности и выбор электродвигателя.....	18
4.1 Постановка задачи.....	18
4.2 Рекомендации к выполнению расчётов .....	20
Список литературы .....	36



## Введение

Практические занятия по дисциплине «Автоматизированный электропривод типовых производственных и транспортных механизмов» позволяют студентам овладеть методиками расчёта статических нагрузок и выбора двигателей типовых производственных и транспортных механизмов: кранов и лифтов.

Подъёмные краны и лифты являются классическим примером типовых производственных и транспортных механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме. Это машины, которые служат для вертикального и горизонтального перемещения грузов. Они могут быть объектом курсового и дипломного проектирования.

Выполнение практических работ № 5–7 (задания 1–3) помогает в усвоении методики расчёта и выбора двигателей механизмов подъёма и передвижения кранов различными методами и построения скоростных диаграмм движения рабочего органа.

Выполнение практической работы № 8 (задание 4) поможет в усвоении методики расчёта мощности и выбора двигателей механизма подъёма пассажирского лифта и построения скоростных диаграмм движения рабочего органа.

Методические рекомендации являются основой для самостоятельной подготовки студентов и проведения аудиторных практических занятий по дисциплине «Автоматизированный электропривод типовых производственных и транспортных механизмов».



# 1 Расчёт моментов нагрузки механизма подъёма мостового крана и построение нагрузочных и скоростных диаграмм

## 1.1 Постановка задачи

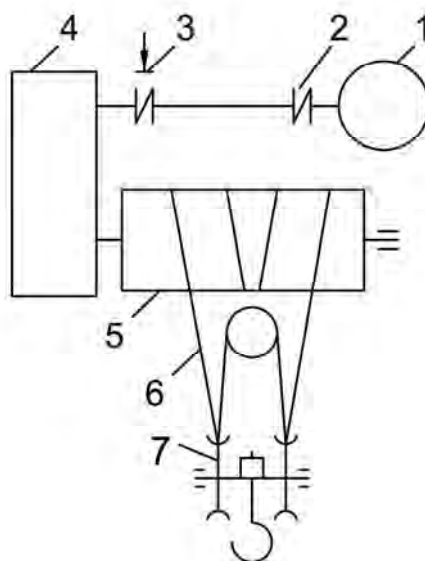
Выбрать асинхронный двигатель с  $n_0 = 750$  об/мин для электропривода механизма подъёма мостового крана. Исходные данные для расчёта в соответствии с вариантами приведены в таблицах 1.1 и 1.2. Номер варианта соответствует номеру студента в списке группы по журналу. Кинематическая схема механизма подъёма приведена на рисунке 1.1.

Таблица 1.1 – Исходные данные для расчётов

Наименование параметра	Последняя цифра номера варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Грузоподъёмность $G_{гр}$ , т	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Масса крюка $G_0$ , т	2,3	3,0	4,0	4,5	5,0	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
Высота подъёма $h$ , м	12	10	12	14	20	15	16	18	12	18

Таблица 1.2 – Исходные данные для расчётов

Наименование параметра	Предпоследняя цифра номера варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Скорость подъёма $V_n$ , м/с	0,27	0,3	0,28	0,32	0,26	0,34	0,33	0,29	0,25	0,35
Диаметр барабана $D_B$ , мм	400	400	450	450	500	500	450	400	450	500
КПД редуктора $\eta_{ном}$	0,85	0,87	0,82	0,80	0,86	0,85	0,82	0,85	0,87	0,87
КПД редуктора $\eta_0$	0,40	0,43	0,40	0,40	0,44	0,42	0,45	0,45	0,45	0,40



1 – двигатель; 2 – муфта; 3 – тормоз; 4 – редуктор; 5 – барабан; 6 – полиспаст; 7 – крюковая подвеска

Рисунок 1.1 – Кинематическая схема механизма подъёма

В расчётной части должны быть отражены следующие вопросы:

- 1) исходные данные для выполнения расчётов, кинематическая схема механизма передвижения;
- 2) определение передаточного числа редуктора;
- 3) определение статических моментов при подъёме и опускании груза и пустого крюка;
- 4) построение нагрузочной диаграммы за цикл;
- 5) выбор асинхронного электродвигателя краново-металлургической серии;
- 6) определение времени переходного процесса всех четырёх режимов и времени движения с установившейся скоростью;
- 7) определение динамических моментов при подъёме и спуске как груза, так и пустого крюка;
- 8) построение нагрузочной диаграммы за полный цикл работы механизма подъёма крана с учётом статических и динамических моментов;
- 9) проверка выбранного двигателя по нагреву;
- 10) проверка выбранного двигателя по перегрузочной способности;
- 11) построение скоростных диаграмм за полный цикл работы механизма подъёма крана.

## 1.2 Рекомендации к выполнению расчётов

Для выполнения задания необходимо изучить основные теоретические положения, изложенные в [1, гл. 2; 2, гл. 3.3; 3, гл. 3.2].

На основании заданной грузоподъёмности и типа крана выбирается конструктивное исполнение полиспаста, который представляет собой систему подвижных и неподвижных блоков, огибаемых канатом, и служит для выигрыша в силе. Полиспаст характеризуется кратностью  $i_{\Pi}$ :

$$i_{\Pi} = V_B / V_{\Pi} = n_K / n_{KB}, \quad (1.1)$$

где  $V_B$  – скорость барабана, м/с;

$V_{\Pi}$  – скорость подъёма груза, м/с;

$n_K$  – число несущих ветвей каната;

$n_{KB}$  – число ветвей каната, спускающихся с барабана; для сдвоенных полиспастов  $n_{KB} = 2$ .

Крановые полиспасты изготавливаются как простые, так и сдвоенные. В мостовых кранах применяют только сдвоенные полиспасты.

Рекомендовано следующее число несущих ветвей каната в соответствии с таблицей 1.3.

Коэффициент полезного действия (КПД) полиспаста  $\eta_{\Pi} = 0,95$ .

Коэффициенты полезного действия (КПД) редуктора при подъёме груза  $\eta_{ном}$  и пустого крюка  $\eta_0$  приведены в таблице 1.2.



Таблица 1.3 – Число несущих ветвей каната

Параметры	Величина параметра				
	20...30	40...50	75...125	...	250...300
Грузоподъёмность, т	20...30	40...50	75...125	...	250...300
Число несущих ветвей каната	3...4	4...5	5...6	...	12...13

Передаточное число редуктора определить с учётом кратности полиспаста.

Момент инерции всех вращающихся элементов механизма (муфты, тормозного шкива, зубчатых колёс и т. п.), приведенных к валу двигателя, составляет 70 % от момента инерции двигателя.

Общее время пауз  $t_{II} = 200$  с.

Динамические моменты определить исходя из допустимого ускорения  $a_{доп} = 0,2$  м/с<sup>2</sup> с учётом приведенного момента инерции вращающихся и поступательно движущихся масс:

$$M_{дин} = J_{\Sigma ПР} \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot K_t = J_{\Sigma ПР} \cdot \frac{\omega_{ном} \cdot a_{доп}}{V_{II}} \cdot K_t, \quad (1.2)$$

где  $J_{\Sigma ПР}$  – суммарный приведенный момент инерции;

$\omega_{ном}$  – номинальная частота вращения электродвигателя;

$a_{доп}$  – допустимое ускорение;

$V_{II}$  – скорость подъёма;

$K_t$  – поправочный коэффициент, учитывающий разгон электродвигателя на естественной характеристике. Значения коэффициента  $K_t$  определяются по таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Значения коэффициента  $K_t$ 

Номинальное скольжение, %	0...2	3...6	7...12	13...18
Поправочный коэффициент $K_t$	1,15	1,20	1,25	1,35

При определении времени работы крана время торможения можно принять равным времени пуска.

Торможение осуществляется механическим тормозом.



## 2 Расчёт моментов нагрузки механизма передвижения мостового крана и построение нагрузочных и скоростных диаграмм

### 2.1 Постановка задачи

Выбрать тихоходный электродвигатель постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения крановой серии Д для механизма передвижения тележки крана. Двигатель получает питание от тиристорного преобразователя.

Определить необходимый диапазон регулирования скорости при заданной точности останковки  $\Delta S$ .

При решении задачи принять: момент инерции вращающихся масс механизма 0,5 момента инерции двигателя, т. е.  $J_m = 0,5J_{об}$ ; коэффициент полезного действия передачи  $\eta = 0,85$ ; момент механического тормоза при остановке с минимальной скоростью равным моменту динамическому при пуске, т. е.  $M_m = M_{дин.п}$ ; ускорение при пуске  $a = 0,3 \text{ м/с}^2$ . Режим работы механизма передвижения тележки тяжёлый, ПВ = 40 %.

В таблицах 2.1, 2.2 приведены исходные данные для выполнения расчётов. Номер варианта соответствует номеру студента в списке группы по журналу.

Таблица 2.1 – Исходные данные для расчётов

Наименование параметра	Последняя цифра номера варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Масса поднимаемого груза $m_g$ , т	5	8	10	12,5	15	18	20	25	30	32
Масса тележки $m_0$ , т	2,5	3,0	3,5	4,4	5,2	6,2	7,5	8,4	10	11
Диаметр колеса $D_k$ , мм	200	250	300	360	360	400	400	450	500	500
Диаметр цапфы $d_c$ , мм	50	50	50	60	60	60	70	70	70	70

Таблица 2.21 – Исходные данные для расчётов

Наименование параметра	Предпоследняя цифра номера варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Скорость передвижения тележки $V_m$ , м/с	0,9	0,95	1,0	1,05	1,1	1,15	1,2	1,3	1,4	1,5
Точность останковки $\Delta S$ , мм	8	8	7	7	6	6	8	8	7	6
Относительное отклонение скорости $\frac{\Delta V}{V_0}$	0,04	0,05	0,04	0,05	0,06	0,07	0,05	0,06	0,07	0,05

В расчётной части должны быть отражены следующие вопросы:

- 1) исходные данные для выполнения расчётов;
- 2) кинематическая схема механизма передвижения тележки;
- 3) расчёт передаточного числа редуктора;

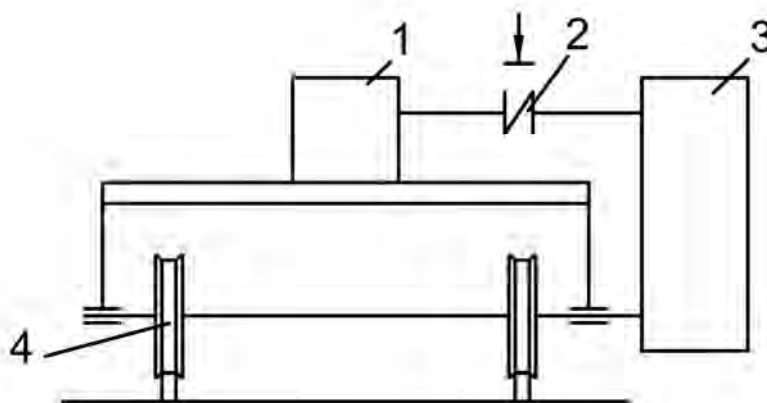


- 4) расчёт статических моментов нагрузки механизма передвижения тележки с грузом и без груза;
- 5) расчёт динамических моментов при пуске и торможении механизма передвижения тележки с грузом и без груза;
- 6) построение нагрузочной диаграммы за полный цикл работы крана с учётом статических и динамических режимов;
- 7) расчёт мощности двигателя и выбор его по каталогу;
- 8) проверка двигателя по перегрузочной способности;
- 9) расчёт точности остановки механизма передвижения тележки;
- 10) расчёт диапазона регулирования скорости;
- 11) построение скоростной диаграммы движения тележки.

