

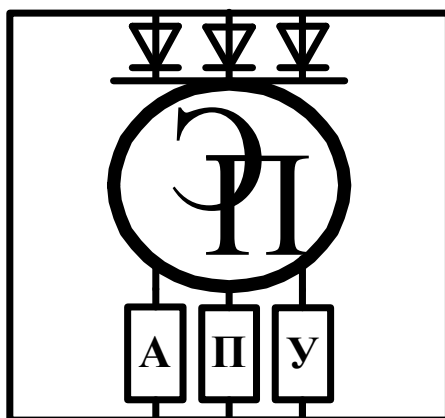
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТИПОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

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

Часть 2



Могилев 2023

УДК 62-83
ББК 31.291
А22

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «14» февраля 2023 г., протокол № 6

Составитель ст. преподаватель Л. В. Жесткова

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

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

Учебное издание

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТИПОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Часть 2

Ответственный за выпуск	С. М. Фурманов
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 81 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

7 Расчёт параметров и построение оптимальной тахограммы движения кабины лифта. Расчёт параметров и построение характеристик дотягивания, обеспечивающих заданную точность остановки	4
7.1 Постановка задачи (задание 1).....	4
7.2 Методические рекомендации к выполнению задания 1	5
7.3 Постановка задачи (задание 2).....	11
7.4 Методические рекомендации к выполнению задания 2	12
8 Расчёт моментов нагрузки механизма подъёма пассажирского лифта и построение нагрузочных и скоростных диаграмм. Расчёт мощности и выбор электродвигателя	28
8.1 Постановка задачи.....	29
8.2 Рекомендации к выполнению расчётов	30
Список литературы	46

Часть 2

7 Расчёт параметров и построение оптимальной тахограммы движения кабины лифта. Расчёт параметров и построение характеристик дотягивания, обеспечивающих заданную точность остановки

7.1 Постановка задачи (задание 1)

Рассчитать параметры и построить оптимальную диаграмму движения скоростного лифта. В таблицах 7.1 и 7.2 приведены исходные данные для расчётов. Номер варианта соответствует номеру студента в списке группы по журналу.

Таблица 7.1 – Исходные данные для расчётов

Параметр	Последняя цифра номера варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Установившаяся скорость $v_{уст}$, м/с	1,4	1,6	2,0	2,0	2,8	4,0	4,0	5,0	6,0	7,0
Допустимое ускорение $a_{доп}$, м/с ²	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Таблица 7.2– Исходные данные для расчётов

Параметр	Предпоследняя цифра номера варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Допустимый рывок $r_{доп}$, м/с ³	8	8	10	10	12	12	14	14	15	15
Высота одного этажа h , м	2,6	2,6	2,8	2,8	3,0	3,0	3,2	3,2	3,4	3,4
Число этажей n	1	2	3	4	5	6	7	10	12	15

В расчётной части должны быть отражены следующие вопросы:

- 1) исходные данные;
- 2) основные формулы для расчёта параметров оптимальной диаграммы;
- 3) расчёты параметров диаграммы на отдельных этапах движения кабины лифта;
- 4) построение оптимальной диаграммы лифта;
- 5) выбор варианта системы электропривода, обеспечивающего диаграмму движения лифта.

7.2 Методические рекомендации к выполнению задания 1

Оптимальная диаграмма движения кабины лифта, обеспечивающая минимальную длительность режимов разгона-торможения, представлена на рисунке 7.1.

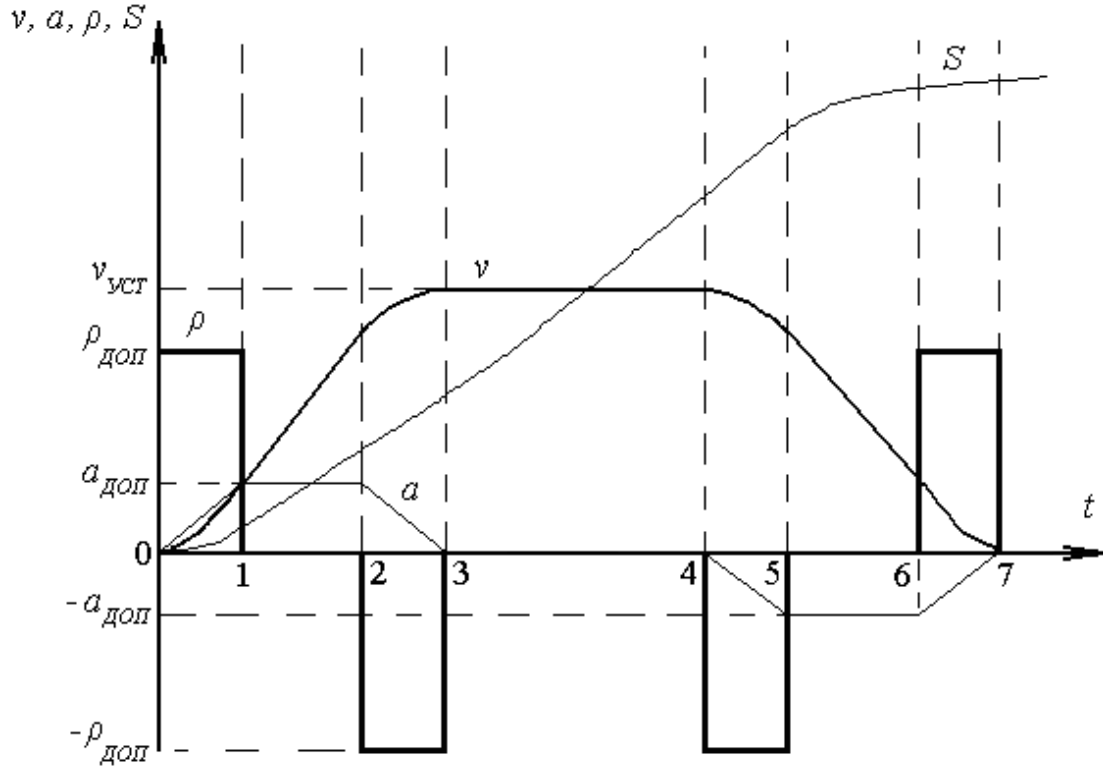


Рисунок 7.1 – Оптимальная диаграмма движения кабины лифта

В соответствии с этим графиком значения ускорения и рывка на отдельных интервалах переходного процесса поддерживаются постоянными и равными предельно допустимыми значениями [8].

На первом этапе разгона $[0-1]$ поддерживается постоянным рывок: $\rho = \rho_{\text{доп}} = \text{const}$, а ускорение изменяется по линейному закону:

$$a_1(t) = \rho_{\text{доп}} \cdot t. \quad (7.1)$$

Изменение скорости характеризуется квадратичной параболой:

$$v_1(t) = \frac{\rho_{\text{доп}} \cdot t^2}{2}. \quad (7.2)$$

Путь, проходимый кабиной на этом этапе, определяется кубической параболой:

$$S_1(t) = \frac{\rho_{\text{доп}} \cdot t^3}{6}. \quad (7.3)$$

Длительность первого интервала движения [0–1] определяется из условия

$$t_1 = \frac{a_{\text{доп}}}{\rho_{\text{доп}}}. \quad (7.4)$$

В конце первого интервала движения ускорение достигает допустимого значения ($a_1 = a_{\text{доп}}$), а величины скорости и пройденного пути могут быть определены при условии $t = t_1$ подстановкой (7.4) в (7.3) и (7.2):

$$v_1 = \frac{a_{\text{доп}}^2}{2 \cdot \rho_{\text{доп}}}; \quad (7.5)$$

$$S_1 = \frac{a_{\text{доп}}^3}{6 \cdot \rho_{\text{доп}}^2}. \quad (7.6)$$

На этапе движения кабины [2–3], которым завершается режим разгона до установившейся скорости $v_{\text{уст}}$, рывок имеет такую же величину, как и на интервале [0–1], но с противоположным знаком: $\rho = -\rho_{\text{доп}} = \text{const}$, а изменение ускорения и скорости характеризуется зависимостями

$$a_3(t) = a_{\text{доп}} - \rho_{\text{доп}} \cdot t; \quad (7.7)$$

$$\Delta v_3(t) = \left(a_{\text{доп}} - \frac{\rho_{\text{доп}} \cdot t}{2} \right) \cdot t. \quad (7.8)$$

Длительность третьего этапа [2–3] равна длительности первого этапа [0–1]:

$$\Delta t_3 = t_1 = \frac{a_{\text{доп}}}{\rho_{\text{доп}}}. \quad (7.9)$$

В конце интервала [2–3] ускорение становится равным нулю ($a_3 = 0$), а изменение скорости на этом этапе определяется из (7.8) и (7.9) при $t = \Delta t_3$:

$$\Delta v_3 = \frac{a_{\text{доп}}^2}{2 \cdot \rho_{\text{доп}}}. \quad (7.10)$$

На втором этапе разгона [1–2] с постоянным ускорением ($\rho = 0$, $a = a_{\text{доп}} = \text{const}$) скорость изменяется на величину:

$$\Delta v_2 = v_{уст} - v_1 - \Delta v_3 = v_{уст} - \frac{a_{доп}^2}{2 \cdot \rho_{доп}^2} - \frac{a_{доп}^2}{2 \cdot \rho_{доп}} = v_{уст} - \frac{a_{доп}^2}{\rho_{доп}}. \quad (7.11)$$

Изменение этой скорости во времени на этапе [1–2] определяется как

$$\Delta v_2(t) = a_{доп} \cdot t. \quad (7.12)$$

Длительность этапа [1–2] можно найти по формуле

$$\Delta t_2 = \frac{v_{уст}}{a_{доп}} - \frac{a_{доп}}{\rho_{доп}}. \quad (7.13)$$

Перемещение кабины во времени на втором этапе [1–2] характеризуется зависимостью

$$\Delta S_2 = \frac{a_{доп} \cdot t}{2} \cdot \left(\frac{a_{доп}}{\rho_{доп}} + t \right). \quad (7.14)$$

При подстановке в (7.14) $t = \Delta t_2$ можно определить перемещение кабины на этапе [1–2]:

$$\Delta S_2 = \frac{v_{уст}}{2} \cdot \left(\frac{v_{уст}}{a_{доп}} - \frac{a_{доп}}{\rho_{доп}} \right). \quad (7.15)$$

На третьем этапе [2–3] перемещение кабины во времени характеризуется зависимостью

$$\Delta S_3 = \left(v_{уст} - \frac{a_{доп}^2}{2 \cdot \rho_{доп}} \right) \cdot t + \frac{a_{доп} \cdot t}{2} - \frac{\rho_{доп} \cdot t^3}{6}. \quad (7.16)$$

При $t = \Delta t_3$ перемещение на интервале [2–3], с учётом (4.9), можно определить следующим образом:

$$\Delta S_3 = \frac{a_{доп}}{\rho_{доп}} \cdot \left(v_{уст} - \frac{a_{доп}^2}{6 \cdot \rho_{доп}} \right). \quad (7.17)$$

Полный путь разгона равен сумме путей, проходимых кабиной на первых трёх этапах движения. Тогда из (7.6), (7.15), (7.17)

$$S_{РАЗГ} = S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 = \frac{v_{уст}^2}{2 \cdot a_{доп}} + \frac{v_{уст} \cdot a_{доп}}{2 \cdot \rho_{доп}}. \quad (7.18)$$

Полная длительность разгона представляет собой сумму длительностей первых трёх этапов, определяемых выражениями (7.4), (7.13), (7.9):

$$t_{РАЗГ} = t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = \frac{v_{уст}}{a_{доп}} + \frac{a_{доп}}{\rho_{доп}}. \quad (7.19)$$

Выражения (7.18) и (7.19) определяют соответственно минимальный путь разгона и минимальное время разгона при наличии ограничений, накладываемых на ускорение и рывок, причём первые члены выражений характеризуют минимальные путь и время разгона при отсутствии ограничения рывка, а вторые – определяют увеличение пути и времени вследствие ограничения рывка.

При заданной величине установившейся скорости и указанных ограничениях ускорения и рывка электропривод лифта должен обеспечивать максимальное приближение реального пути и времени разгона к расчётным (7.18) и (7.19).

Аналогично могут быть получены выражения, характеризующие движение кабины лифта в процессе торможения.