## 2.2 Рекомендации к выполнению расчётов

Для выполнения задания необходимо изучить основные теоретические положения, изложенные в [1, гл. 2-2; 2, гл. 3.3; 3, гл. 3.2].

Кинематическая схема механизма передвижения тележки приведена на рисунке 2.1.



1 – двигатель; 2 – тормоз; 3 – редуктор; 4 – колесо

Рисунок 2.1 – Кинематическая схема механизма передвижения тележки

Статическое сопротивление передвижению тележки определяется по формуле

$$F_C = F_T + F_Y, \quad (2.1)$$

где  $F_T$  – сопротивление от трения, Н;

$F_Y$  – сопротивление от уклона путей, Н.

$$F_T = K_P \cdot (m_T + m_O) \cdot g \cdot \frac{2 \cdot f + \mu \cdot d_{Ц}}{D_K}, \quad (2.2)$$

где  $m_o$  – масса незагруженной тележки, кг;

$m_r$  – масса груза, кг;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$D_k$  – диаметр колеса, м;

$d_{ц}$  – диаметр цапфы, м;

$\mu$  – коэффициент трения скольжения,  $\mu = 0,02$ ;

$K_p$  – коэффициент, учитывающий трение реборд колёс о рельсы,  $K_p = 2,5$ ;

$f$  – коэффициент трения качения.

Для катков:

$D_k = 200 \dots 300 \text{ мм}; \quad f = 0,4 \cdot 10^3$ ;

$D_k = 400 \dots 500 \text{ мм}; \quad f = 0,6 \cdot 10^3$ ;

$D_k = 600 \dots 700 \text{ мм}; \quad f = 0,8 \cdot 10^3$ .

При выполнении расчётов величину сопротивления от уклона путей  $F_v$  не учитывать.

Момент эквивалентный определяется по известным моментам статической и динамической нагрузки при движении тележки с грузом и без груза.

Передаточное число редуктора определяется исходя из номинальной скорости двигателя.

Для расчёта точности остановки необходимо изучить материал по данному вопросу в [1, гл. 4.2].

Время срабатывания аппаратуры принять  $0,2 \dots 0,25 \text{ с}$ .

### 3 Выбор электродвигателя крановых механизмов методом эквивалентного КПД

#### 3.1 Постановка задачи

Рассчитать мощность и выбрать двигатель механизма передвижения тележки крана методом эквивалентного КПД. Расчётное значение мощности двигателя определяется по исходным данным пункта 2.

В расчётной части должны быть отражены следующие вопросы:

- 1) достоинство методики расчёта мощности двигателя методом эквивалентного КПД;
- 2) исходные данные для расчёта;
- 3) формулы для расчёта коэффициентов, учитывающих потери в двигателе;
- 4) определение коэффициентов для расчёта номинальной мощности двигателя;
- 5) расчёт номинальной мощности кранового двигателя, определяемой тепловым режимом;
- 6) расчёт мощности двигателя, учитывающей параметры механизма и условия пускового режима;
- 7) проверка двигателя по условию сцепления;
- 8) оценка результатов расчёта, выбор двигателя по каталогу.



### 3.2 Рекомендации к выполнению расчётов

Статическая мощность на валу электродвигателя механизма передвижения тележки [1]

$$P_{ст.т} = \frac{F_T \cdot V_T}{1000 \cdot \eta_M}, \quad (3.1)$$

где  $F_T$  – статическое сопротивление передвижению тележки от статических нагрузок, Н;

$V_T$  – линейная скорость передвижения тележки, м/с;

$\eta_M$  – КПД механизма, принимаем  $\eta_M = 0,85$ .

Выбор мощности двигателя производится универсальным методом с использованием эквивалентного КПД [4, гл. 6.1]. Данная методика при выборе двигателей учитывает как параметры режима работы механизмов, так и энергетические свойства конкретных систем регулирования. Этот метод может быть применён для всех крановых механизмов и всех имеющихся в настоящее время типов электроприводов. Параметры режима работы определяют среднестатические нагрузочные диаграммы работы электроприводов, которые характеризуются фактической продолжительностью включения при регулировании  $\epsilon_p$ , эквивалентным моментом статической нагрузки  $M_{эkv.ст}$  и эквивалентным числом включений двигателя за определённый период времени (1 час). Под эквивалентным числом включений понимают число включений двигателя до полной частоты вращения, эквивалентное по нагреву реальному числу включений под нагрузку  $M_{эkv.ст}$ .

Эквивалентный момент статической нагрузки

$$M_{эkv.ст} = K_{эkv} \cdot M_{ст.ном}, \quad (3.2)$$

где  $K_{эkv}$  – коэффициент эквивалентной нагрузки.

В соответствии с предлагаемой методикой по заданным параметрам режимов работы рассчитывают все составляющие потерь с учётом их влияния на нагрев обмоток двигателя и сравнивают эти потери с допустимыми в нормированном режиме работы машины.

Для проведения расчёта при этом необходим минимум исходных данных, определяемых условиями работы кранового механизма, максимальной статической нагрузкой и параметрами предварительно выбранной системы регулирования. Потери в двигателе определяют через эквивалентный КПД  $\eta_{эkv}$  в принятой системе регулирования, который характеризуется отношением затрат энергии на выполнение полезной работы ко всем затратам энергии электропривода за принятый период времени. Значения  $\eta_{эkv}$  приведены на рисунке 3.1 для крановых электроприводов всех применяемых типов в функции



эквивалентного числа включений электродвигателя в один час. Графики рассчитаны для суммарных моментов инерции электропривода, равных  $1,2 \cdot J_{\text{дв}}$ .

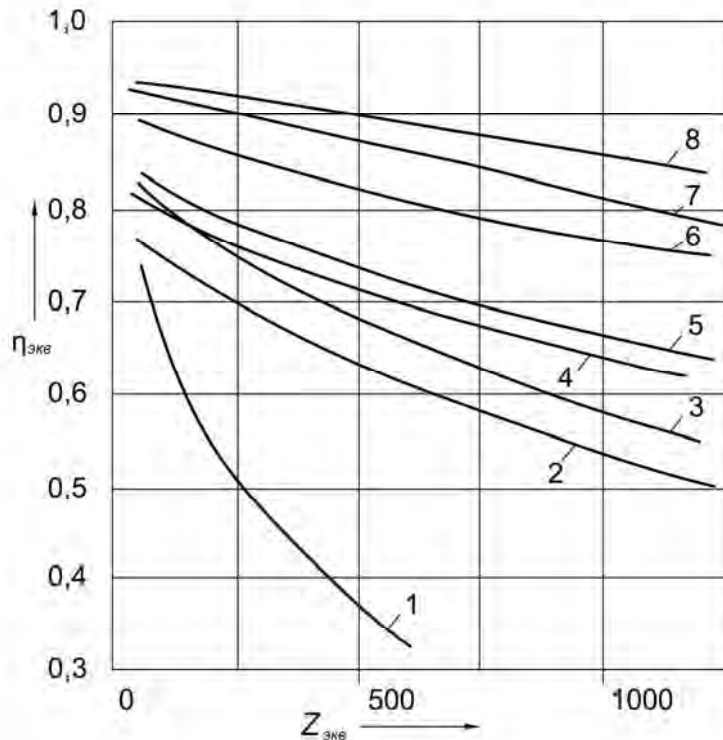


Рисунок 3.1 – Графики  $\eta_{\text{экв}} = f(Z_{\text{экв}})$  для различных электроприводов

Для других отношений вращающихся масс  $\eta_{\text{экв}}$  определяется как

$$\eta_{\text{экв}} = \frac{\eta_{\text{экво}}}{1 + \frac{\eta_{\text{экво}} - \eta_{\text{эквz}}}{\eta_{\text{эквz}}} \cdot \frac{J_{\text{общ}}}{J_{\text{дв}}} \cdot \left(\frac{n_{\text{max}}}{1000}\right)^2}, \quad (3.3)$$

где  $\eta_{\text{эквz}}$  – эквивалентный КПД для заданного числа включений;

$\eta_{\text{экво}}$  – эквивалентный КПД при  $Z = 0$ ; берётся из таблицы 3.1.

Таблица 3.1 – Значение коэффициентов  $K_m$  для выбора различных систем электропривода

Система электропривода	$\eta_{\text{экв}o}$	$K_d$	Подъём при $GD_{\text{общ}}^2 / 1,2 \cdot GD_{\text{дв}}^2 \leq 2$ , передвижение и поворот при $GD_{\text{общ}}^2 / 1,2 \cdot GD_{\text{дв}}^2 \leq 5$ для режимов					Передвижение и поворот при $GD_{\text{общ}}^2 / 1,2 \cdot GD_{\text{дв}}^2 > 5$ для режимов				
			4					5				
1	2	3	E1	E2	E3	E4	E5	E1	E2	E3	E4	E5
Двигатель:												
двухскоростной при $2P = 4/24$	0,83	4	0,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–
трёхскоростной при $2P = 4/8/24$	0,83	4	1,3	0,95	0,55	0,2	–	–	–	–	–	–

Окончание таблицы 3.1

1	2	3	4					5				
односкоростной при $2P = 6$	0,83	4	1,35	1	0,65	0,3	–	0,2	–	–	–	–
трёхскоростной при $2P = 6/12/24$	0,81	4	1,4	1,1	0,75	0,5	–	0,25	–	–	–	–
с фазным ротором при торможении противовключением	0,76	1,25	1,45	1,2	0,95	0,75	0,45	0,75	0,65	0,35	0,2	0,1
с фазным ротором при динамическом торможении	0,81	1,25	1,5	1,3	1,1	0,9	0,55	0,9	0,85	0,5	0,3	0,2
двухскоростной при $2P = 4/6$ с неполной зоной частотного регулирования	0,9	1,25	1,4	1,15	1	0,7	0,45	0,55	0,2	–	–	–
односкоростной в системе частотного регулирования	0,94	1,25	1,45	1,3	1,15	1,05	0,7	1,15	1,1	0,85	0,7	0,45
Тиристорный электропривод постоянного тока	0,94	1,25	2	1,3	1,15	0,85	0,5	1,4	1	0,75	0,5	0,3
Электропривод постоянного тока с параметрическим регулированием	0,81	1,25	2	1,25	1,1	0,8	0,45	1,25	0,85	0,5	0,3	0,15

На рисунке 3.1 обозначены графики для следующих систем электроприводов:

1 – с двухскоростными короткозамкнутыми электродвигателями при  $2P = 4/24$ ;

2 – с параметрическим регулированием двигателей с фазным ротором при торможении противовключением;

3 – с трёхскоростными короткозамкнутыми электродвигателями при  $2P = 4/8/24$ ;

4 – с параметрическим регулированием двигателей с фазным ротором при динамическом торможении двигателей постоянного тока и односкоростных короткозамкнутых двигателей при  $2P = 6$ ;

5 – с трёхскоростными короткозамкнутыми двигателями при  $2P = 6/12/24$ ;

6 – с ограниченной зоной частотного регулирования двухскоростных короткозамкнутых двигателей при  $2P = 4/6$ ;

7 – с тиристорным приводом постоянного тока;

8 – с частотным регулированием односкоростных короткозамкнутых двигателей.