Расчёт параметров пятого этапа [4–5] производится по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \rho_5 &= -\rho_{доп}; \\ a_5(t) &= -\rho_{доп} \cdot t; \\ \Delta v_5(t) &= -\frac{\rho_{доп} \cdot t^2}{2}; \\ \Delta S_5(t) &= v_{уст} \cdot t - \frac{\rho_{доп} \cdot t^3}{6}; \\ \Delta t_5 &= \frac{a_{доп}}{\rho_{доп}}; \\ \Delta v_5 &= -\frac{a_{доп}^2}{2 \cdot \rho_{доп}}; \\ \Delta S_5(t) &= \frac{a_{доп}}{\rho_{доп}} \cdot \left(v_{уст} - \frac{a_{доп}^2}{6 \cdot \rho_{доп}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (7.20)$$

Параметры шестого этапа [5–6] рассчитывают по формулам

$$\left. \begin{aligned}
& \rho_6 = 0; \\
& a_6(t) = -a_{\text{доп}} = \text{const}; \\
& \Delta v_6(t) = -a_{\text{доп}} \cdot t; \\
& \Delta S_6(t) = v_{\text{уст}} \cdot t - \frac{a_{\text{доп}} \cdot t}{2} \cdot \left(\frac{a_{\text{доп}}}{\rho_{\text{доп}}} + 1 \right); \\
& \Delta t_6 = \frac{v_{\text{уст}}}{a_{\text{доп}}} - \frac{a_{\text{доп}}}{\rho_{\text{доп}}}; \\
& \Delta v_6 = -v_{\text{уст}} + \frac{a_{\text{доп}}^2}{\rho_{\text{доп}}}; \\
& \Delta S_6 = \frac{v_{\text{уст}}}{2} \cdot \left(\frac{v_{\text{уст}}}{a_{\text{доп}}} - \frac{a_{\text{доп}}}{\rho_{\text{доп}}} \right).
\end{aligned} \right\} \quad (7.21)$$

Расчёт параметров седьмого этапа [6–7] осуществляется по формулам

$$\left. \begin{aligned}
& \rho_7 = -\rho_{\text{доп}}; \\
& a_7(t) = -a_{\text{доп}} + \rho_{\text{доп}} \cdot t; \\
& \Delta v_7(t) = -a_{\text{доп}} \cdot t + \frac{\rho_{\text{доп}} \cdot t^2}{2}; \\
& \Delta S_7(t) = \frac{a_{\text{доп}}^2}{2 \cdot \rho_{\text{доп}}} \cdot t - \frac{a_{\text{доп}} \cdot t^2}{2} + \frac{\rho_{\text{доп}}^3}{6}; \\
& \Delta t_7 = \frac{a_{\text{доп}}}{\rho_{\text{доп}}}; \\
& \Delta v_7 = -\frac{a_{\text{доп}}^2}{2 \cdot \rho_{\text{доп}}}; \\
& \Delta S_7 = \frac{a_{\text{доп}}^3}{6 \cdot \rho_{\text{доп}}^2}.
\end{aligned} \right\} \quad (7.22)$$

Путь торможения равен сумме перемещений кабины на пятом, шестом и седьмом этапах:

$$S_{\text{ТОРМ}} = \Delta S_5 + \Delta S_6 + \Delta S_7 = \frac{v_{\text{уст}}^2}{2 \cdot a_{\text{доп}}} + \frac{v_{\text{уст}} \cdot a_{\text{доп}}}{2 \cdot \rho_{\text{доп}}}. \quad (7.23)$$

Длительность торможения

$$t_{ТОРМ} = \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 = \frac{v_{УСТ}}{a_{ДОП}} + \frac{a_{ДОП}}{\rho_{ДОП}}. \quad (7.24)$$

Путь торможения $S_{ТОРМ}$, рассчитанный по формуле (7.23), определяет минимальное расстояние кабины от этажа назначения, на котором должно начаться её торможение. Это расстояние не может быть меньше величины, полученной в результате расчёта по (7.23), т. к. в противном случае вследствие ограничения на замедление и рывок кабина не может остановиться на заданном уровне.

Расчёт параметров четвёртого этапа [3–4] сводится к определению пройденного пути и времени при движении кабины с установившейся скоростью $v_{УСТ}$.

Путь, который проходит кабина на интервале [3–4] с $v_{УСТ}$ ($a_4 = 0, \rho_4 = 0$), зависит от задаваемой величины перемещения кабины $S_{ЗАД}$ до этажа назначения, а также суммы путей её разгона и торможения:

$$\Delta S_4 = S_{ЗАД} - (S_{РАЗГ} + S_{ТОРМ}). \quad (7.25)$$

Это расстояние кабина будет проходить за время

$$t_{УСТ} = \Delta t_4 = \frac{\Delta S_4}{v_{УСТ}}. \quad (7.26)$$

При этом необходимо учитывать, что этап установившегося движения может отсутствовать, если задаваемое перемещение меньше суммы путей разгона и торможения кабины, т. е.

$$S_{ЗАД} < (S_{РАЗГ} + S_{ТОРМ}) = \frac{v_{УСТ}^2}{a_{ДОП}} + \frac{v_{УСТ} \cdot a_{ДОП}}{\rho_{ДОП}}. \quad (7.27)$$

При остановках кабины на каждом этаже электропривод может не разгоняться до установившейся скорости.

При наличии этапа движения с установившейся скоростью время движения кабины можно определить из формулы

$$t_{ДВ} = t_{РАЗГ} + t_{УСТ} + t_{ТОРМ}. \quad (7.28)$$

Вышеприведенные формулы позволяют построить оптимальный график движения кабины скоростного лифта при заданных значениях установившейся скорости и допустимых величинах ускорений и рывков.

Этот оптимальный график и полученные из него количественные оценки движения следует рассматривать как предельные, к ним необходимо стремиться при выборе типа электропривода и его системы управления.

Далее следует выполнить анализ полученных результатов, оценить расчётные параметры и диаграмму движения. Сделать вывод. Предложить возможные варианты систем электропривода, обеспечивающие полученную оптимальную диаграмму движения кабины лифта.

Выбрать оптимальный вариант системы электропривода скоростного лифта, используя методику экспертных оценок [7].

7.3 Постановка задачи (задание 2)

Рассчитать параметры режима точной остановки рабочего органа позиционного механизма (быстроходного лифта) и построить механические характеристики электропривода, обеспечивающие заданную точность остановки. В таблицах 7.3 и 7.4 приведены исходные данные для расчётов. Номер варианта соответствует номеру студента в списке группы по журналу.

Таблица 7.3 – Исходные данные для расчётов

Параметр	Последняя цифра номера варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Установившаяся скорость $v_{уст}$, 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 ²	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 ³	5	5	6	6	7	7	8	8	10	10
Допустимая неточность остановки $\Delta S_{доп}$, мм	10	20	15	25	20	30	25	35	15	45
Высота подъёма H , м	32	40	45	50	30	55	32	28	42	55

Таблица 7.4 – Исходные данные для расчётов

Параметр	Предпоследняя цифра номера варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Неточность срабатывания ДТО $\Delta S_{ДТО}$, мм	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	3,0	2,5	1,5	1,0	2,0
Номинальная масса груза m_L , кг	320	320	400	450	500	600	700	800	1000	1000
Масса кабины m_K , кг	500	700	800	900	1000	1200	1400	1600	2000	2500
Приведенная к поступательному движению масса вращающихся частей $m_{вр}$, кг	150	210	240	270	300	360	420	480	600	900
Сила потерь в механической передаче $F_{пот}$, Н	480	680	770	88	980	1180	1370	1585	1980	2990

Окончание таблицы 7.4

Параметр	Предпоследняя цифра номера варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Масса 1 м каната $m_{кн}$, 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

В расчётной части должны быть отражены следующие вопросы:

- 1) исходные данные;
- 2) основные формулы для расчёта параметров режима точной остановки рабочего органа позиционного механизма;
- 3) расчёты параметров режима точной остановки рабочего органа позиционного механизма;
- 4) построение механических характеристик электропривода, обеспечивающих заданную точность остановки;
- 5) построение диаграммы движения лифта $v = f(t)$ в режиме остановки;
- 6) определение места установки датчика точной остановки;
- 7) выбор варианта системы электропривода, обеспечивающего заданную точность остановки.

7.4 Методические рекомендации к выполнению задания 2

Существенное влияние на возможность выполнения требований точности остановки кабины лифта на заданном уровне оказывают характеристики электропривода. Для определения предъявляемых к электроприводу требований рассмотрим движение кабины в процессе торможения [8]. Схема движения кабины лифта в режиме остановки представлена на рисунке 7.2.

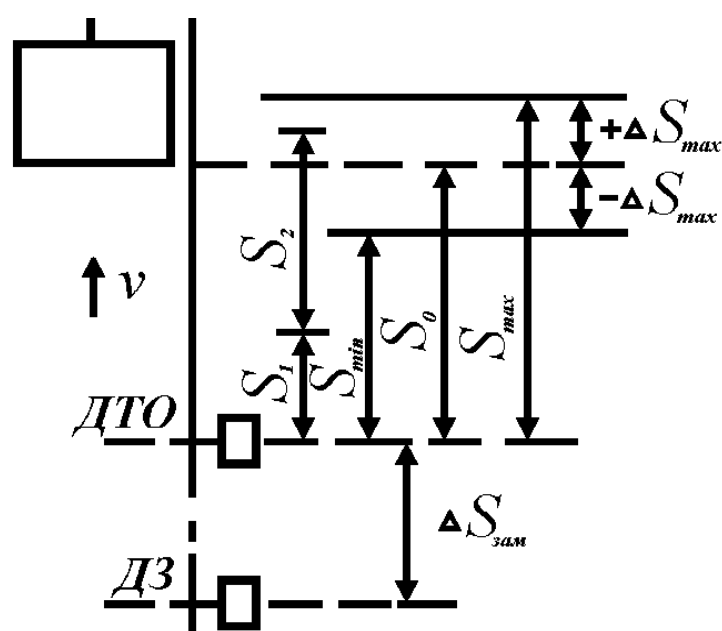


Рисунок 7.2 – Схема движения кабины лифта в режиме остановки

Кабина приближается к заданному уровню остановки с начальной скоростью $v_{нач}$. Сигнал с датчика точной остановки (ДТО) даёт команду на начало торможения. Чаще всего на быстроходных лифтах торможение осуществляется отключением двигателя и наложением механического тормоза, после чего процесс движения кабины становится неуправляемым. Если принять, что отключение двигателя и наложение тормоза происходит одновременно и усилие тормоза возрастает до установленной величины скачком, то процесс торможения можно разделить на два этапа.

Первый этап движения обусловлен собственным временем срабатывания аппаратов t_a , в течение которого после поступления сигнала от ДТО кабина продолжает двигаться со скоростью $v_{нач}$, с которой она подошла к ДТО, и проходит за это время путь S_1 :

$$S_1 = v_{нач} \cdot t_a. \quad (7.29)$$

Второй этап начинается после срабатывания аппаратуры переключения. Двигатель отключается от сети, накладывается тормоз, а кинетическая энергия всех поступательно и вращательно движущихся масс лифта расходуется на совершение работы по преодолению сил статического сопротивления движению находимом при этом пути S_2 :

$$\frac{m_{\Sigma} \cdot v_{нач}^2}{2} = (F_T + F_C) \cdot S_2, \quad (7.30)$$

где m_{Σ} – суммарная масса движущихся частей лифта, приведенная к поступательному движению кабины, кг;

$F_T + F_C$ – суммарное усилие сопротивления движению, создаваемое моментом механического тормоза и статической силы сопротивления движению, Н.

Путь кабины на втором этапе движения определяется формулой

$$S_2 = \frac{v_{нач}^2}{2a}, \quad (7.31)$$

где a – ускорение кабины в процессе торможения, $a = (F_T + F_C) / m_{\Sigma}$.

Полный путь, который проходит кабина до остановки после поступления сигнала от ДТО

$$S = S_1 + S_2 = v_{нач} \cdot t_a + \frac{v_{нач}^2}{2a}. \quad (7.32)$$

Параметры, входящие в (7.32), не остаются постоянными, а могут изменяться по разным причинам, вследствие чего изменяется путь торможения S . Это приводит к отклонению положения кабины от заданного уровня точной остановки. Параметры можно представить в следующем виде:

$$S = S_0 \pm \Delta S; \quad v_{нач.} = v_0 \pm \Delta v; \quad t_a = t_0 \pm \Delta t; \quad a = a_0 \pm \Delta a,$$

где S_0, v_0, t_0, a_0 – средние значения переменных;

$\Delta S, \Delta v, \Delta t, \Delta a$ – максимальные отклонения переменных от средних значений.

ДТО должен устанавливаться от заданного уровня остановки на расстоянии, равном среднему при торможении S_0 . Тогда величина ΔS будет определять максимальную неточность остановки (см. рисунок 7.2).

Ограничение отклонений тормозного пути от его среднего значения является важной задачей, решаемой при автоматизации процесса остановки.