Расчётная формула для определения мощности кранового двигателя по нагреву, помимо  $\eta_{экв}$ , должна учитывать следующие факторы:

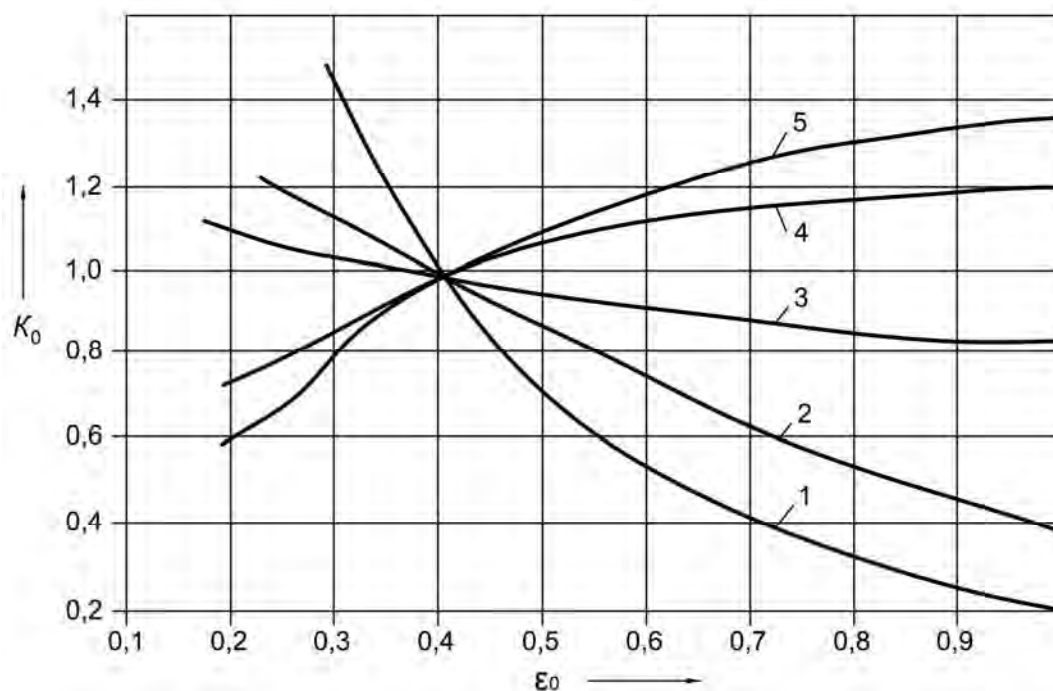
1) изменение соотношений между потерями в обмотках двигателя и условий вентиляции при  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{ном}$ ;

2) изменение постоянных потерь от питающего напряжения для двигателей постоянного тока;

3) степень влияния динамических потерь на нагрев двигателя, так как в зависимости от системы регулирования часть потерь, определяющих  $\eta_{экр}$ , выделяется не в самой машине, а в других элементах привода;

4) увеличение потерь на регулировочных характеристиках систем с параметрическим управлением.

Соотношения между потерями в обмотках двигателя в общем случае нельзя выразить аналитически вследствие их зависимости не только от режимов работы, но и от конструктивных особенностей двигателей разных исполнений. Поэтому эти потери целесообразно учитывать полученным экспериментально коэффициентом  $K_0$ , определяющим изменение потерь в функции фактической продолжительности включения  $\varepsilon_0$ . Зависимости  $K_0 = f(\varepsilon_0)$  для крановых двигателей различных исполнений приведены на рисунке 3.2.



1 – невентилируемых асинхронных; 2 – постоянного тока; 3 и 4 – вентилируемых соответственно тихоходных и быстроходных серий МТФ и МТН; 5 – вентилируемых быстроходных серий МАП

Рисунок 3.2 – Зависимости  $K_0 = f(\varepsilon_0)$  для различных крановых двигателей

Зависимость постоянных потерь от питающего напряжения может быть учтена коэффициентом



$$k_H = \frac{(U_{ном} + U_\phi)}{\sqrt{U_{ном} \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{ном}}\right)}}, \quad (3.4)$$

где  $U_{ном}$  – номинальное напряжение;

$U_\phi$  – фактическое напряжение на клеммах двигателя при продолжительности включения  $\varepsilon_0$ .

Влияние динамических потерь на нагрев двигателя может быть учтено коэффициентом  $K_\delta$ , определяемым по отношению пусковой мощности к номинальной; для систем параметрического регулирования короткозамкнутых двигателей  $K_\delta = 4$ , для электроприводов остальных типов  $K_\delta = 1,25$ .

Практически увеличение потерь на регулировочных характеристиках для систем с параметрическим управлением может быть учтено коэффициентом

$$K_p = 1 - 1,2 \cdot (\varepsilon_p - \varepsilon_{p.б}), \quad (3.5)$$

где  $\varepsilon_p$  – продолжительность включения при регулировании;

$\varepsilon_{p.б}$  – базовая продолжительность включения,  $\varepsilon_{p.б} = 0,05$ .

Вышеизложенное отражено в общей расчётной формуле номинальной мощности кранового двигателя при продолжительности включения  $\varepsilon_{ном}$

$$P_{ном} \geq \frac{K_3 \cdot K_{эkv} \cdot \eta_{эkv} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{ном}}} \cdot K_H}{K_0 \cdot K_p \cdot [\eta_{эkv} - K_D \cdot (\eta_{эkv} - \eta_{эkv})]} \cdot P_{ст.т}, \quad (3.6)$$

где  $P_{ст.т}$  – расчётная статическая мощность, найденная по формуле (3.1);

$K_3$  – коэффициент, учитывающий закладываемый запас мощности при проектировании электропривода и определяемый требованиями к его надёжности;

$P_{ном}$  – мощность по тепловому режиму.

В таблицах 3.2 и 3.3 приведены значения входящих в выражение (3.6) параметров  $\varepsilon_p$ ,  $K_{эkv}$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $K_3$  и соответствующие по нагреву числа включений  $Z_{эkv}$ .

Для предварительного выбора мощности двигателя коэффициенты, стоящие перед  $P_{ст.т}$ , можно объединить одним общим коэффициентом  $K_m$ , зависящим от режима работы и выбранной системы электропривода (см. таблицу 3.1).

Тогда мощность двигателя для предварительного выбора определяется из выражения

$$P_{ном} \geq P_{ст.т} / K_T. \quad (3.7)$$



Таблица 3.2 – Параметры режимов работы

Группа электроприводов	Для механизмов подъёма при $GD_{общ}^2 / 1,2 \cdot GD_{дв}^2 \leq 2$ , для механизмов передвижения и поворота при $GD_{общ}^2 / 1,2 \cdot GD_{дв}^2 \leq 5$				
	$\varepsilon_0$	$K_{экв}$	$\varepsilon_p$	$K_z$	$Z_{экв}$
E1	0,25	0,63	0,05	1	60
E2	0,4	0,63...0,75	0,075	1	120...150
E3	0,4	0,75...0,8	0,1	1	240...300
E4	0,6	0,8	0,125	1,15...1,25	600
E5	>0,6	0,9	0,15	1,3...1,35	>600

Таблица 3.3 – Параметры режимов работы

Группа электроприводов	Для механизмов передвижения и поворота при $GD_{общ}^2 / 1,2 \cdot GD_{дв}^2 > 5$				
	$\varepsilon_0$	$K_{экв}$	$\varepsilon_p$	$K_z$	$Z_{экв}$
E1	0,25	0,63	0,05	1	900
E2	0,25	0,63...0,75	0,075	1	1200...1500
E3	0,4	0,75...0,8	0,1	1	2400...3000
E4	0,6	0,8	0,125	1,15...1,25	4500...6000
E5	>0,6	0,9	0,15	1,3...1,35	>6000

При предварительном выборе электродвигателя, кроме  $P_{ном}$  – мощности, определяемой тепловым режимом, вводят понятие  $P_p$  – расчётной мощности, учитывающей параметры механизма и условия обеспечения пускового режима.

$$P_p = \frac{Q_{ном} + m_T}{10^3 K_{\Pi} \cdot \gamma_{\Pi} \cdot \eta_M} \cdot V_T \cdot (\lambda' \cdot a \cdot m), \quad (3.8)$$

где  $Q_{ном}$  – масса перемещаемого груза;

$m_T$  – масса тележки с подвеской;

$V_T$  – скорость тележки;

$\lambda' = J_{общ} / J_{нос}$ ;

$J_{нос}$  – момент инерции поступательно движущихся масс;

$m$  – параметр статической нагрузки, характеризующий условия работы

механизмов,  $m = \frac{P_{ст.г}}{[(Q_{ном} + m) \cdot V_m]}$ . Для мостовых кранов, работающих в помещениях,  $m = 0,1 \text{ м/с}^2$ ;

$a$  – ускорение механизма,  $\text{м/с}^2$ ;

$K_{\Pi}$  – коэффициент использования двигателя по пусковому моменту, зависит от систем управления электроприводом;

$\gamma_{\Pi}$  – кратность отношения максимального пускового момента к номинальному.





Значения  $K_{II}$  и  $\gamma_{II}$  для различных систем электроприводов приведены в таблице 3.3. В выражении (3.8) присутствует параметр  $\lambda' = J_{общ} / J_{нос}$ , который заранее неизвестен, поэтому необходимо воспользоваться преобразованным видом

$$P_P = \frac{(Q_{ном} + m_T) \cdot 0,66 \cdot V_T \cdot a}{10^3 \cdot \eta_M} + \frac{P_{ст.т.}}{1,75}, \quad (3.9)$$

где  $a$  – расчётное ускорение для мостовых кранов с лебёдочными тележками,  $a = 0,25 \text{ м/с}^2$ .

Выбор мощности двигателя механизма передвижения тележки осуществляется в три этапа:

1) на первом этапе рассчитывают мощности по выражениям (3.6) и (3.9), осуществляют выбор двигателя по большей мощности;

2) на втором этапе выбранный двигатель проверяют на обеспечение теплового режима для конкретных параметров режима работы. Определяют суммарный момент инерции  $J_{общ}$ , приведенный к валу двигателя:

$$J_{общ} = J_{дв} + 0,2 \cdot J_{дв} + \frac{91 \cdot (m_T + 0,7 \cdot Q_{ном}) \cdot V_T^2}{m_k \cdot n_{ном}^2 \cdot \eta_M}, \quad (3.10)$$

где  $J_{дв}$  – момент инерции двигателя,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

0,2 – коэффициент, учитывающий момент инерции тормоза и первой шестерни редуктора;

0,7 – коэффициент, учитывающий, что в цикле работы крана число пусков с грузом не превышает 60 % от общего числа пусков;

$m_k$  – число механизмов,  $m_k = 1$ .

Таблица 3.4 – Значение коэффициентов  $\gamma_{II}$  и  $K_{II}$  для различных систем электроприводов

Система электропривода	$\gamma_{II}$	$K_{II}$
С асинхронным двигателем с фазным ротором	2,5	0,7
С асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором	2,3	0,8
С двигателем постоянного тока	2,8	0,65
Пуск двигателей от тиристорных преобразователей постоянного или переменного тока	2	0,9

Находят эквивалентный КПД по формуле (3.3) и рисунку 3.1.

Проверяется двигатель согласно (3.6) на тепловой режим. Если двигатель не удовлетворяет условию (3.6), то следует принять двигатель большей мощности и повторно проверить правильность его выбора;



3) на третьем этапе проверяют двигатель по условию сцепления. С этой целью находим ускорение, которое может быть обеспечено двигателем, из следующего выражения:

$$a = \frac{10^3 \cdot [K_{II} \cdot \gamma_{II} \cdot \eta_M \cdot P_{ном} - P_{СТ.Т} \cdot \eta_{мех}]}{(Q_{ном} + m_T) \cdot V_T \cdot \lambda'} \quad (3.11)$$

Максимальное ускорение

$$a_{max} = 9,81 \cdot \frac{K_{II} \cdot \varphi \cdot \lambda}{\lambda'} - m, \quad (3.12)$$

где  $\varphi$  – коэффициент сцепления, который может быть принят равным 0,2 при работе крана в помещении;

$\lambda$  – отношение числа приводных колёс к общему числу колёс; обычно принимают  $\lambda = 0,5$ .

Для реальных средних значений коэффициентов формула (3.12) преобразуется к виду

$$a_{max} = 1,4 \cdot \lambda - 0,09. \quad (3.13)$$

Чтобы двигатель удовлетворял условиям сцепления, необходимо выполнение неравенства

$$a_{max} > a. \quad (3.14)$$

## 4 Расчёт моментов нагрузки механизма подъёма пассажирского лифта и построение нагрузочных и скоростных диаграмм. Расчёт мощности и выбор электродвигателя

### 4.1 Постановка задачи

Рассчитать мощность и произвести выбор электродвигателя механизма подъёма пассажирского лифта. Данные для расчётов следует выбирать из таблиц 4.1 и 4.2. Номер варианта соответствует номеру студента в списке группы по журналу.

В расчётной части должно быть отражено следующее:

- 1) исходные данные;
- 2) кинематическая схема;
- 3) основные формулы для расчёта сил и моментов нагрузки электропривода механизма подъёма лифта;



- 4) построение зависимости усилия на канатопроводящем шкиве от силы тяжести поднимаемого груза;
- 5) построение зависимости усилия нагрузки, создаваемого весом подъёмного каната, от разности длин подъёмного каната со стороны кабины и со стороны противовеса;
- 6) определение статических сил сопротивления  $F_c$  для различных режимов за цикл работы механизма подъёма пассажирского лифта;
- 7) определение статических моментов  $M_c$  для различных режимов за цикл работы механизма подъёма пассажирского лифта;
- 8) построение зависимости статического момента электропривода от загрузки кабины лифта;
- 9) построение графиков  $F_c$  и  $M_c$  в зависимости от остановок;
- 10) построение зависимости  $M_c$  от времени;
- 11) построение скоростных диаграмм за полный цикл работы механизма подъёма лифта;
- 12) расчёт мощности и выбор приводного электродвигателя.

Таблица 4.1 – Исходные данные для расчётов

Параметры	Последняя цифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Скорость $V$ , м/с	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0	1,1
Допустимое ускорение $a_{доп}$ , м/с <sup>2</sup>	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0
Допустимый рывок $\rho_{доп}$ , м/с <sup>3</sup>	4	4	5	5	6	6	5	5	6	6
Передаточное число редуктора $i$	53	53	59	59	59	65	65	65	68	68
Высота подъёма $H$ , м	32	40	45	50	30	55	32	28	42	55
Высота этажа $h$ , м	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
Коэффициент загрузки кабины $\gamma$	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0

Таблица 4.2 – Исходные данные для расчётов

Параметры	Предпоследняя цифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диаметр шкива $D$ , м	0,8	0,82	0,84	0,86	0,88	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0
Грузоподъёмность $G_{ном}$ , кг	250	350	400	450	500	600	700	800	1000	1500
Вес кабины $G_{каб}$ , кг	500	700	800	900	1000	1200	1400	1600	2000	3000
Приведенный к поступательному движению вес вращающихся частей $G_{вр}$ , кг	150	210	240	270	300	360	420	480	600	900
Коэффициент уравнивания $\alpha$	0,45	0,45	0,45	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,55	0,55

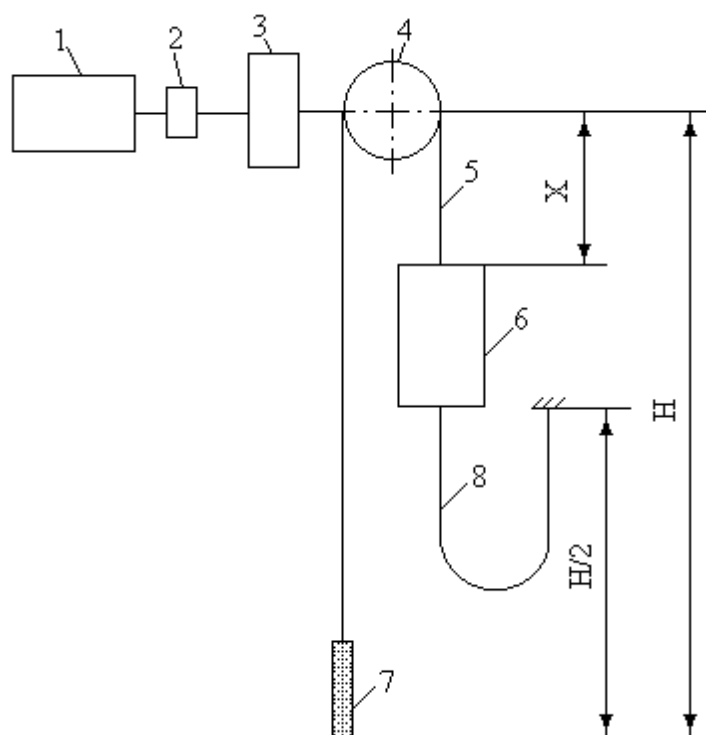


## Окончание таблицы 4.2

Параметры	Предпоследняя цифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вес 1 м каната $g_{нк}$ , кг/м	0,37	0,38	0,37	0,38	0,39	0,37	0,36	0,39	0,38	0,39
Число канатов $k$ , шт.	3	3	3	4	4	4	5	5	6	6
Число подвесных кабелей, шт.	3	3	3	3	4	4	4	5	5	5
Вес 1 м подвесного кабеля, кг/м	0,87	0,88	0,87	0,88	0,89	0,87	0,86	0,89	0,88	0,89

#### 4.2 Рекомендации к выполнению расчётов

Большинство современных пассажирских лифтов жилых и административных зданий выполняется с противовесом. Кинематическая схема лифта представлена на рисунке 4.1. Рекомендации к выполнению расчётов приводятся согласно [5].



1 – двигатель; 2 – тормоз; 3 – редуктор; 4 – канатоведущий шкив; 5 – подъёмный канат; 6 – кабина; 7 – противовес; 8 – подвесной кабель

Рисунок 4.1 – Кинематическая схема лифта

Противовес для лифта выбирается таким образом, чтобы он уравновешивал силу тяжести кабины и часть силы тяжести номинального поднимаемого груза.

$$G_{np} = G_{каб} + \alpha G_{ном}, \quad (4.1)$$

где  $G_{np}$  – сила тяжести противовеса, Н;

$G_{каб}$  – сила тяжести кабины, Н;

$G_{ном}$  – номинальная сила тяжести поднимаемого груза, Н;

$\alpha$  – коэффициент уравнивания силы тяжести груза; обычно принимается равным 0,4...0,6.

При наличии уравнивающего каната, который компенсирует изменение нагрузки при изменении длины поднимаемого каната, усилие  $F_2$  на канатопроводящем шкиве определяется выражением

$$F_2 = G_{каб} + G_2 - G_{np}, \quad (4.2)$$

где  $G_2$  – фактическая сила тяжести поднимаемого груза, Н.

Здесь и далее усилия, направленные вдоль каната кабины вниз, считаются положительными, а направленные в противоположном направлении – отрицательными.

Усилие  $F_2$  определяет основную нагрузку на электродвигатель.

С учётом коэффициента уравнивания это усилие при подстановке (4.1) в (4.2) может быть определено следующим образом:

$$F_2 = G_2 - \alpha G_{ном}. \quad (4.3)$$

График зависимости усилия на канатопроводящем шкиве от силы тяжести поднимаемого груза при  $\alpha = 0,5$  приведен на рисунке 4.2.