Подставив в (7.32) значения переменных, выраженные через средние значения и их максимальные отклонения, можно определить максимальный и минимальный пути торможения:

$$\begin{aligned} S_{\max} &= S_0 + \Delta S = (v_0 + \Delta v) \cdot (t_0 + \Delta t) + \frac{(v_0 + \Delta v)^2}{2(a_0 - \Delta a)} = \\ &= v_0 t_0 \left(1 + \frac{\Delta v}{v_0}\right) \left(1 + \frac{\Delta t}{t_0}\right) + \frac{v_0^2}{2a_0} \cdot \frac{(1 + \Delta v / v_0)^2}{(1 - \Delta a / a_0)}; \end{aligned} \quad (7.33)$$

$$\begin{aligned} S_{\min} &= S_0 - \Delta S = (v_0 - \Delta v) \cdot (t_0 - \Delta t) + \frac{(v_0 - \Delta v)^2}{2(a_0 + \Delta a)} = \\ &= v_0 t_0 \left(1 - \frac{\Delta v}{v_0}\right) \left(1 - \frac{\Delta t}{t_0}\right) + \frac{v_0^2}{2a_0} \cdot \frac{(1 - \Delta v / v_0)^2}{(1 + \Delta a / a_0)}. \end{aligned} \quad (7.34)$$

Среднее значение пути, проходимого кабиной в процессе остановки, определяется по формуле

$$S_0 = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} = S_{01} + S_{02}, \quad (7.35)$$

где S_{01}, S_{02} – средние значения пути, которые проходит кабина соответственно на первом и втором этапах остановки.

Подставляя (7.33) и (7.34) в (7.35), получим значения S_{01}, S_{02} :

$$S_{01} = v_0 t_0 \left(1 + \frac{\Delta v}{v_0} \cdot \frac{\Delta t}{t_0}\right); \quad (7.36)$$

$$S_{02} = \frac{v_0^2}{2a_0} \cdot \frac{1 + \frac{\Delta v}{v_0} \left(\frac{\Delta v}{v_0} + 2 \frac{\Delta a}{a_0}\right)}{1 - \left(\frac{\Delta a}{a_0}\right)^2}. \quad (7.37)$$

Максимальная неточность остановки

$$\Delta S = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} = \Delta S_1 + \Delta S_2, \quad (7.38)$$

где ΔS_1 , ΔS_2 – максимальные отклонения пути кабины от средних значений соответственно на первом и втором этапах остановки.

Подставив (7.33), (7.34) в (7.38), получаем ΔS_1 , ΔS_2 :

$$\Delta S_1 = v_0 t_0 \left(\frac{\Delta v}{v_0} + \frac{\Delta t}{t_0} \right); \quad (7.39)$$

$$\Delta S_2 = \frac{v_0^2}{2a_0} \cdot \frac{\frac{\Delta a}{a_0} + \frac{\Delta v}{v_0} \left(2 + \frac{\Delta v}{v_0} \cdot \frac{\Delta a}{a_0} \right)}{1 - \left(\frac{\Delta a}{a_0} \right)^2}. \quad (7.40)$$

Из приведенных выражений видно, что среднее значение путей торможения и максимальные отклонения от средних значений зависят как от средних значений скоростей v_0 , ускорения a_0 и времени срабатывания аппаратуры t_0 , так и от отклонений этих величин от средних значений. Относительные отклонения путей торможения от их средних значений, определяющие неточность остановки, вычисляются следующим образом:

$$\frac{\Delta S_1}{S_{01}} = \frac{\frac{\Delta v}{v_0} + \frac{\Delta t}{t_0}}{1 + \frac{\Delta v}{v_0} \cdot \frac{\Delta t}{t_0}}; \quad (7.41)$$

$$\frac{\Delta S_2}{S_{02}} = \frac{\frac{\Delta a}{a_0} + \frac{\Delta v}{v_0} \left(2 + \frac{\Delta v}{v_0} \cdot \frac{\Delta a}{a_0} \right)}{1 + \frac{\Delta v}{v_0} \left(\frac{\Delta v}{v_0} + 2 \frac{\Delta a}{a_0} \right)}. \quad (7.42)$$

По выражениям (7.41), (7.42) построены графики изменения относительных отклонений путей торможения на первом и втором этапах, приведенные на рисунках 7.3 и 7.4.

Из рисунка 7.3 видно, что относительные отклонения путей торможения от среднего значения возрастают с увеличением отклонения Δt от среднего значения времени срабатывания аппаратуры t_0 и с увеличением отклонения начальной скорости Δv от её среднего значения v_0 . Причём с увеличением Δv относительное влияние величины Δt на отклонение пути движения на первом этапе остановки уменьшается. Например, при $\Delta v / v_0 = 0$ изменение $\Delta t / t_0$ от 0 до 0,25 увеличивает $\Delta S_1 / S_{01}$ на 0,25, а при $\Delta v / v_0 = 0,5$ такое же изменение величины $\Delta t / t_0$ приводит к возрастанию $\Delta S_1 / S_{01}$ только на 0,166.

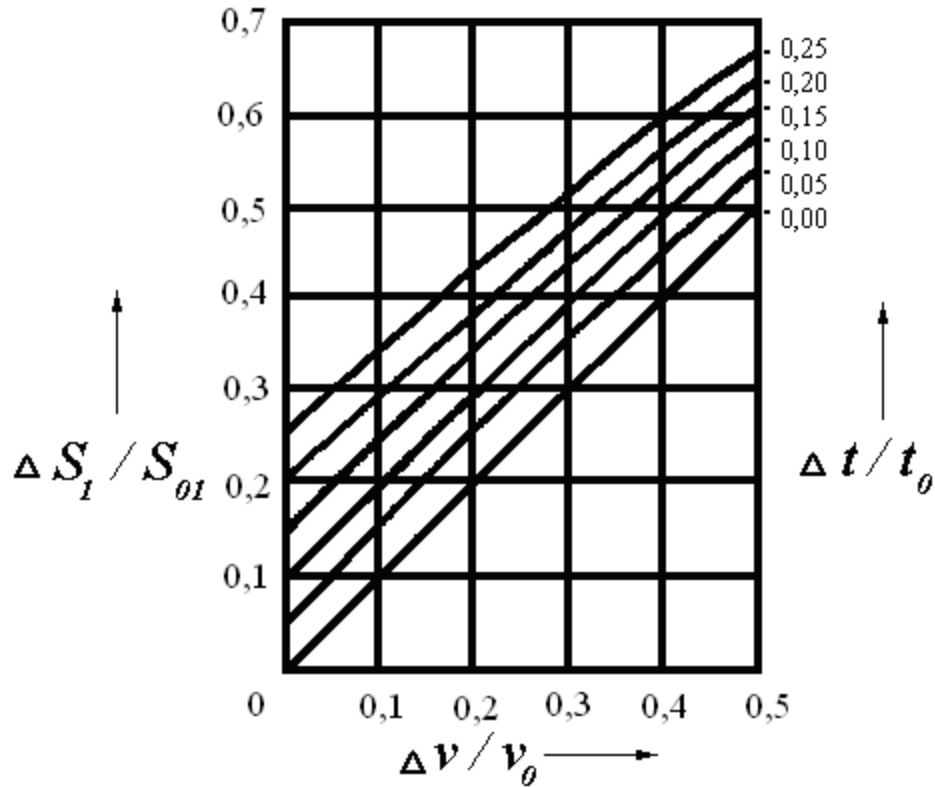


Рисунок 7.3 – Зависимость относительного отклонения пути кабины на первом этапе торможения от отклонения начальной скорости и времени срабатывания аппаратуры от средних значений

Из рисунка 7.4 видно, что относительное отклонение пути торможения на втором этапе возрастает с увеличением Δv и Δa , причём с увеличением Δv уменьшается относительное влияние отклонения величины Δa . Например, при $\Delta v / v_0 = 0$ изменение $\Delta a / a_0$ от 0 до 0,5 даёт изменение $\Delta S_2 / S_{02}$ на 0,5, а при $\Delta v / v_0 = 0,5$ такое же изменение $\Delta a / a_0$ увеличивает $\Delta S_2 / S_{02}$ только на величину 0,0128.

Рассмотрим параметры, которые влияют на отклонение путей торможения [8].

Величина t_0 представляет собой суммарное среднее значение времени срабатывания всех последовательно действующих в схеме управления тормозом аппаратов. В справочной литературе указываются среднее время срабатывания для каждого аппарата и возможный разброс конкретных значений времени срабатывания. Для большинства аппаратов в среднем возможный разброс времени срабатывания составляет $\pm 15\% \dots 20\%$ от среднего времени срабатывания, поэтому относительное значение $\Delta t / t_0 = 0,15$ может быть с достаточной степенью точности принято в большинстве практических расчётов.

Из выражений (7.36), (7.39) следует, что и среднее значение пути на первом этапе S_{01} , и отклонение от него ΔS_1 пропорциональны среднему значению времени срабатывания аппаратуры t_0 , поэтому для уменьшения неточности остановки следует стремиться к уменьшению времени срабатывания аппа-

ратуры t_0 путём использования быстродействующих аппаратов и сокращения числа последовательно действующих элементов схемы. Однако необходимо заметить, что эти меры могут уменьшить лишь отклонение от исходного пути на первом этапе остановки и не влияют на величину отклонения на втором этапе торможения.

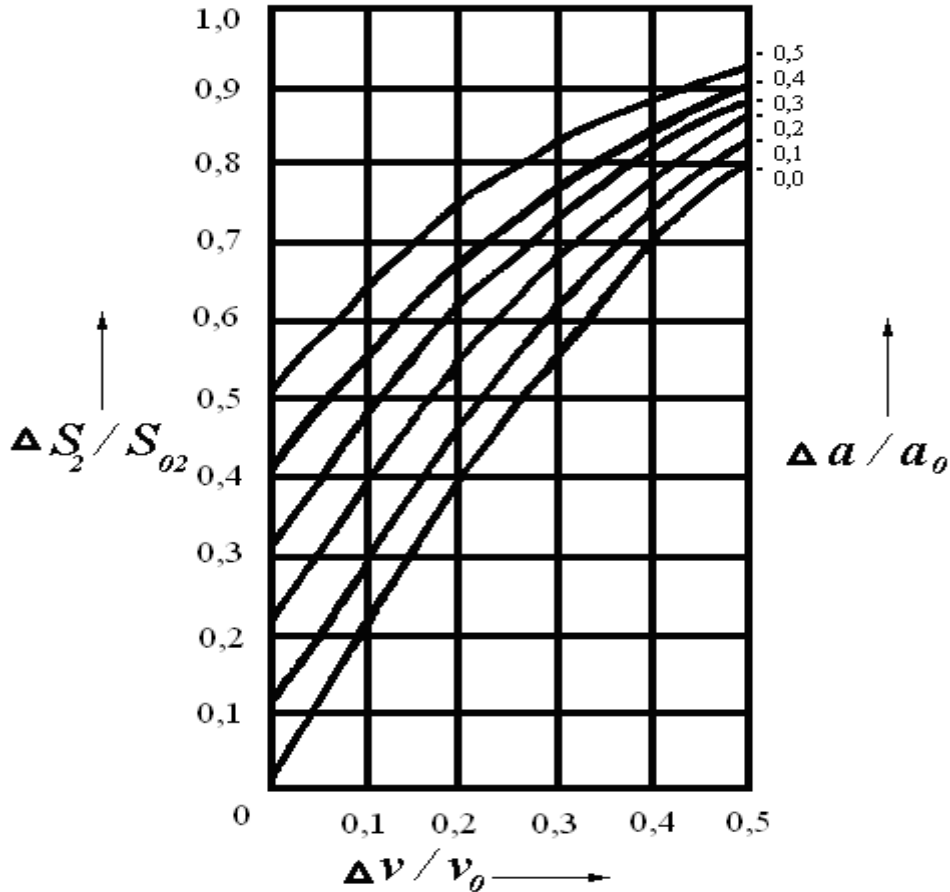


Рисунок 7.4 – Зависимость относительного отклонения пути кабины на втором этапе торможения от отклонения скорости и ускорения от средних значений

Ускорение кабины в процессе торможения, как следует из выражения $a = (F_T + F_C) / m_\Sigma$, зависит от усилия тормоза F_T , силы сопротивления F_C и от приведенной массы движущихся частей лифта m_Σ .

Усилие тормоза можно представить в виде

$$F_T = (F_{T0} \pm \Delta F_T), \quad (7.43)$$

где F_{T0} – среднее значение усилия тормоза;

ΔF_T – его максимальное отклонение от среднего значения.

При определении среднего ускорения a_0 и его отклонения от среднего значения Δa необходимо учитывать, что как усилие сопротивления F_C , так и масса m_Σ зависят от загрузки кабины G_G .

Величины усилия сопротивления и суммарная масса определяются по формулам

$$F_C = F_T + F_{\text{ПОТ}} = G_K + G_T - G_{\text{ПР}} + F_{\text{ПОТ}} = G_T - \alpha G_H + F_{\text{ПОТ}}; \quad (7.44)$$

$$\begin{aligned} m_{\Sigma} &= m_K + m_T + m_{\text{ПР}} + m_{\text{КН}} + m_{\text{ВР}} = \\ &= G_K/g + G_T/g + G_{\text{ПР}}/g + G_{\text{КН}}/g + m_{\text{ВР}} = m_{\text{ПОСТ}} + G_T/g, \end{aligned} \quad (7.45)$$

где $F_{\text{ПОТ}}$ – сила потерь в механической передаче, Н;

$m_K, m_T, m_{\text{ПР}}, m_{\text{КН}}, m_{\text{ВР}}$ – массы кабины, груза, противовеса, канатов и приведенная к линейному перемещению масса вращающихся частей лифта, кг;

$m_{\text{ПОСТ}}$ – постоянная часть приведенной массы, кг; $m_{\text{ПОСТ}} = m_K + m_{\text{ПР}} + m_{\text{КН}} + m_{\text{ВР}}$.

Учитывая зависимости (7.44), (7.45), можно получить формулу для определения ускорения при торможении в процессе спуска кабины

$$a = \frac{F_{\text{ТО}} \pm \Delta F_T + F_{\text{ПОТ}} + \alpha G_H - G_T}{m_{\text{ПОСТ}} + \frac{G_T}{g}}. \quad (7.46)$$

Из выражения (7.46) следует, что при торможении кабины в процессе спуска максимальное ускорение возникает при пустой кабине ($G_T = 0$), когда числитель будет максимальным, а знаменатель – минимальным. По мере роста загрузки кабины ускорение уменьшается и становится минимальным при $G_T = G_H$ (рисунок 7.5, линия 1).

Значения максимального и минимального ускорений можно определить из выражения (7.46).

При $G_T = 0$

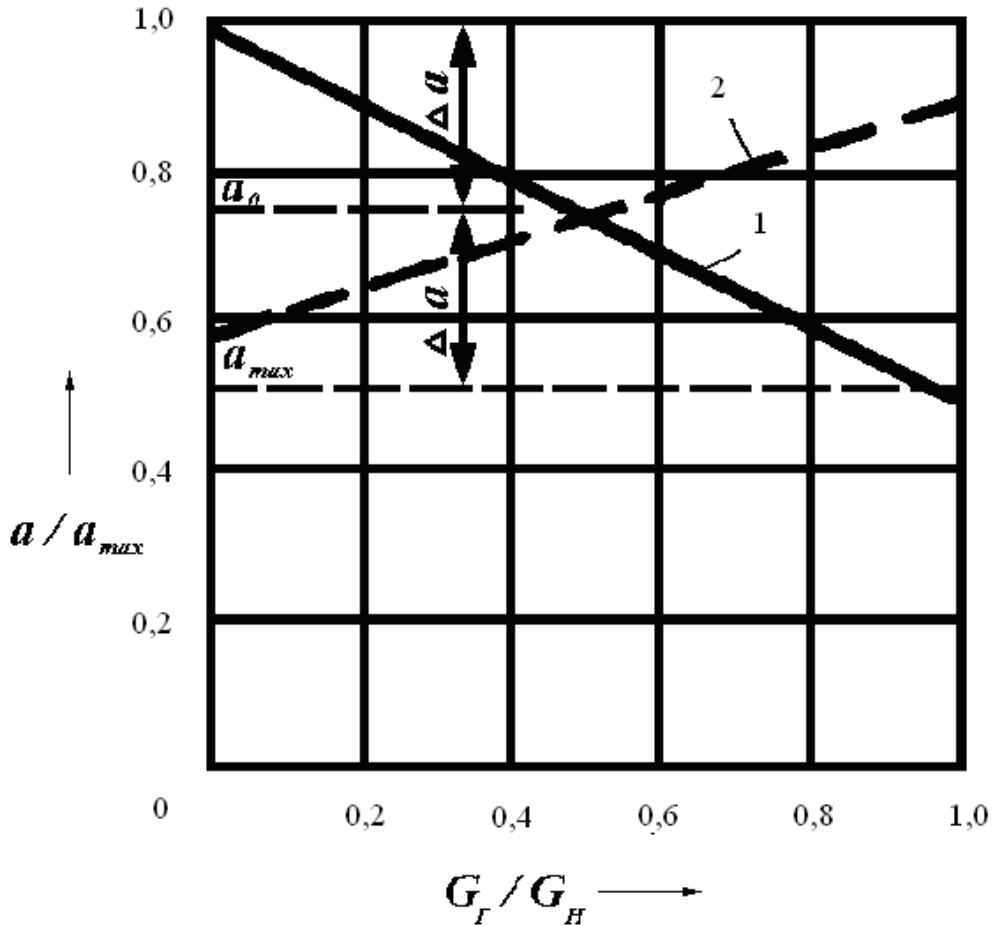
$$a_{\text{max}} = \frac{F_{\text{ТО}} + \Delta F_T + F_{\text{ПОТ}} + \alpha G_H}{m_{\text{ПОСТ}}}. \quad (7.47)$$

При $G_T = G_H$

$$a_{\text{min}} = \frac{F_{\text{ТО}} - \Delta F_T + F_{\text{ПОТ}} - G_H(1 - \alpha)}{m_{\text{ПОСТ}} + \frac{G_H}{g}}. \quad (7.48)$$

Среднее значение ускорения можно найти по формуле

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{a_{\text{max}} + a_{\text{min}}}{2} = \\ &= \frac{(F_{\text{ТО}} + F_{\text{ПОТ}} + \alpha G_H)(2 + \frac{G_H}{gm_{\text{ПОСТ}}}) + G_H(1 - \frac{\Delta F_T}{gm_{\text{ПОСТ}}})}{2m_{\text{ПОСТ}}(1 + \frac{G_H}{gm_{\text{ПОСТ}}})}. \end{aligned} \quad (7.49)$$



1 – при спуске кабины; 2 – при подъёме кабины

Рисунок 7.5 – Влияние загрузки кабины на её ускорение в режиме торможения

Максимальное отклонение ускорения от его среднего значения определяется по формуле

$$\Delta a = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{2} =$$

$$= \frac{(F_{TO} + F_{ПОТ} + \alpha G_H) \frac{G_H}{gm_{ПОСТ}} + \Delta F_T (2 + \frac{G_H}{gm_{ПОСТ}}) + G_H}{2m_{ПОСТ} (1 + \frac{G_H}{gm_{ПОСТ}})}. \quad (7.50)$$

При торможении кабины лифта в процессе подъёма ускорение характеризуется зависимостью

$$a = - \frac{F_{TO} \pm \Delta F_T + F_{ПОТ} + \alpha G_H - G_F}{m_{ПОСТ} + \frac{G_F}{g}}. \quad (7.51)$$

Как следует из выражения (7.51), с увеличением загрузки кабины возрастает его числитель, что свидетельствует об увеличении динамической силы в процессе торможения, но одновременно растёт значение знаменателя, характеризующее увеличение приведенной массы. При реальных параметрах лифтов относительное увеличение числителя превышает относительное увеличение знаменателя, вследствие чего с ростом загрузки кабины значение ускорения возрастает (см. рисунок 7.5, линия 2).

При этом если $G_T = G_H$, то максимальное значение ускорения определяется по формуле

$$-|a_{\max}| = -\frac{F_{TO} + \Delta F_T + F_{ПОТ} - \alpha G_H - G_H}{m_{\text{пост}} + \frac{G_H}{g}}. \quad (7.52)$$

Если $G_T = 0$, то минимальное ускорение можно найти по формуле

$$-|a_{\min}| = -\frac{F_{TO} - \Delta F_T + F_{ПОТ} - \alpha G_H}{m_{\text{пост}}}. \quad (7.53)$$

Среднее значение ускорения рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{a_{\max} + a_{\min}}{2} = \\ &= \frac{(F_{TO} + F_{ПОТ} - \alpha G_H)(2 + \frac{G_H}{gm_{\text{пост}}}) + G_H(1 - \frac{\Delta F_T}{gm_{\text{пост}}})}{2m_{\text{пост}}(1 + \frac{G_H}{gm_{\text{пост}}})}. \end{aligned} \quad (7.54)$$

Максимальное отклонение ускорения от его среднего значения определяется по формуле

$$\begin{aligned} \Delta a &= \frac{|a_{\max} - a_{\min}|}{2} = \\ &= \frac{G_H + \Delta F_T(2 + \frac{G_H}{gm_{\text{пост}}}) - \frac{G_H}{gm_{\text{пост}}}(F_{TO} + F_{ПОТ} - \alpha G_H)}{2m_{\text{пост}}(1 + \frac{G_H}{gm_{\text{пост}}})}. \end{aligned} \quad (7.55)$$

Сравнивая выражения (7.50) и (7.55), можно сделать вывод, что максимальное отклонение ускорения от его среднего значения в режиме торможения при спуске кабины превышает величину этого отклонения при торможении в процессе подъёма кабины. В первом случае увеличению динамической силы соответствует уменьшение приведенной массы, а во втором – увеличение динамической силы сопровождается увеличением приведенной массы.

Этот вывод подтверждается также рисунком 7.5, где линии 1 и 2 характеризуют изменение ускорения с изменением загрузки при торможении соответственно опускаемой и поднимаемой кабины при следующих значениях исходных параметров: $F_{ТО} = 8100$ Н; $\Delta F_T = 0$; $F_{ПОТ} = 980$ Н; $G_H = 4900$ Н; $m_{ПОСТ} = 3940$ кг. В качестве максимального значения ускорения принята величина, полученная из (7.50) для режима торможения в процессе спуска кабины.

Влияние изменения загрузки кабины на величину ускорения в процессе торможения является возмущающим воздействием на электропривод лифта, которое определяется спецификой работы лифта и его избежать нельзя. Относительное влияние изменения загрузки кабины на динамическую силу можно уменьшить увеличением силы тормоза F_T . Как следует из выражений (7.46) и (7.51), чем больше тормозное усилие F_T , тем меньшую часть динамической силы (числитель в указанных выражениях) составляет величина загрузки кабины G_T и тем меньше будет её влияние на изменение ускорения. С ростом F_T , как следует из (7.49) и (7.54), увеличивается и среднее значение ускорения a_0 , а рост ускорения уменьшает средний путь торможения и максимальное отклонение на втором этапе остановки кабины.

Возможности повышения F_T ограничены. Для того чтобы можно было увеличить тормозное усилие при соблюдении требования ограничения усилий, необходимо одновременно увеличивать приведенную массу движущихся частей лифта за счёт роста её постоянной части $m_{ПОСТ}$. Тогда одновременное увеличение числителя и знаменателя в выражениях (7.46) и (7.51) позволяет сохранить на допустимом уровне величину ускорения, устранив при этом его разброс за счёт уменьшения влияния загрузки кабины на величину динамической силы. Увеличение постоянной составляющей приведенной массы также способствует повышению стабильности ускорения, поскольку при этом уменьшается относительное влияние загрузки кабины на суммарную приведенную массу (знаменатель в выражениях (7.46) и (7.51)).

Увеличение приведенной массы может быть достигнуто путём установки на валу двигателя маховика. Однако следует учитывать, что увеличение приведенной массы лифта, работающего в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками и торможениями, является нежелательным, т. к. влечёт за собой увеличение динамических нагрузок электродвигателя, поэтому рассматриваемый способ повышения точности остановки находит ограниченное применение в электроприводах с червячным редуктором. В этом случае на валу двигателя размещается массивная соединительная муфта, которая одновременно служит и тормозным шкивом. При этом за счёт увеличения приведенной массы возрастает точность остановки без усложнения системы электропривода,

создаются более благоприятные условия для работы электропривода с червячным редуктором.

При определении величины среднего ускорения и его отклонения от средней величины следует учитывать то, что усилие тормоза хотя и является более стабильной величиной по сравнению с силой статического сопротивления, изменяющейся при изменении загрузки кабины, но также может изменяться на $\pm 10\% \dots 20\%$ за счёт факторов, не поддающихся строгому учёту, например, случайные изменения коэффициента трения, настройки тормоза и т. п. При этом необходимо принимать $\Delta F_T = \pm 0,1 \dots 0,2 F_{T0}$.