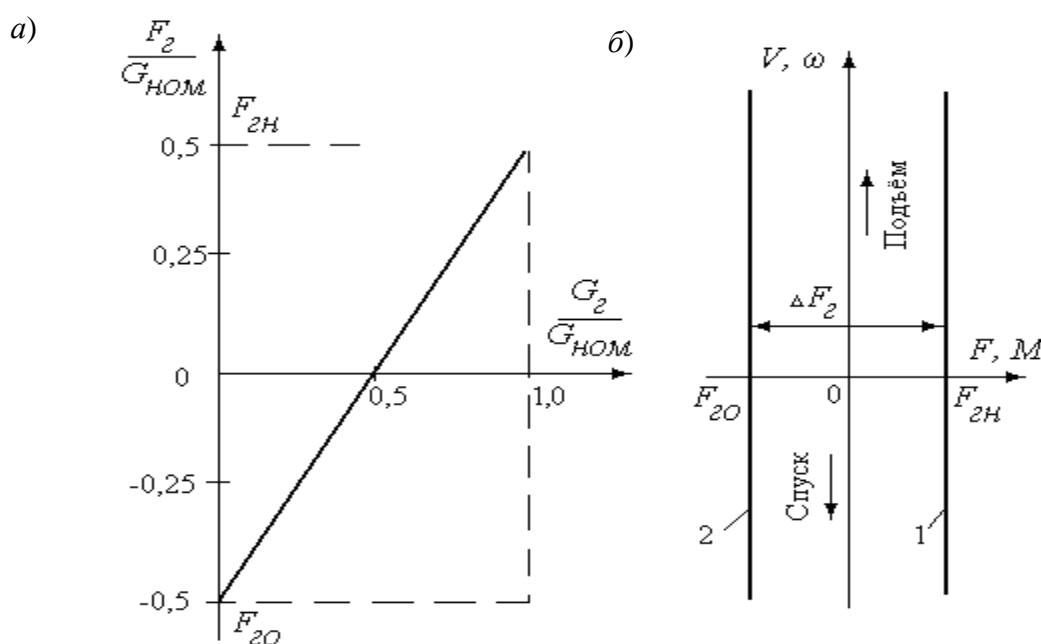


Рисунок 4.2 – Зависимость усилия на канатопроводящем шкиве от загрузки кабины



Из рисунка 4.2 видно, что нагрузка может изменять свой знак (при максимальной нагрузке кабины результирующее усилие направлено в сторону перемещения кабины вниз, при порожней кабине результирующее усилие действует в сторону подъёма кабины), а также может быть равной нулю при загрузке кабины  $G_z = \alpha G_{ном}$ . Тогда усилие нагрузки на канатоведущем шкиве изменяется от максимального положительного (при  $\alpha = 0,5$ ;  $F_{zn} = F_{ш. макс} = 0,5G_{ном}$ ) до максимального отрицательного, соответствующего нулевой загрузке кабины (при  $\alpha = 0,5$ ;  $F_{zo} = -F_{ш. макс} = -0,5G_{ном}$ ), определяемых из выражения (4.3).

Так как для анализа режимов работы электропривода существенной является зависимость между усилием и линейной скоростью движения (или зависимость между моментом, приведённым к валу двигателя, и угловой скоростью двигателя), следует изображать зависимость скорости (линейной или угловой) от усилия или момента нагрузки.

Переход от линейных усилий и скоростей к моментам и угловым скоростям двигателя выполняется по формулам

$$M = \frac{FD}{2i}; \quad \omega = \frac{2V \cdot i}{D}, \quad (4.4)$$

где  $D$  – диаметр канатоведущего шкива, м;

$i$  – передаточное число редуктора;

$M$  – момент на валу двигателя, Н·м;

$F$  – линейное усилие, Н;

$\omega$  – угловая скорость двигателя, рад/с;

$V$  – линейная скорость, м/с.

Положительной будем считать скорость двигателя при подъёме кабины, а отрицательной – при её спуске.

На рисунке 4.2, б приведены в координатах  $F, V$  (или  $M, \omega$ ) характеристики 1 и 2, соответствующие номинальной и нулевой загрузкам кабины. Эти характеристики ограничивают пределы изменения нагрузки электропривода, определяемые силой тяжести кабины с грузом и силой тяжести противовеса, при изменении нагрузки кабины от нулевой до номинальной, чему соответствует изменение усилия на канатоведущем шкиве от  $F_{zo} = -\alpha G_{ном}$  до  $F_{zn} = G_{ном} (1 - \alpha)$ .

При загрузке кабины  $G_z = \alpha G_{ном}$  усилие на канатоведущем шкиве равно 0 и соответствующая этой загрузке характеристика в координатах  $(F, V)$  совпадает с осью ординат. Величина и знак усилия  $F_z$  и момента нагрузки  $M_z$  почти не зависят от направления движения кабины и её скорости. В случае номинальной загрузки кабины (характеристика 1) положительное усилие на шкиве  $F_{zn}$  при подъёме кабины создаёт тормозной момент, а при опускании кабины способствует её спуску и создаёт движущий момент.

Если кабина пустая (характеристика 2), наоборот, отрицательное усилие на шкиве  $F_{zo}$  при подъёме кабины создаёт движущий момент, помогающий



подъёму кабины, а при спуске кабины создаёт тормозной момент, препятствующий движению в направлении спуска кабины.

Когда нагрузка кабины  $G_z = \alpha G_{ном}$ , усилие на канатоведущем шкиве равно 0 и не создаёт момента нагрузки на валу двигателя при любом направлении движения.

При отсутствии уравновешивающего каната (см. рисунок 4.1) изменение длины подъёмного каната создаёт дополнительное усилие  $F_k$ , величина которого определяется из выражения

$$F_k = g_k (l_{кк} - l_{кпр}), \quad (4.5)$$

где  $g_k$  – сила тяжести 1 м подъёмного каната, Н;

$l_{кк}$ ,  $l_{кпр}$  – длины подъёмного каната со стороны кабины и со стороны противовеса, м.

На рисунке 4.3 представлена зависимость усилия нагрузки, создаваемого весом подъёмного каната, от разности длин подъёмного каната со стороны кабины и со стороны противовеса.

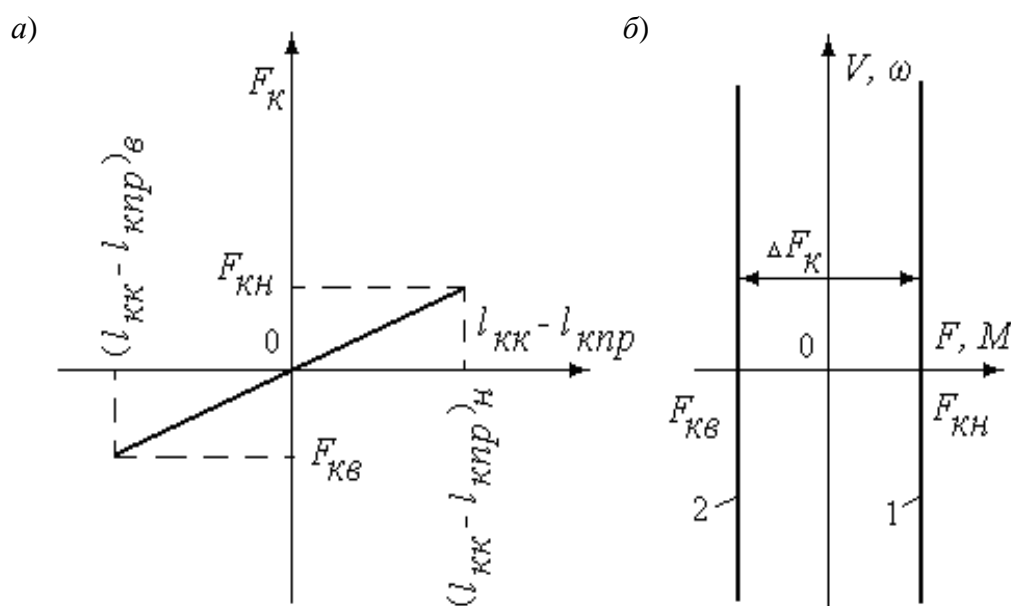


Рисунок 4.3 – Зависимость усилия нагрузки, создаваемого весом подъёмного каната, от разности длин подъёмного каната со стороны кабины и со стороны противовеса

При равенстве длин подъёмного каната со стороны кабины и со стороны противовеса, когда кабина находится в середине шахты, величина усилия  $F_k$  равна 0 (см. рисунок 4.3, а). При движении кабины вниз от указанного положения появляется дополнительное положительное усилие, которое при нижнем положении кабины достигает величины  $F_{кн}$ , а при движении кабины вверх появляется отрицательное усилие, которое на верхнем этаже достигает величины  $F_{кв}$ . Соответствующие этим величинам характеристики 1 и 2 на рисунке 4.3, б определяют пределы изменения усилия  $F_k$ .



Влияние этого усилия на работу электропривода аналогично влиянию усилия  $F_2$ , но сама величина усилия  $F_k$  зависит от положения кабины в шахте.

Рассмотренные нагрузки относятся к активным нагрузкам электропривода, которые создаются внешним источником механической энергии и не зависят от направления движения. Кроме того, на электропривод действуют реактивные нагрузки, которые появляются только вследствие движения и направлены против движения, т. е. всегда тормозящие. К реактивным нагрузкам относятся прежде всего силы, обусловленные трением: силы вязкого трения, силы сухого трения и силы потерь в редукторе.

Сила вязкого трения  $F_{трв}$  пропорциональна скорости движения  $V$ .

$$F_{трв} = K_{трв} V, \quad (4.6)$$

где  $K_{трв}$  – коэффициент вязкого трения.

В лифтах  $K_{трв}$  обычно невелик, вследствие чего величина силы  $F_{трв}$  не оказывает существенного влияния на движение кабины, и в инженерной практике при расчётах нагрузок на валу двигателя этими силами часто пренебрегают.

Силы сухого трения  $F_{трс}$  могут с достаточной степенью точности характеризоваться следующей зависимостью:

$$F_{трс} = \begin{cases} F_\delta - F_2, & \text{при } |F_\delta - F_2| \leq F_{тр.о}; V = 0; \\ F_{тр.о} \cdot \text{sign}(F_\delta - F_2), & \text{при } |F_\delta - F_2| > F_{тр.о}; V = 0; \\ F_{тр.о} \cdot \text{sign} V; & \text{при } V \neq 0, \end{cases} \quad (4.7)$$

где  $F_\delta$  – приведенная к направлению движения кабины сила двигателя, Н;

$F_{тр.о}$  – максимальная величина силы сухого трения, Н.

На рисунке 4.4 приведены силы сухого трения. График на рисунке 4.4, *a* характеризует зависимость сил сухого трения при неподвижной кабине ( $V = 0$ ) от величины действующих на кабину сил  $F_\delta - F_2$  (при отсутствии компенсирующего каната здесь необходимо учесть также усилие  $F_k$ ). Если сумма внешних действующих сил ( $F_\delta - F_2$ ) меньше максимальной величины силы трения  $F_{тр.о}$ , то сила трения равна действующей силе (первая строчка в выражении (4.7)). При превышении суммы действующих сил максимальной величины сил трения последняя ограничивается максимальной величиной (вторая строчка выражения (4.7)).