С учётом всех перечисленных факторов реальные значения относительных отклонений ускорения $\Delta a / a_0$ лежат в пределах $0,1 \dots 0,5$ и являются весьма существенной причиной, вызывающей неточность остановки.

Рассмотрим влияние средней скорости v_0 и её относительных отклонений Δv на точность остановки. Если механическая характеристика электродвигателя в процессе работы остается неизменной, скорость движения при подходе к датчику точной остановки полностью определяется статической нагрузкой на валу двигателя и жёсткостью механической характеристики в этом режиме. По заданной механической характеристике при известных пределах изменения статической силы сопротивления можно определить среднее значение скорости v_0 и её максимальное отклонение Δv (рисунок 7.6).

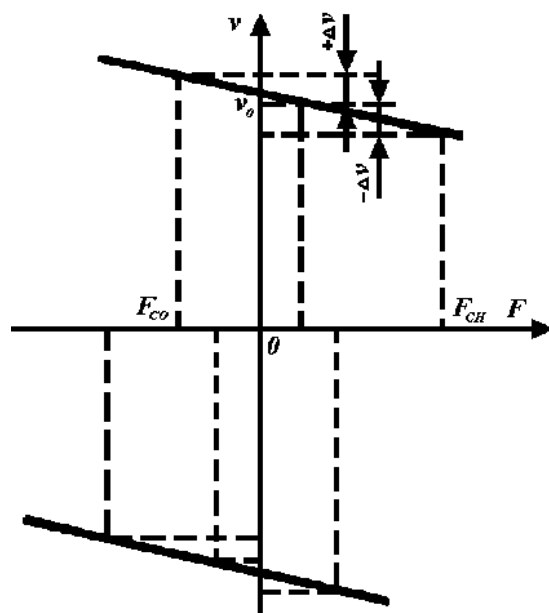


Рисунок 7.6 – Определение средней скорости и её максимального отклонения по механической характеристике двигателя и известным пределам изменения статической силы нагрузки

Из рисунков 7.3 и 7.4 следует, что отклонение скорости от её среднего значения оказывает существенное влияние на точность остановки, поэтому для повышения точности остановки желательно повышать жёсткость механической характеристики. Обычно при проектировании принимают $\Delta v / v_0 = 0,2 \dots 0,5$, учитывая, что уменьшение этой величины затруднительно, а её увеличение,

приводящее к получению слишком мягкой механической характеристики, не только уменьшает точность остановки, но и увеличивает длительность процесса дотягивания кабины к датчику точной остановки при больших статических нагрузках.

Если при заданной жёсткости механической характеристики электропривода, т. е. при заданном значении $\Delta v / v_0$, не удастся обеспечить требуемую точность остановки, её можно повысить уменьшением величины скорости v_0 при подходе кабины к датчику точной остановки. Как следует из (7.35) и (7.38), и средние значения путей торможения на первом и втором этапах остановки, и их максимальные отклонения зависят от средней скорости v_0 . На первом этапе эта зависимость пропорциональна, а на втором – квадратична. Следовательно, уменьшением средней скорости можно существенно повысить точность остановки.

При проектировании электропривода из условий точной остановки необходимо определить среднюю скорость v_0 и жёсткость механической характеристики при дотягивании кабины к датчику точной остановки по заданной допустимой неточности остановки.

Уравнение для определения параметров механической характеристики можно получить из (7.38) с учётом (7.39) и (7.40), если в нём принять $\Delta S = \Delta S_{\text{доп}}$:

$$v_0^2 + v_0 \frac{2}{\Delta a} [\Delta v a_0 + \Delta t (a_0^2 + \Delta a^2)] + \left[\Delta v^2 - \frac{2}{\Delta a} (a_0^2 - \Delta a^2) (\Delta S_{\text{доп}} - t_0 \Delta v) \right] = 0. \quad (7.56)$$

Решая данное квадратное уравнение, можно получить выражение для определения величины v_0 по задаваемому значению Δv и известным значениям других входящих в это выражение величин

$$v_0 = -\frac{1}{\Delta a} [\Delta v a_0 + \Delta t (a_0^2 - \Delta a^2)] + \sqrt{\left[\frac{\Delta v a_0 + \Delta t (a_0^2 - \Delta a^2)}{\Delta a} \right]^2 - \Delta v^2 + \frac{2}{\Delta a} (a_0^2 - \Delta a^2) (\Delta S_{\text{доп}} - t_0 \Delta v)}. \quad (7.57)$$

На рисунке 7.7 приведены построенные по выражению (7.57) графики зависимости $v_0 = f(\Delta v)$ при $\Delta S_{\text{доп}} = 0,035$ м, $a_0 = 2,2$ м/с², $t_0 = 0,25$ с, $\Delta t/t_0 = 0,15$. График 1 соответствует $\Delta a / a_0 = 0,15$, а график 2 – $\Delta a / a_0 = 0,3$. Из этого рисунка видно, что с увеличением максимального отклонения скорости Δv существенно уменьшается величина её среднего значения v_0 , при которой

обеспечивается заданная точность остановки. При этом чем больше отклонение ускорения Δa , тем меньше допустимая величина v_0 .

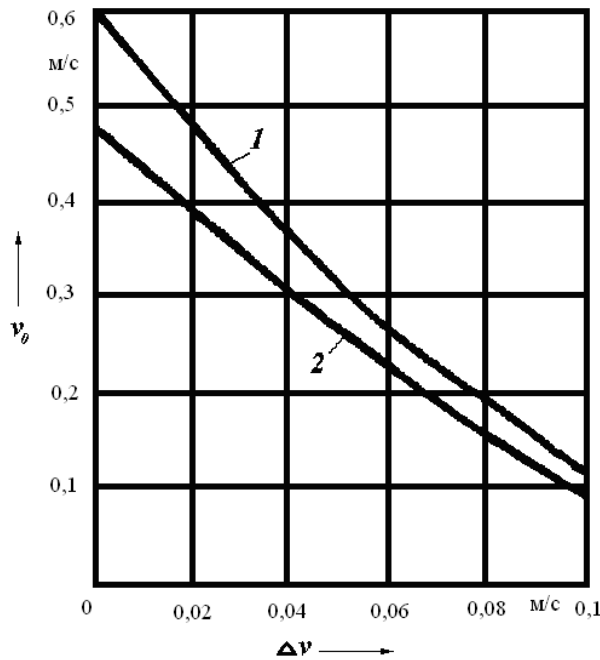


Рисунок 7.7 – Графики зависимости $v_0 = f(\Delta v)$

Определив с помощью формулы (7.57) величины v_0 и Δv , можно построить механические характеристики электропривода, при которых обеспечивается заданная точность остановки (рисунок 7.8).

При этом ордината характеристики, соответствующая среднему значению статической силы нагрузки $(F_{CH} + F_{CO}) / 2$, равна v_0 , а ординаты этой характеристики при граничных значениях статической силы нагрузки F_{CH} и F_{CO} отличаются от v_0 на величину соответственно $-\Delta v$ и $+\Delta v$. Характеристики на рисунке 7.8 соответствуют графику 2 на рисунке 7.7. Как следует из рисунка 7.8, с уменьшением средней скорости v_0 снижаются требования к жёсткости механической характеристики по условиям обеспечения требуемой точности остановки (наклон этой характеристики может увеличиваться). Если требуется, увеличивают среднюю скорость v_0 , но тогда влияние её роста на точность остановки должно компенсироваться повышением жёсткости механической характеристики, т. е. уменьшением Δv . Однако предел такой компенсации ограничивается величиной $\Delta v = 0$, которой соответствует абсолютно жёсткая механическая характеристика 1 на рисунке 7.8. Соответствующая ей величина v_0 определяет максимальное значение средней скорости, которое может быть достигнуто из условия обеспечения требуемой точности остановки уменьшением максимального отклонения скорости Δv . На рисунке 7.7 это значение скорости соответствует пересечению характеристик 1 и 2 с осью ординат и представляет интерес также для случая, когда используется астатическая система регулирования скорости электродвигателя, обеспечивающая в установившемся режиме нулевую ошибку, т. е. $\Delta v = 0$.

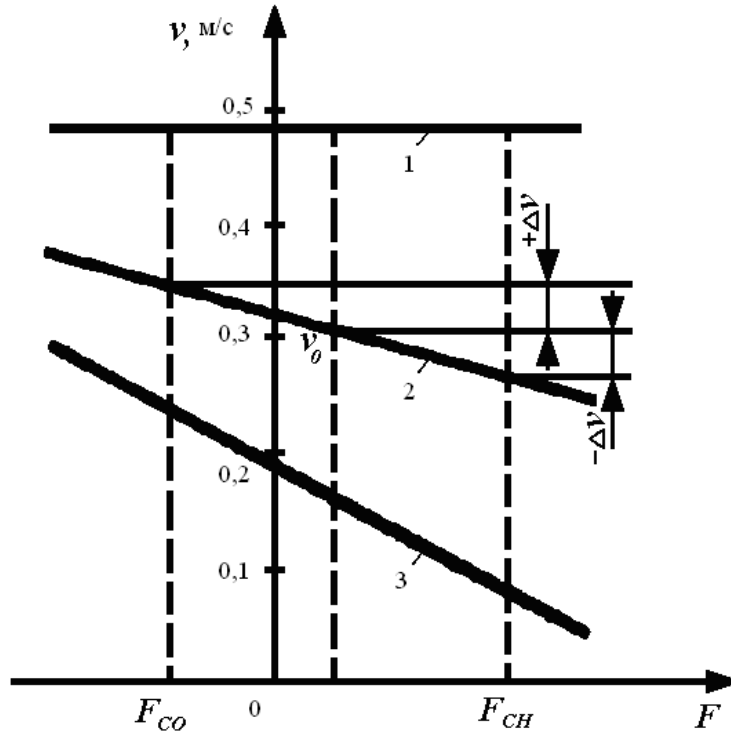


Рисунок 7.8 – Механические характеристики, обеспечивающие заданную точность остановки

При $\Delta v = 0$ из (7.57) получим

$$v_0 = -\frac{\Delta t(a_0^2 - \Delta a^2)}{\Delta a} + \sqrt{\left[\frac{\Delta t(a_0^2 - \Delta a^2)}{\Delta a}\right]^2 + \frac{2\Delta S_{\text{доп}}}{\Delta a}(a_0^2 - \Delta a^2)}. \quad (7.58)$$

Из формулы (7.58) следует, что максимальное значение средней скорости при $v_0 = 0$ не зависит от среднего времени срабатывания аппаратуры t_0 . На рисунке 7.9 по формуле (7.58) построен график 1, характеризующий зависимость v_0 при $\Delta v = 0$ от относительного отклонения ускорения $\Delta a / a_0$ при $\Delta t = 0,0375$ с (все остальные параметры соответствуют величинам, принятым при построении характеристик на рисунке 7.7). Эта характеристика и выражение (7.58) позволяют дать количественную оценку уменьшения максимального значения v_0 с увеличением разброса ускорений.

Увеличить максимальное значение средней скорости можно уменьшением отклонения времени срабатывания аппаратуры Δt . Предельное значение v_0 , которое может быть достигнуто при этом, определяется выражением, которое получается из (7.58) при $\Delta t = 0$,

$$v_0 = \sqrt{\frac{2\Delta S_{\text{доп}}}{\Delta a}(a_0^2 - \Delta a^2)}. \quad (7.59)$$

По формуле (7.59) построена характеристика 2 на рисунке 7.9.

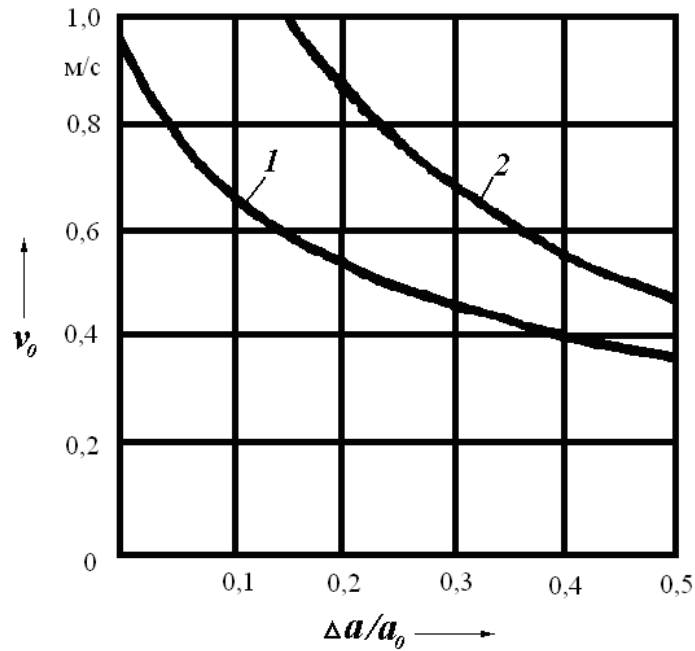


Рисунок 7.9 – Зависимость максимального значения v_0 от относительного отклонения ускорения при $\Delta v = 0$

Из семейства характеристик, приведенных на рисунке 7.8, следует выбирать такую характеристику, которая более просто и удобно может быть реализована в принятой системе электропривода. После расчёта параметров электропривода, уточнения его механической характеристики и всех переменных величин, определяющих неточность остановки, необходимо проверить полученную точность остановки по формуле (7.38) и найти средний путь торможения по формуле (7.35), характеризующий требуемое расстояние от места установки датчика точной остановки ДТО до уровня точной остановки.

При расчётах следует учитывать, что на точность остановки может оказывать влияние неточность срабатывания датчика точной остановки $\Delta S_{ДТО}$ и удлинение каната Δl_K при изменении загрузки кабины от $G_T = G_H$ (при большой высоте подъёма). При этих условиях в расчётах точной остановки необходимо использовать расчётную допустимую неточность остановки:

$$\Delta S_{доп} = \Delta S_{доп.н} - \Delta S_{дто} - \Delta l_K / 2, \quad (7.60)$$

где $\Delta S_{доп.н}$ – максимальная допустимая фактическая неточность остановки, требуемая по нормам для данного лифта.

Приведенный выше анализ показывает, что допустимая по условиям точности остановки средняя скорость v_0 , с которой кабина подходит к датчику точной остановки, меньше установившейся скорости движения $v_{уст}$ большинства лифтов. Обычно только для тихоходных лифтов при установившейся скорости $v_{уст} \leq 0,5$ м/с требуемая точность остановки может быть обеспечена непосредственно переходом от установившейся скорости к режиму торможения отключением двигателя от сети и наложением механического тормоза. При больших значениях установившейся скорости для получения требуемой

точности остановки необходимо при подходе к ДТО обеспечить замедление кабины до скорости v_0 , определяемой из вышеприведенных зависимостей.

Тогда требуемый диапазон регулирования скорости электропривода, необходимый для получения заданной точности остановки, определяется по формуле

$$D = \frac{v_{уст}}{v_0}. \quad (7.61)$$

Диаграмма движения кабины лифта за счёт введения участка движения с пониженной скоростью v_0 имеет вид, представленный на рисунке 7.10.

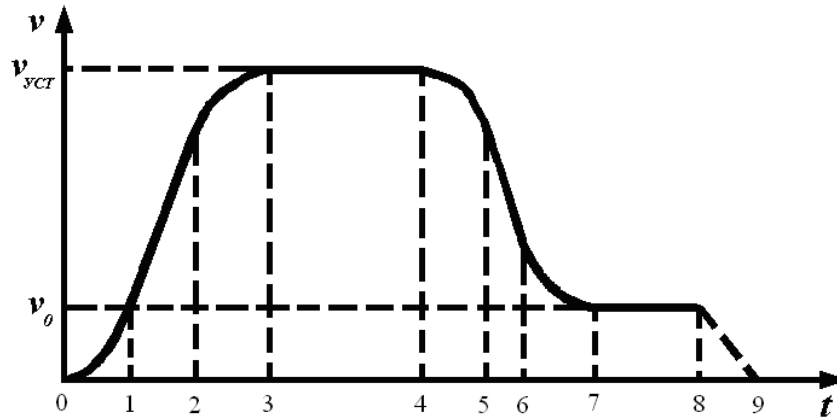


Рисунок 7.10 – Диаграмма движения кабины лифта со снижением скорости перед остановкой

На участках [4–5], [5–6], [6–7] происходит снижение скорости движения кабины с установившегося значения $v_{уст}$ до величины v_0 . При этом длительность замедления кабины $t_{зам}$ и путь кабины за это время $S_{зам}$ определяются выражениями

$$t_{зам} = \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 = \frac{v_{уст} - v_0}{a_{доп}} + \frac{a_{доп}}{\rho_{доп}}; \quad (7.62)$$

$$S_{зам} = \Delta S_5 + \Delta S_6 + \Delta S_7 = \frac{v_{уст} - v_0}{2} \left(\frac{v_{уст} - v_0}{a_{доп}} + \frac{a_{доп}}{\rho_{доп}} \right). \quad (7.63)$$

На участке [7–8] происходит движение кабины лифта со скоростью v_0 до момента срабатывания аппаратуры и наложения тормоза, а на участке [8–9] – остановка кабины.

Полное минимальное время торможения от момента начала замедления

$$\sum t_{ТОР} = t_{зам} + \Delta t_8 + \Delta t_9 = \frac{v_{уст} - v_0}{a_{доп}} + \frac{a_{доп}}{\rho_{доп}} + t_0 + \frac{v_0}{a_0}. \quad (7.64)$$

Полный минимальный путь торможения, который определяет минимальное расстояние ДТО от уровня остановки кабины,

$$\sum S_{TOP} = S_{ЗАМ} + \Delta S_8 + \Delta S_9 = \frac{v_{уст} - v_0}{2} \left(\frac{v_{уст} - v_0}{a_{доп}} + \frac{a_{доп}}{\rho_{доп}} \right) + S_0. \quad (7.65)$$

Как видно из выражений (7.64), (7.65), введение этапа движения с пониженной скоростью увеличивает путь и время торможения по сравнению с оптимальной диаграммой движения кабины лифта. Это уменьшает производительность, но в то же время обеспечивает возможность выполнения требований точности остановки кабины и при сравнительно простых системах электроприводов.

Рассмотренная методика расчёта точной остановки на примере лифтовой установки может быть использована и для расчёта точности остановки рабочего органа кранового механизма, одноковшового экскаватора.

Определив среднее значение скорости v_0 и её максимальное отклонение Δv по формуле (7.37), построить механические характеристики электропривода, при которых обеспечивается заданная точность остановки.

Обосновать выбор оптимальной механической характеристики.

Выполнив расчёты по формулам (7.62)–(7.65), построить диаграмму движения кабины лифта со снижением скорости перед остановкой. Примерный вид диаграммы движения кабины лифта со снижением скорости перед остановкой представлен на рисунке 7.10. Построить характеристику дотягивания, обеспечивающую заданную точность остановки. Примерный вид схемы движения кабины лифта в режиме остановки приведен на рисунке 7.2.

Далее следует выполнить анализ полученных результатов, оценить расчётные параметры режима точной остановки. Сделать вывод. Предложить возможные варианты систем электропривода, обеспечивающие точную остановку кабины лифта.

Выбрать оптимальный вариант системы электропривода быстроходного лифта, используя методику экспертных оценок [7].

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

8.1 Постановка задачи

Рассчитать мощность и произвести выбор электродвигателя механизма подъёма пассажирского лифта. Данные для расчётов следует выбирать из таблиц 8.1 и 8.2. Номер варианта соответствует номеру студента в списке группы по журналу.

Таблица 8.1 – Исходные данные для расчётов

Параметр	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 ²	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 ³	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 γ	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0

Таблица 8.2 – Исходные данные для расчётов

Параметр	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 α	0,45	0,45	0,45	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,55	0,55
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

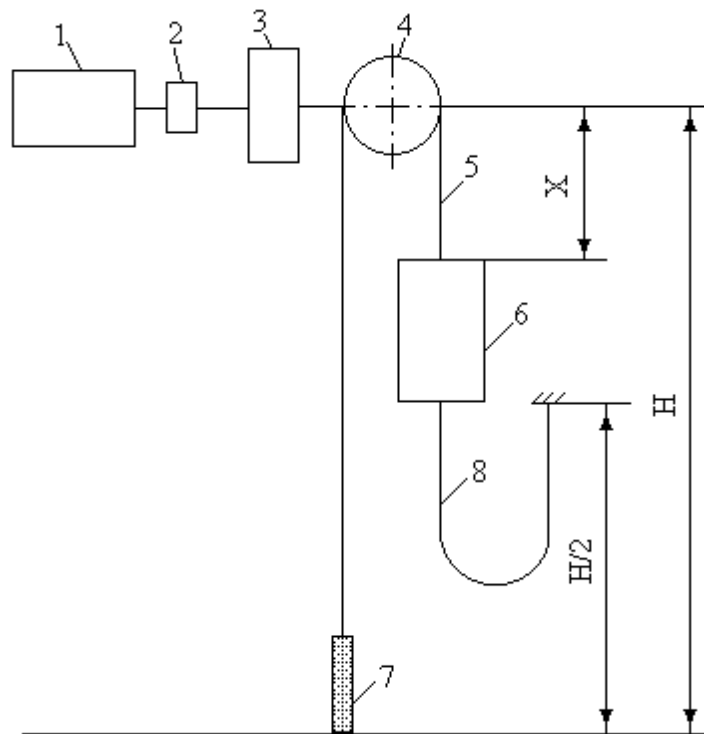
В расчётной части должно быть отражено следующее:

- 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.

8.2 Рекомендации к выполнению расчётов

Большинство современных пассажирских лифтов жилых и административных зданий выполняется с противовесом. Кинематическая схема лифта представлена на рисунке 8.1. Рекомендации к выполнению расчётов приводятся согласно [5].



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

Рисунок 8.1 – Кинематическая схема лифта

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

$$G_{np} = G_{каб} + \alpha G_{ном}, \quad (8.1)$$

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

$G_{каб}$ – сила тяжести кабины, Н;

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

α – 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

$$F_2 = G_{каб} + G_2 - G_{np}, \quad (8.2)$$

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 (8.1) в (8.2) может быть определено следующим образом:

$$F_2 = G_2 - \alpha G_{ном}. \quad (8.3)$$

График зависимости усилия на канатопроводящем шкиве от силы тяжести поднимаемого груза при $\alpha = 0,5$ приведен на рисунке 8.2.

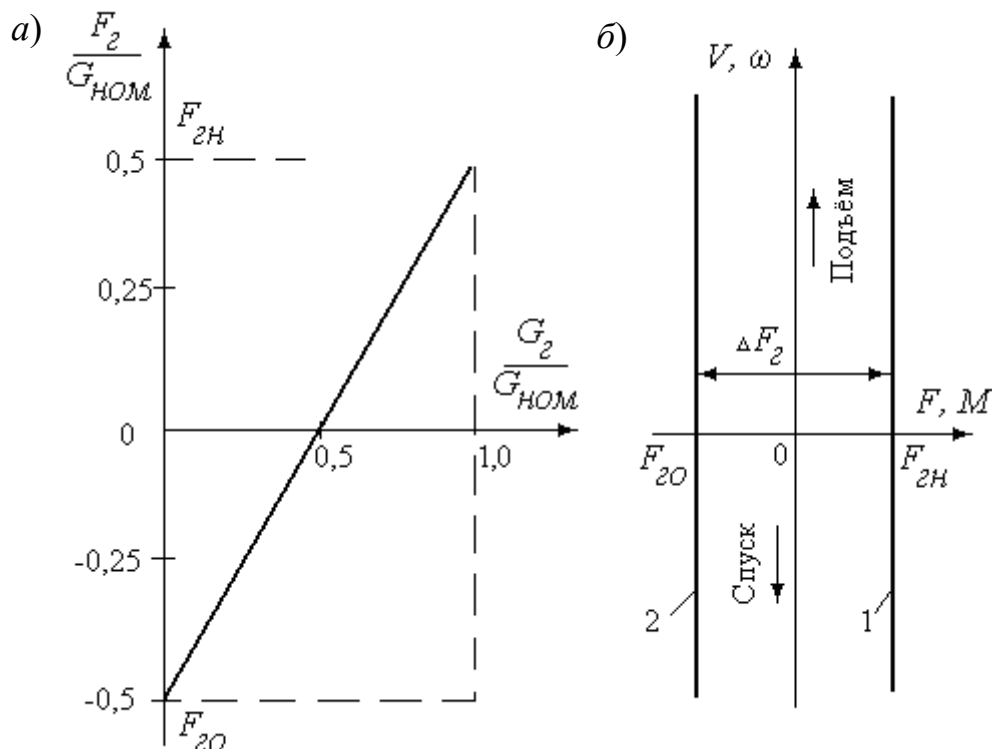


Рисунок 8.2 – Зависимость усилия на канатопроводящем шкиве от загрузки кабины

Из рисунка 8.2 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 $G_2 = \alpha G_{ном}$. Тогда усилие нагрузки на канатоведущем шкиве изменяется от максимального положительного (при $\alpha = 0,5$; $F_{2н} = F_{ш\max} = 0,5G_{ном}$) до максимального отрицательного, соответствующего нулевой загрузке кабины (при $\alpha = 0,5$; $F_{2о} = -F_{ш\max} = -0,5G_{ном}$), определяемых из выражения (8.3).