После начала движения кабины ( $V \neq 0$ ) величина сухого трения определяется третьей строчкой выражения (4.7). При этом величина сухого трения остаётся практически постоянной (см. рисунок 4.4, *б*), а знак силы соответствует знаку скорости.

Изображение характеристики сухого трения в координатах ( $F$ ,  $V$ ) на рисунке 4.4, *в* показывает, что сила сухого трения создаёт тормозной





момент независимо от направления движения, при этом сила трения противодействует разгону двигателя и помогает его торможению.

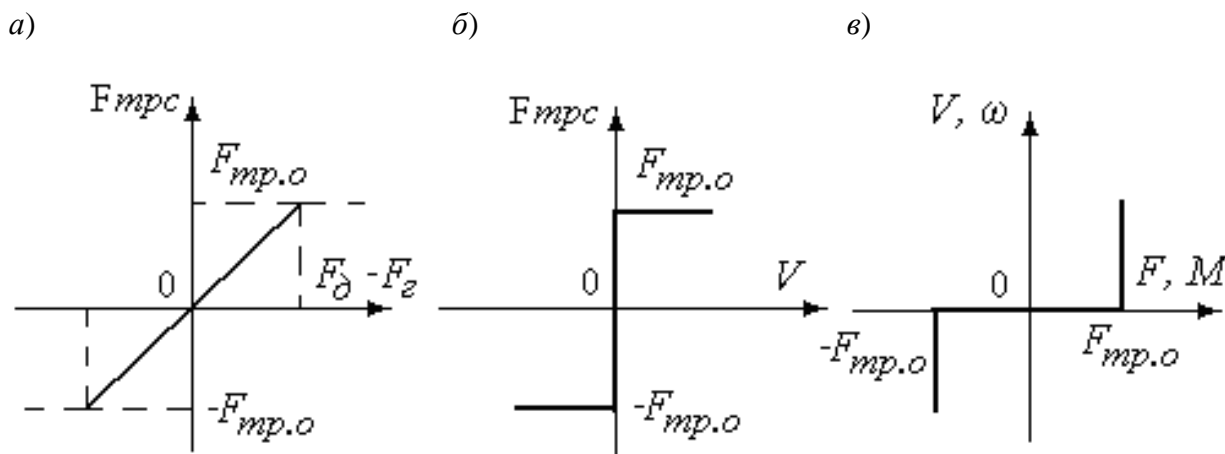


Рисунок 4.4 – Силы сухого трения

Силы трения, возникающие в направляющих кабины и противовеса, можно с достаточной степенью точности описать характеристикой, соответствующей сухому трению. Максимальная сила сухого трения равна 15...30 % от силы нагрузки, определяемой силой тяжести перемещаемых масс.

Природа потерь в редукторе отличается от рассмотренных ранее. Силы трения в редукторе, пропорциональные передаваемому усилию, могут быть представлены в виде

$$F_{ред} = K_{ред} \left| m \frac{dV}{dt} + (F_2 + F_{мп}) \right| \text{sign} V, \quad (4.8)$$

где  $m$  – приведенная к направлению подъёмного каната кабины масса движущихся элементов лифта, кг;

$K_{ред}$  – коэффициент потерь в редукторе.

Здесь под знаком модуля стоит выражение, соответствующее передаваемому через редуктор усилию  $F_{ny}$  и зависящее от динамического усилия  $\left( m \frac{dV}{dt} \right)$  и суммы усилий нагрузки на выходном валу редуктора.

При постоянной величине передаваемого через редуктор усилия и постоянном коэффициенте потерь в редукторе график этих потерь в координатах  $(F, V)$  изображается линиями 1 и 2 на рисунке 4.5.

Следует учитывать, что при увеличении угловой скорости валов редуктора уменьшается коэффициент  $K_{ред}$  и характеристика сил потерь в редукторе будет при этом иметь вид, соответствующий графикам 3 и 4 на рисунке 4.5. Кроме того, при применении червячного редуктора коэффициент потерь и соответствующие ему силы потерь в редукторе различны и зависят от направления передачи энергии.

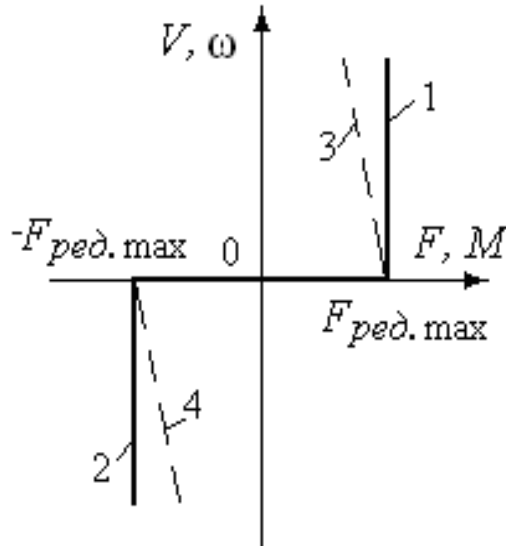


Рисунок 4.5 – Силы потерь в редукторе

Сумма указанных сил (моментов) сопротивления определяет суммарную силу (момент) сопротивления для электродвигателя. Так, для лифта с противовесом и уравнивающим канатом при наличии сил сухого трения и потерь в редукторе статическая сила нагрузки  $F_c$  определяется суммой составляющих, приведенных на рисунках 4.2, 4.4 и 4.5:

$$F_c = F_z + F_{тр} + F_{ред} . \quad (4.9)$$

При номинальной загрузке кабины  $G_z = G_{ном}$ , при которой усилие нагрузки от перемещаемых грузов  $F_z = F_{zn}$  (см. рисунок 4.2, б), статическая сила сопротивления характеризуется графиками 1 и 2 на рисунке 4.6, а при нулевой загрузке кабины  $G_z = 0$ , при которой усилие нагрузки от перемещаемых грузов  $F_z = F_{z0}$  (см. рисунок 4.2, б), статическая сила сопротивления характеризуется графиками 3 и 4 на рисунке 4.6, а. При этом графики 1 и 3 определяют пределы изменения статической силы сопротивления в зависимости от загрузки кабины при её подъёме, а графики 2 и 4 определяют те же пределы при спуске кабины. В уравновешенном состоянии ( $G_k + G_z = G_{пр}$ ), при котором  $F_z = 0$ , статическая сила сопротивления определяется только величинами сил трения и потерь в редукторе (см. рисунок 4.6, б), причём в этом случае (и при малых величинах  $F_z$ , меньших сумм сил трения и потерь в редукторе) в зависимости от направления движения сила сопротивления меняет свой знак. При этом независимо от направления движения суммарная статическая сила сопротивления оказывает тормозящее действие на двигатель.

При номинальной нагрузке кабины (рисунок 4.6, а, графики 1 и 2) и при нулевой загрузке кабины (см. рисунок 4.6, а, графики 3 и 4) изменение направления движения обычно изменяет знак статической силы сопротивления, поскольку постоянная величина силы  $F_z$  при этом по модулю обычно больше изменяющихся сил трения и потерь в редукторе. Знак статической силы  $F_c$  соответствует знаку  $F_z$ , причём при номинальной загрузке

кабины ( $F_z = F_{zn}$ ) статическая сила сопротивления  $F_c$  является тормозящей при подъёме кабины (см. рисунок 4.6, а, график 1) и движущей при спуске кабины (см. рисунок 4.6, а, график 2). При нулевой загрузке кабины ( $F_z = F_{zo}$ ), наоборот, статическая сила сопротивления является движущей при подъёме кабины (см. рисунок 4.6, а, график 3) и тормозящей при спуске кабины (см. рисунок 4.6, а, график 4).

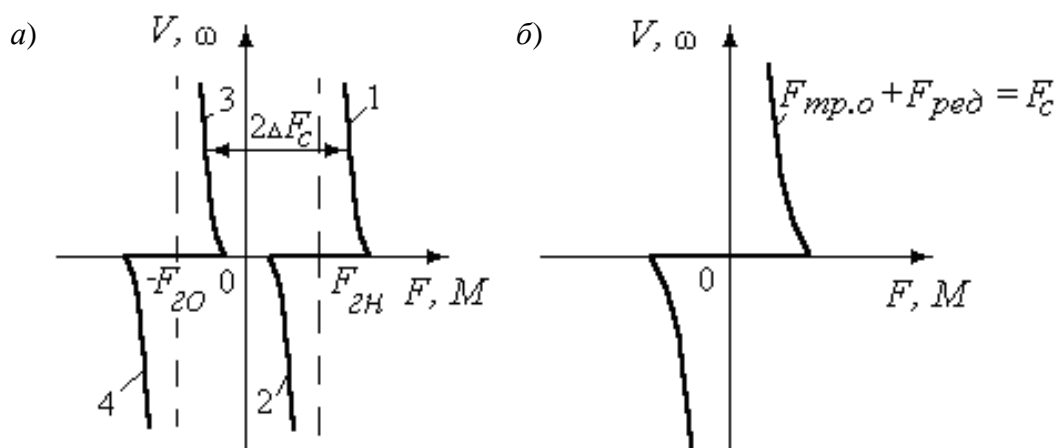


Рисунок 4.6 – Суммарная статическая сила сопротивления  $F_c$  с учётом сил сухого трения и сил потерь в редукторе при номинальной и нулевой загрузке кабины (а) и при загрузке кабины, соответствующей уравновешенной системе лифта  $F_z = 0$  (б)

В инженерной практике обычно при определении статической силы  $F_c$  и статического момента  $M_c$  нагрузки электродвигателя сила  $F_{nom}$  и момент  $M_{nom}$  потерь учитываются с помощью КПД механической передачи  $\eta$ .

При подъёме кабины с номинальной загрузкой статическая сила нагрузки  $F_c$  или момент  $M_c$  больше величины активной нагрузки  $F_z$  или момента  $M_z$  (см. рисунок 4.6, а, график 1) и определяется из выражения

$$\left. \begin{aligned} F_{c1} = F_{zn} + F_{nom} &= \frac{F_{zn}}{\eta} = \frac{G_k + G_{ном} - G_{пр}}{\eta} = \frac{(1-\alpha)G_{ном}}{\eta}; \\ M_{c1} = M_{zn} + M_{nom} &= \frac{F_c D}{2i} = \frac{F_{zn} D}{2i\eta} = \frac{(1-\alpha)G_{ном} D}{2i\eta}. \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

Аналогично могут быть определены статическая сила и статический момент нагрузки электродвигателя при спуске пустой кабины, при котором  $|F_c| > |F_{zo}|$  (см. рисунок 4.6, а, график 4):

$$\left. \begin{aligned} F'_{c2} &= |F_{z0}| - |F_{nom}| = \frac{F_{z0}}{\eta} = \frac{G_k - G_{np}}{\eta} = \frac{-\alpha G_{ном}}{\eta}; \\ M'_{c2} &= -|M_{z0}| - |M_{nom}| = \frac{F_c D}{2i} = \frac{F_{z0} D}{2i\eta} = \frac{(G_k - G_{np}) D}{2i\eta} = \frac{-\alpha G_{ном} D}{2i\eta}. \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

При подъёме пустой кабины (см. рисунок 4.6, а, график 3) и спуске гружёной кабины (см. рисунок 4.6, а, график 2) статическая сила и статический момент нагрузки электродвигателя меньше по модулю величины  $F_z$  (или  $M_z$ ) на величину потерь в механической передаче ( $F_{nom}$  или  $M_{nom}$ ).