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

$$M = \frac{FD}{2i}; \quad \omega = \frac{2V \cdot i}{D}, \quad (8.4)$$

где D – диаметр канатоведущего шкива, м;

i – передаточное число редуктора;

M – момент на валу двигателя, Н·м;

F – линейное усилие, Н;

ω – 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 8.2, б приведены в координатах F, V (или M, ω) 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 $F_{2о} = -\alpha G_{ном}$ до $F_{2н} = G_{ном} (1 - \alpha)$.

При загрузке кабины $G_2 = \alpha G_{ном}$ усилие на канатоведущем шкиве равно 0 и соответствующая этой загрузке характеристика в координатах (F, V) совпадает с осью ординат. Величина и знак усилия F_2 и момента нагрузки M_2 почти не зависят от направления движения кабины и её скорости. В случае номинальной загрузки кабины (характеристика 1) положительное усилие на шкиве $F_{2н}$ 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 $F_{2о}$ 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 8.1) изменение длины подъёмного каната создаёт дополнительное усилие F_k , величина которого определяется из выражения

$$F_k = g_k (l_{кк} - l_{кпр}), \quad (8.5)$$

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 8.3 представлена 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 8.3, 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 8.3, б определяют пределы изменения усилия F_k .

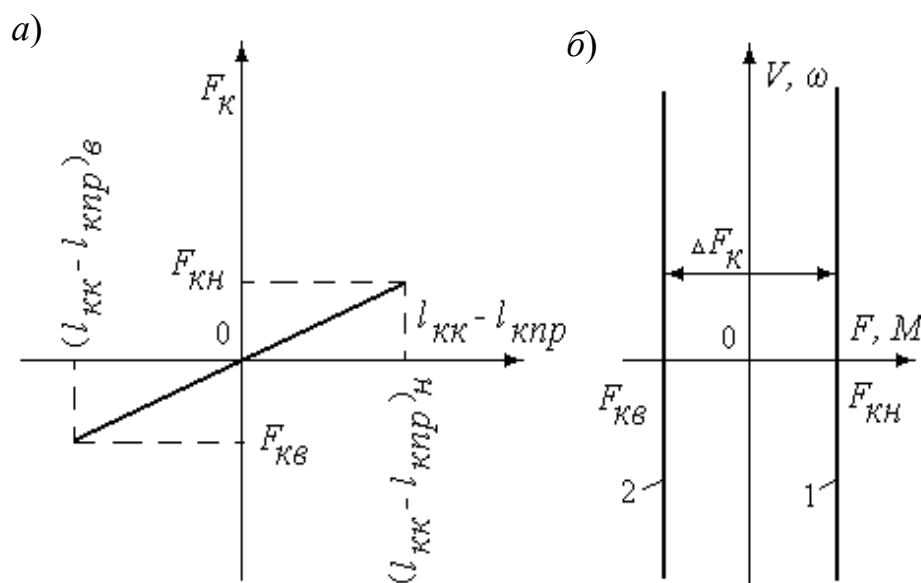


Рисунок 8.3 – Зависимость усилия нагрузки, создаваемого весом подъёмного каната, от разности длин подъёмного каната со стороны кабины и со стороны противовеса

Влияние этого усилия на работу электропривода аналогично влиянию усилия F_z , 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 $F_{мпв}$ пропорциональна скорости движения V .

$$F_{мпв} = K_{мпв} V, \quad (8.6)$$

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

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

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

$$F_{мпс} = \begin{cases} F_{\delta} - F_{\varepsilon} & \text{при } |F_{\delta} - F_{\varepsilon}| \leq F_{мп.о}; V = 0; \\ F_{мп.о} \cdot \text{sign}(F_{\delta} - F_{\varepsilon}) & \text{при } |F_{\delta} - F_{\varepsilon}| > F_{мп.о}; V = 0; \\ F_{мп.о} \cdot \text{sign} V & \text{при } V \neq 0, \end{cases} \quad (8.7)$$

где F_{δ} – приведенная к направлению движения кабины сила двигателя, Н;

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

На рисунке 8.4 приведены силы сухого трения. График на рисунке 8.4, а характеризует зависимость сил сухого трения при неподвижной кабине ($V = 0$) от величины действующих на кабину сил $F_{\delta} - F_{\varepsilon}$ (при отсутствии компенсирующего каната здесь необходимо учесть также усилие F_k). Если сумма внешних действующих сил ($F_{\delta} - F_{\varepsilon}$) меньше максимальной величины силы трения $F_{мп.о}$, то сила трения равна действующей силе (первая строчка в выражении (8.7)). При превышении суммы действующих сил максимальной величины сил трения последняя ограничивается максимальной величиной (вторая строчка выражения (8.7)).

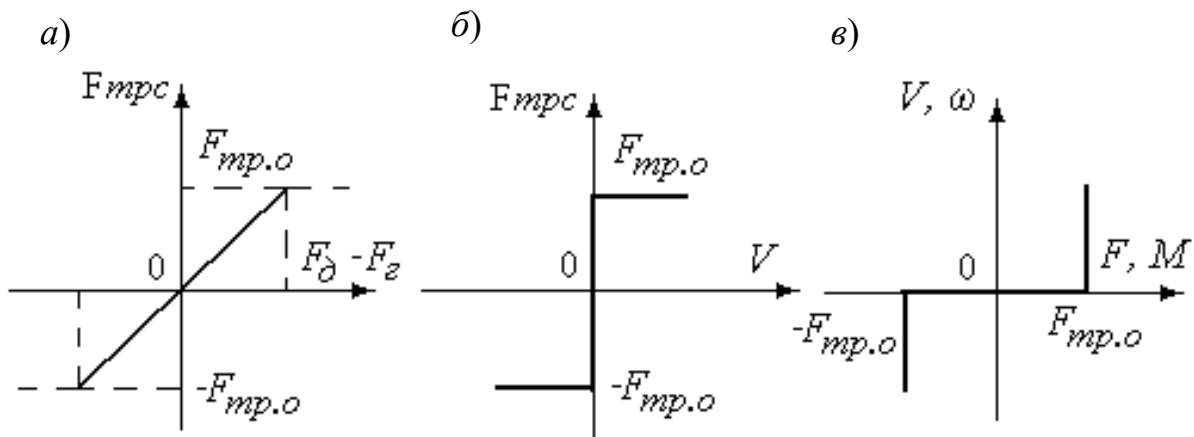


Рисунок 8.4 – Силы сухого трения

После начала движения кабины ($V \neq 0$) величина сухого трения определяется третьей строчкой выражения (8.7). При этом величина сухого трения остаётся практически постоянной (см. рисунок 8.4, б), а знак силы соответствует знаку скорости.

Изображение характеристики сухого трения в координатах (F, V) на рисунке 8.4, в показывает, что сила сухого трения создаёт тормозной момент независимо от направления движения, при этом сила трения противодействует разгону двигателя и помогает его торможению.

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

$$F_{ред} = K_{ред} \left| m \frac{dV}{dt} + (F_z + F_{mp}) \right| \text{sign} V, \quad (8.8)$$

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 ($m \frac{dV}{dt}$) 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 8.5.

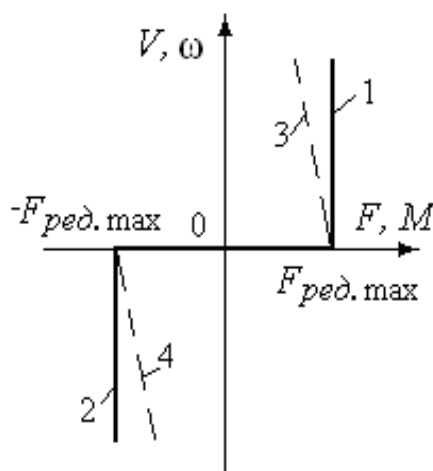


Рисунок 8.5 – Силы потерь в редукторе

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 8.5. Кроме того, при применении червячного редуктора коэффициент потерь и соответствующие ему силы потерь в редукторе различны и зависят от направления передачи энергии.

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 8.2, 8.4 и 8.5:

$$F_c = F_z + F_{трс} + F_{ред} . \quad (8.9)$$

При номинальной загрузке кабины $G_z = G_{ном}$, при которой усилие нагрузки от перемещаемых грузов $F_z = F_{zn}$ (см. рисунок 8.2, б), статическая сила сопротивления характеризуется графиками 1 и 2 на рисунке 8.6, а при нулевой загрузке кабины $G_z = 0$, при которой усилие нагрузки от перемещаемых грузов $F_z = F_{zo}$ (см. рисунок 8.2, б), статическая сила сопротивления характеризуется графиками 3 и 4 на рисунке 8.6, 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 ($G_k + G_z = G_{np}$), при котором $F_z = 0$, статическая сила сопротивления определяется только величинами сил трения и потерь в редукторе (см. рисунок 8.6, 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.

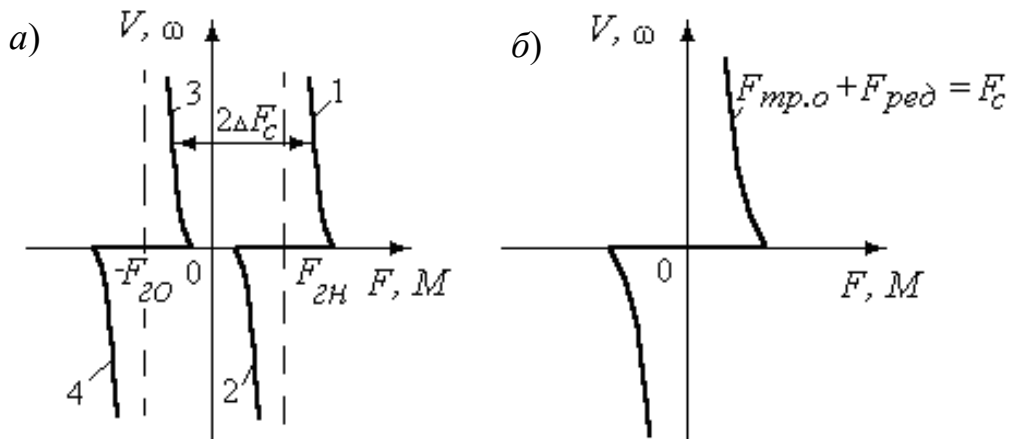


Рисунок 8.6 – Суммарная статическая сила сопротивления F_c с учётом сил сухого трения и сил потерь в редукторе при номинальной и нулевой загрузке кабины (а) и при загрузке кабины, соответствующей уравновешенной системе лифта $F_z = 0$ (б)

При номинальной нагрузке кабины (см. рисунок 8.6, *a*, графики 1 и 2) и при нулевой загрузке кабины (см. рисунок 8.6, *a*, 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 8.6, *a*, график 1) и движущей при спуске кабины (см. рисунок 8.6, *a*, график 2). При нулевой загрузке кабины ($F_z = F_{zo}$), наоборот, статическая сила сопротивления является движущей при подъёме кабины (см. рисунок 8.6, *a*, график 3) и тормозящей при спуске кабины (см. рисунок 8.6, *a*, график 4).

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 η .