Тогда при подъёме пустой кабины статическая сила и статический момент определяются из выражения

$$\left. \begin{aligned} F_{c2} &= -|F_{z0}| - |F_{nom}| = F_{z0} \eta = (G_k - G_{np}) \eta = -\alpha G_{ном} \eta; \\ M_{c2} &= -|M_{z0}| - |M_{nom}| = \frac{F_c D}{2i} = \frac{F_{z0} D \eta}{2i} = \frac{-\alpha G_{ном} D \eta}{2i}. \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

При спуске кабины с номинальным грузом статическая сила и статический момент определяются выражением

$$\left. \begin{aligned} F'_{c1} &= F_{zn} - |F_{nom}| = F_{zn} \eta = (G_k + G_{ном} - G_{np}) \eta = (1 - \alpha) G_{ном} \eta; \\ M'_{c1} &= M_{zn} - |M_{nom}| = \frac{F_c D}{2i} = \frac{F_{zn} D \eta}{2i} = \frac{(1 - \alpha) G_{ном} D \eta}{2i}. \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

При определении статической силы и статического момента нагрузки электродвигателя следует учитывать, что величина КПД зависит от величины внешней активной нагрузки. Для определения характера изменений КПД рассмотрим случай, когда внешняя активная нагрузка равна  $F_z$ , а реактивные силы потерь в передаче в основном определяются силами сухого трения, величина которых  $F_{mpc} = F_{mp.o} = \text{const}$ .

Тогда в режимах, в которых статическая сила равна сумме внешних сил и сил трения,

$$F_c = F_z + F_{mpc} = F_z + F_{mp.o}. \quad (4.14)$$

Как следует из вышеприведенных формул, в этих режимах статическая сила нагрузки определяется из формулы

$$F_c = \frac{F_z}{\eta_1}. \quad (4.15)$$

Тогда из зависимостей (4.14) и (4.15) получаем

$$\eta_1 = \frac{F_2}{F_c} = \frac{F_2}{F_2 + F_{mp.o}} = \frac{1}{1 + \frac{F_{mp.o}}{F_2}}. \quad (4.16)$$

На рисунке 4.7 приведена построенная по выражению (4.16) зависимость 1, характеризующая изменение КПД механической передачи и функции внешних сил активной нагрузки, снижение которой уменьшает КПД передачи.

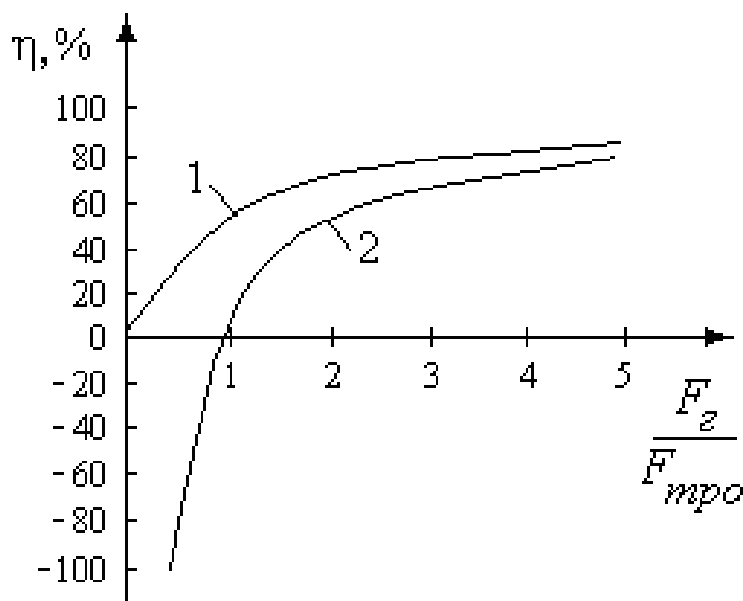


Рисунок 4.7 – Зависимость КПД механической передачи от сил внешней нагрузки при постоянной силе потерь

В режимах, в которых статическая сила равна разности внешних сил и сил трения,

$$F_c = F_2 - F_{mp.c} = F_2 - F_{mp.o}. \quad (4.17)$$

Статическая сила в этих режимах определяется из формулы

$$F_c = F_2 \cdot \eta_2. \quad (4.18)$$

Тогда из формул (4.17) и (4.18) получаем

$$\eta_2 = \frac{F_c}{F_2} = \frac{F_2 - F_{mp.o}}{F_2} = 1 - \frac{F_{mp.o}}{F_2}. \quad (4.19)$$

По формуле (4.19) на рисунке 4.7 построена зависимость 2. Из (4.16) и (4.19) можно найти связь между значениями КПД  $\eta_1$  и  $\eta_2$ :



$$\eta_1 = \frac{1}{2 - \eta_2}; \quad \eta_2 = 2 - \frac{1}{\eta_1}. \quad (4.20)$$

Хотя выражения (4.20) выведены из частного случая, они являются практически универсальными при одинаковом характере потерь при прямой и обратной передаче энергии. Величина  $\eta = \eta_1$  должна подставляться во все вышеприведенные выражения для определения статической силы и статического момента нагрузки (4.10)–(4.13), в которых КПД стоит в знаменателе. Это соответствует тормозному моменту нагрузки (см. рисунок 4.6, квадранты 1 и 3).

В те же выражения, в которых КПД стоит в числителе, должна подставляться величина  $\eta = \eta_2$ . Это соответствует движущему моменту нагрузки (см. рисунок 4.6, квадранты 2 и 4).

Для механической передачи номинальные значения КПД  $\eta_{ном}$ , соответствующие номинальной нагрузке, либо задаются, либо могут быть определены по справочным данным. Для груза, отличного от номинального, КПД можно определить для случая тормозного момента нагрузки с помощью кривых, приведенных на рисунке 4.8.

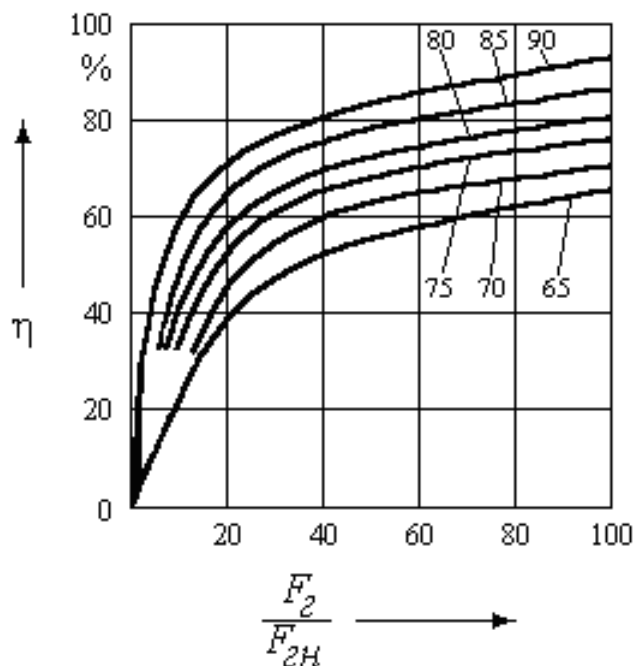


Рисунок 4.8 – Зависимость КПД механизма от нагрузки

Из этих кривых определяется величина  $\eta_1$  для случая тормозных моментов нагрузки, а величина  $\eta_2$  для движущих моментов нагрузки может быть определена по формуле (4.20).

На тихоходных и быстроходных лифтах с асинхронными электроприводами широко применяется червячный редуктор, особенность которого заключается в существенной зависимости КПД от скорости вала червяка и от направления передачи энергии.

При прямой передаче энергии от двигателя механизму КПД червячного редуктора обычно определяется по формуле

$$\eta_1 = \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\operatorname{tg}(\lambda + \varphi)}, \quad (4.21)$$

а при обратной передаче энергии КПД определяется по формуле

$$\eta_2 = \frac{\operatorname{tg}(\lambda - \varphi)}{\operatorname{tg} \lambda}, \quad (4.22)$$

где  $\lambda$  – угол подъёма винтовой линии на делительном цилиндре червяка;

$\varphi$  – угол трения, зависит от скорости вращения вала червяка.

На рисунке 4.9 приведены построенные по (4.21) и (4.22) графики 1 и 2, характеризующие изменение КПД червячного редуктора пассажирского лифта грузоподъёмностью 500 кг, скоростью движения 1,0 м/с.

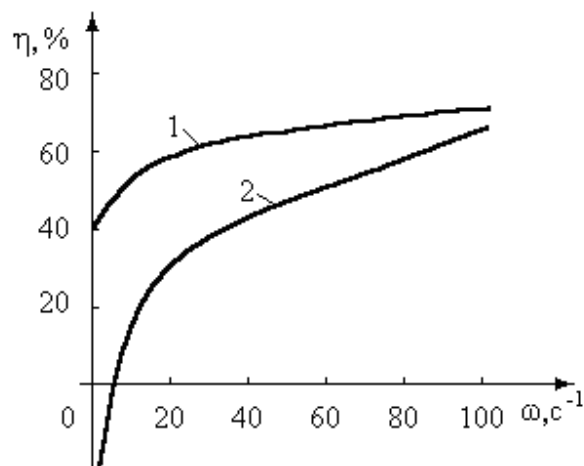


Рисунок 4.9 – КПД червячного редуктора при прямой (1) и обратной (2) передаче энергии

Использование величины КПД для определения статической силы и статического момента нагрузки электродвигателя удобно при значительных моментах, близких номинальным, когда потери в передачах относительно мощности нагрузки малы. В области малых нагрузок, когда  $\eta \rightarrow 0$ , определение  $F_c$  и  $M_c$  с помощью КПД оказывается недостоверным. В этом случае целесообразно учитывать силы потерь на трение непосредственно по вышеприведенным формулам как слагаемые, входящие в величины  $F_c$  и  $M_c$ .

Результаты расчётов статических сил и моментов следует представить в табличной форме (таблица 4.3) и по результатам расчётов построить зависимость статического момента электропривода от загрузки кабины лифта.

Для определения мощности двигателя необходимо знать кинематическую схему, заданные допустимые скорости, ускорения, грузоподъёмность, массу кабины, режим работы лифта. Расчёт мощности электродвигателя сводится к предварительному расчёту мощности по статическим нагрузкам, построению

полной нагрузочной диаграммы с учётом переходных режимов и проверке по нагреву методом эквивалентного момента.

Таблица 4.3 – Форма таблицы расчёта сил и моментов нагрузки

X, м	F <sub>c</sub> , Н	M <sub>c</sub> , Н·м				M <sub>c</sub> = 0 при G, Н
		при подъёме		при спуске		
		G = 0	G = G <sub>ном</sub>	G = 0	G = G <sub>ном</sub>	
0						
0,5 Н						
Н						

Расчёт статических нагрузок двухконцевой лебёдки (см. рисунок 4.1) в цикле выполняется согласно [1].

Большинство пассажирских лифтов загружается полостью только в часы пик, а в остальное время работает с уменьшенной нагрузкой. В этом случае коэффициент уравнивания  $\alpha$  принимается равным 0,35...0,4. При наличии уравнивающих канатов масса противовеса увеличивается на половину массы этих канатов, т. е.  $G_{пр}$  определяется по формуле

$$G_{пр} = G_{каб} + \alpha G_{ном} + 0,5G_{ук}, \quad (4.23)$$

где  $G_{ук}$  – масса уравнивающего каната.

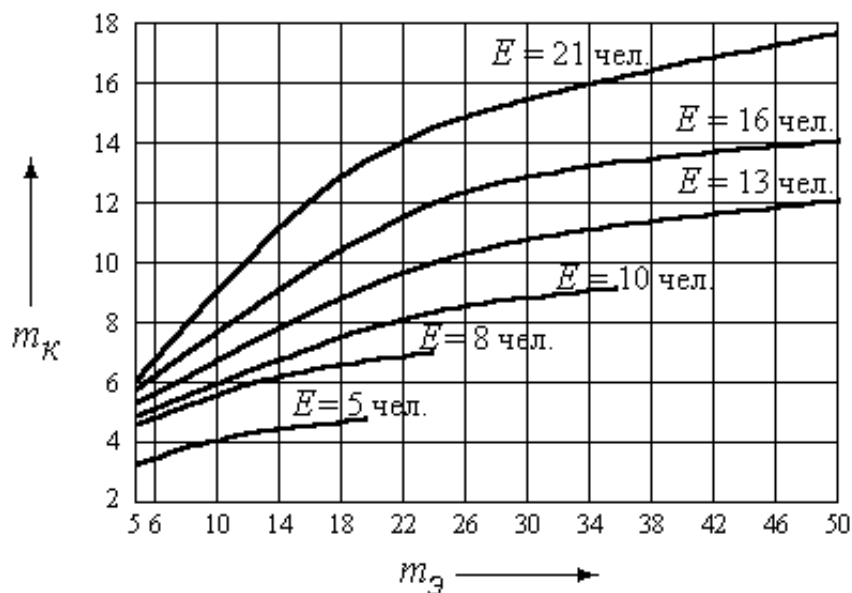
Необходимо учитывать, что масса подъёмных канатов частично компенсируется массой кабелей, подвешенных одним концом под кабиной, а другим – к стенке шахты на половине высоты подъёма. На основании расчёта статических моментов нагрузки может быть построена упрощённая нагрузочная диаграмма и выбрана по каталогу примерная мощность двигателя. Для построения полной нагрузочной диаграммы следует учитывать время разгона и замедления электропривода, время открытия и закрытия дверей, количество остановок при движении кабины, время входа и выхода пассажиров при наиболее характерном цикле работы. Примерные данные для расчёта времени ускорения и замедления привода или суммарного времени с учётом времени открывания и закрытия дверей могут быть получены из таблицы 4.4.

Таблица 4.4 – Данные для расчёта времени ускорения и замедления привода

Скорость движения, м/с	Время ускорения и замедления при расстоянии между этажами, с		Суммарное время (кабина с двухстворчатыми дверями шириной до 1 м), с
	3,6 м	7,2 м и более	
0,75	1,6	1,6	6,3
1,0	1,8	1,8	6,3
1,5	1,8	1,8	6,3
2,5	2,8	2,0	6,5
3,5	3,2	2,5	7,0



Время входа и выхода пассажиров из кабины ориентировочно выбирается равным 1,0 с на одного человека. Оценка числа вероятных остановок на этажах с одинаковой плотностью населения может быть произведена по кривым, приведенным на рисунке 4.10.



$m_k$  – число вероятных остановок;  $m_э$  – количество этажей;  $E$  – вместимость кабины

Рисунок 4.10 – Кривые для определения числа вероятных остановок лифта

При построении полной нагрузочной диаграммы необходимо учитывать также и некоторые другие факторы, зависящие от условий эксплуатации лифтов: задержки, выравнивание кабины против этажа, движение кабины на пониженной скорости и т. д. В этом случае при расчёте общее время цикла увеличивается на 10 %.

При точном расчёте мощности электродвигателя лифта следует различать режимы равномерного и неравномерного грузопотоков.

Методика выбора мощности двигателя при равномерном грузопотоке сводится к следующему.

1 При известной массе кабины  $G_{каб}$  и противовеса  $G_{пр}$  находится изменение тягового усилия  $F$  на канатоведущем шкиве в зависимости от числа предполагаемых остановок кабины. Число остановок кабины  $m_k$  определяется по кривым на рисунке 4.10. Изменение массы груза с кабиной  $\Delta G_1$  на каждой остановке принимается равномерным и рассчитывается по формуле

$$\Delta G_1 = \frac{G_{ном}}{m_k}, \quad (4.24)$$

где  $G_{ном}$  – грузоподъёмность кабины, кг;

$m_k$  – число предполагаемых остановок.

Тяговые усилия определяются при полностью загруженной кабине, стоящей на первом этаже, по формуле

$$F = (G_{ном} + G_{каб} + G_{кан} + G_k - G_{np})g, \quad (4.25)$$

а на предполагаемых остановках выше первого этажа по формуле

$$F = (G_{ном} + G_{каб} + g_{нк} X + G_k - k_1 \Delta G_1)g - [G_{np} + g_{нк} (H - X)]g, \quad (4.26)$$

где  $k_1$  – номер предполагаемой остановки;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$G_k$  – вес подвесного кабеля, кг;

$g_{нк}$  – вес 1 м подъёмного каната, кг/м;

$H, X$  – высота подъёма (см. рисунок 4.1), м.

2 Рассчитываются статические моменты, соответствующие тяговым усилиям на предполагаемых остановках, по формулам

$$M = \frac{F}{i\eta} \cdot \frac{D}{2} \quad \text{при } F > 0; \quad (4.27)$$

$$M = \frac{F}{i} \cdot \frac{D}{2} \eta \quad \text{при } F < 0. \quad (4.28)$$

3 Для движения кабины вверх и вниз по таблице 4.3 определяется время разгона и торможения кабины, рассчитывается время равномерного движения, находится время, необходимое для открытия и закрытия дверей, входа и выхода пассажиров и случайных задержек.

Суммарное время ускорения и замедления кабины за полный рейс определяется по формуле

$$t'_1 = t_1 (m_k + 1), \quad (4.29)$$

где  $t_1$  – время ускорения и замедления кабины, с;

$t'_1$  – суммарное время ускорения и замедления кабины за полный рейс, с.

Время равномерного движения кабины между предполагаемыми остановками рассчитывается по формуле

$$t_2 = \frac{h(m_{э} - 1) - S_1}{Vm_k}, \quad (4.30)$$

где  $S_1$  – расстояние, затрачиваемое на ускорение и замедление кабины,

$$S_1 = \frac{Vt_1 m_k}{2}. \quad (4.31)$$



Время равномерного движения кабины вверх определяется по формуле

$$t'_2 = t_2 m_k. \quad (4.32)$$

Время равномерного движения кабины вниз рассчитывается по формуле

$$t_3 = \frac{h(m_{\text{э}} - 1) - S_2}{V}, \quad (4.33)$$

где  $S_2$  – расстояние, затрачиваемое на ускорение и замедление кабины,

$$S_2 = \frac{Vt_1}{2}. \quad (4.34)$$

Время движения кабины за полный рейс без учёта времени стоянки определяется по формуле

$$\Sigma t_1 = t'_1 + t'_2 + t_3. \quad (4.35)$$

Время открытия и закрытия дверей с автоматическим приводом за полный рейс кабины рассчитывается по формуле

$$t'_4 = t_4 (m_k + 1), \quad (4.36)$$

где  $t_4$  – время открытия и закрытия дверей с автоматическим приводом (значения указаны в таблице 4.4).

Время входа и выхода одного пассажира из кабины принимается как  $t_5 \approx 1$  с.

Время входа и выхода пассажиров за полный рейс кабины определяется следующим образом:

$$t'_5 = 2t_5 E. \quad (4.37)$$

Время остановок кабины за полный рейс рассчитывается по формуле

$$\Sigma t_2 = t'_4 + t'_5. \quad (4.38)$$

С учётом дополнительного времени время полного рейса кабины

$$T = (\Sigma t_1 + \Sigma t_2) + 0,1(\Sigma t_1 + \Sigma t_2). \quad (4.39)$$

4 По полученным данным методом эквивалентного момента определяется величина момента двигателя при стандартной продолжительности включения и производится расчёт мощности электродвигателя.



5 Строится полная нагрузочная диаграмма электропривода с учётом переходных режимов и выполняется проверка электродвигателя методом эквивалентных величин.

При наличии неравномерного грузопотока расчёт производится в том же порядке, но для определения тяговых усилий должен быть задан график изменения грузопотока по этажам при движении кабины вверх и вниз.

### Список литературы

1 **Ключев, В. И.** Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов / В. И. Ключев, В. М. Терехов. – Москва: Энергия, 1980. – 360 с.

2 **Капунцов, Ю. Д.** Электрический привод промышленных и бытовых установок: учебное пособие для вузов / Ю. Д. Капунцов. – 3-е изд., стер. – Москва: МЭИ, 2011. – 224 с.

3 **Белов, М. П.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – 2-е изд., стер. – Москва: Академия, 2004. – 576 с.

4 Электрооборудование кранов / А. П. Богословский [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1983. – 310 с.

5 Лифты: учебник для вузов / Под общ. ред. Д. П. Волкова. – Москва: АСВ, 1999. – 480 с.

6 Лифты: учебник для вузов / Г. Г. Архангельский [и др.]; под общ. ред. Д. П. Волкова. – Москва: АСВ, 2010. – 576 с.