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 8.6, *a*, график 1) и определяется из выражения

$$\left. \begin{aligned} F_{c1} = F_{zn} + F_{nom} &= \frac{F_{zn}}{\eta} = \frac{G_k + G_{ном} - G_{np}}{\eta} = \frac{(1-\alpha)G_{ном}}{\eta}; \\ M_{c1} = M_{zn} + M_{nom} &= \frac{F_c D}{2i} = \frac{F_{zn} D}{2i\eta} = \frac{(1-\alpha)G_{ном} D}{2i\eta}. \end{aligned} \right\} \quad (8.10)$$

Аналогично могут быть определены статическая сила и статический момент нагрузки электродвигателя при спуске пустой кабины, при котором $|F_c| > |F_{zo}|$ (см. рисунок 8.6, *a*, график 4):

$$\left. \begin{aligned} F'_{c2} = |F_{zo}| - |F_{nom}| &= \frac{F_{zo}}{\eta} = \frac{G_k - G_{np}}{\eta} = \frac{-\alpha G_{ном}}{\eta}; \\ M'_{c2} = -|M_{zo}| - |M_{nom}| &= \frac{F_c D}{2i} = \frac{F_{zo} D}{2i\eta} = \frac{(G_k - G_{np})D}{2i\eta} = \frac{-\alpha G_{ном} D}{2i\eta}. \end{aligned} \right\} \quad (8.11)$$

При подъёме пустой кабины (см. рисунок 8.6, *a*, график 3) и спуске гружёной кабины (см. рисунок 8.6, *a*, 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

$$\left. \begin{aligned} F_{c2} &= -|F_{z0}| - |F_{nom}| = F_{z0}\eta = (G_k - G_{np})\eta = -\alpha G_{ном}\eta; \\ M_{c2} &= -|M_{z0}| - |M_{nom}| = \frac{F_c D}{2i} = \frac{F_{z0} D \eta}{2i} = \frac{-\alpha G_{ном} D \eta}{2i}. \end{aligned} \right\} \quad (8.12)$$

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

$$\left. \begin{aligned} F'_{c1} &= F_{zn} - |F_{nom}| = F_{zn}\eta = (G_k + G_{ном} - G_{np})\eta = (1 - \alpha)G_{ном}\eta; \\ M'_{c1} &= M_{zn} - |M_{nom}| = \frac{F_c D}{2i} = \frac{F_{zn} D \eta}{2i} = \frac{(1 - \alpha)G_{ном} D \eta}{2i}. \end{aligned} \right\} \quad (8.13)$$

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,

$$F_c = F_z + F_{mpc} = F_z + F_{mp.o}. \quad (8.14)$$

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

$$F_c = \frac{F_z}{\eta_1}. \quad (8.15)$$

Тогда из зависимостей (8.14) и (8.15) получаем

$$\eta_1 = \frac{F_z}{F_c} = \frac{F_z}{F_z + F_{mp.o}} = \frac{1}{1 + \frac{F_{mp.o}}{F_z}}. \quad (8.16)$$

На рисунке 8.7 приведена построенная по выражению (4.16) зависимость I , характеризующая изменение КПД механической передачи и функции внешних сил активной нагрузки, снижение которой уменьшает КПД передачи.

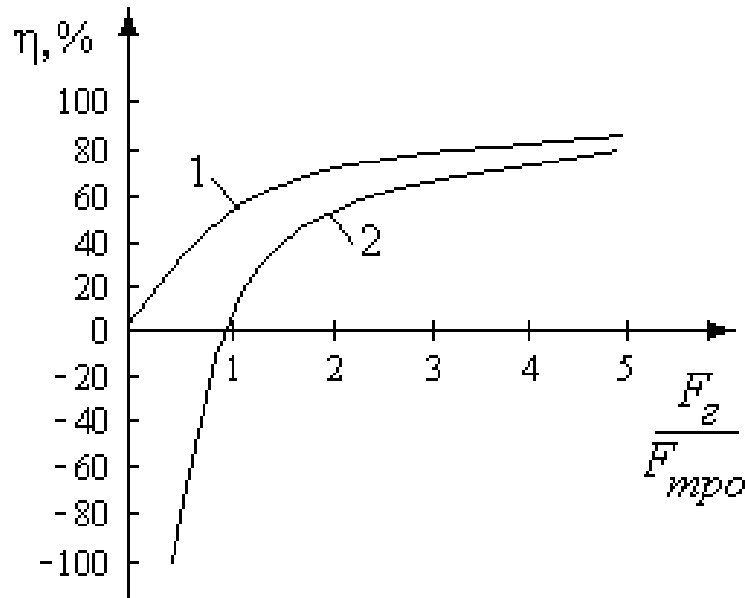


Рисунок 8.7 – Зависимость КПД механической передачи от сил внешней нагрузки при постоянной силе потерь

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

$$F_c = F_2 - F_{тр.с} = F_2 - F_{тр.о} . \quad (8.17)$$

Статическая сила в этих режимах определяется из формулы

$$F_c = F_2 \cdot \eta_2 . \quad (8.18)$$

Тогда из формул (8.17) и (8.18) получаем

$$\eta_2 = \frac{F_c}{F_2} = \frac{F_2 - F_{тр.о}}{F_2} = 1 - \frac{F_{тр.о}}{F_2} . \quad (8.19)$$

По формуле (8.19) на рисунке 8.7 построена зависимость 2. Из (8.16) и (8.19) можно найти связь между значениями КПД η_1 и η_2 :

$$\eta_1 = \frac{1}{2 - \eta_2} ; \quad \eta_2 = 2 - \frac{1}{\eta_1} . \quad (8.20)$$

Хотя выражения (8.20) 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 (8.10)–(8.13), в которых КПД стоит в знаменателе. Это соответствует тормозному моменту нагрузки (см. рисунок 8.6, 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 8.6, 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 8.8.

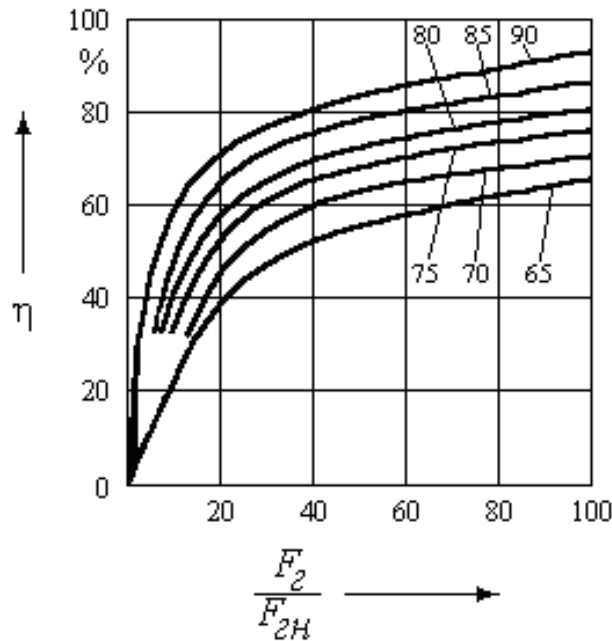


Рисунок 8.8 – Зависимость КПД механизма от нагрузки

Из этих кривых определяется величина η_1 для случая тормозных моментов нагрузки, а величина η_2 для движущих моментов нагрузки может быть определена по формуле (8.20).

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

$$\eta_1 = \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\operatorname{tg}(\lambda + \varphi)}, \quad (8.21)$$

а при обратной передаче энергии КПД определяется по формуле

$$\eta_2 = \frac{\operatorname{tg}(\lambda - \varphi)}{\operatorname{tg} \lambda}, \quad (8.22)$$

где λ – угол подъема винтовой линии на делительном цилиндре червяка;

φ – угол трения, зависит от скорости вращения вала червяка.

На рисунке 8.9 приведены построенные по (8.21) и (8.22) графики 1 и 2, характеризующие изменение КПД червячного редуктора пассажирского лифта грузоподъемностью 500 кг, скоростью движения 1,0 м/с.

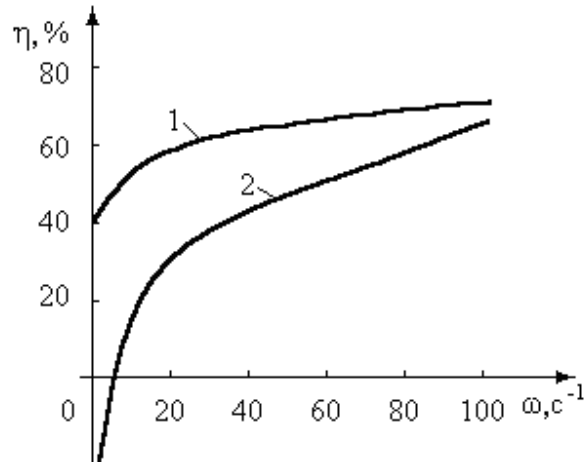


Рисунок 8.9 – КПД червячного редуктора при прямой (1) и обратной (2) передаче энергии

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 8.3) и по результатам расчётов построить зависимость статического момента электропривода от загрузки кабины лифта.

Таблица 8.3 – Форма таблицы расчёта сил и моментов нагрузки

X , м	F_c , Н	M_c , Н·м				$M_c = 0$ при G , Н
		при подъёме		при спуске		
		$G = 0$	$G = G_{ном}$	$G = 0$	$G = G_{ном}$	
0						
0,5 Н						
Н						

Для определения мощности двигателя необходимо знать кинематическую схему, заданные допустимые скорости, ускорения, грузоподъемность, 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.

Расчёт статических нагрузок двухконцевой лебёдки (см. рисунок 8.1) в цикле выполняется согласно [1].

Большинство пассажирских лифтов загружаются полностью только в часы пик, а в остальное время работают с уменьшенной нагрузкой. В этом случае коэффициент уравнивания α 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

$$G_{пр} = G_{каб} + \alpha G_{ном} + 0,5G_{ук}, \quad (8.23)$$

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 8.4.

Таблица 8.4 – 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 8.10.

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.

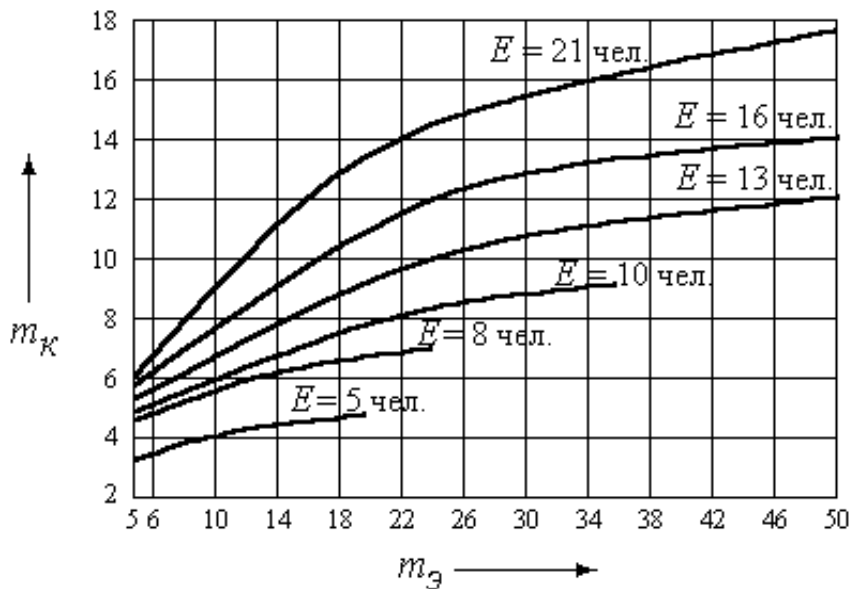
Методика выбора мощности двигателя при равномерном грузопотоке сводится к следующему.

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 8.10. Изменение массы груза с кабиной ΔG_1 на каждой остановке принимается равномерным и рассчитывается по формуле

$$\Delta G_1 = \frac{G_{ном}}{m_k}, \quad (8.24)$$

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

m_k – число предполагаемых остановок.



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

Рисунок 8.10 – Кривые для определения числа вероятных остановок лифта

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

$$F = (G_{ном} + G_{каб} + G_{кан} + G_k - G_{пр})g, \quad (8.25)$$

а на предполагаемых остановках выше первого этажа по формуле

$$F = (G_{ном} + G_{каб} + g_{пк} X + G_k - k_1 \Delta G_1)g - [G_{пр} + g_{пк} (H - X)]g, \quad (8.26)$$

где k_1 – номер предполагаемой остановки;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

G_k – вес подвесного кабеля, кг;

$g_{пк}$ – вес одного метра подъёмного каната, кг/м;

H, X – высота подъёма (см. рисунок 8.1), м.

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

$$M = \frac{F}{i\eta} \cdot \frac{D}{2} \quad \text{при } F > 0; \quad (8.27)$$

$$M = \frac{F}{i} \cdot \frac{D}{2} \eta \quad \text{при } F < 0. \quad (8.28)$$

3 Для движения кабины вверх и вниз по таблице 8.3 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

$$t'_1 = t_1 (m_k + 1), \quad (8.29)$$

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

$$t_2 = \frac{h(m_{\text{э}} - 1) - S_1}{Vm_k}, \quad (8.30)$$

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

$$S_1 = \frac{Vt_1 m_k}{2}. \quad (8.31)$$

Время равномерного движения кабины вверх определяется по формуле

$$t'_2 = t_2 m_k. \quad (8.32)$$

Время равномерного движения кабины вниз рассчитывается по формуле

$$t_3 = \frac{h(m_{\text{э}} - 1) - S_2}{V}, \quad (8.33)$$

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

$$S_2 = \frac{Vt_1}{2}. \quad (8.34)$$

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

$$\Sigma t_1 = t'_1 + t'_2 + t_3 . \quad (8.35)$$

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

$$t'_4 = t_4 (m_k + 1), \quad (8.36)$$

где t_4 – время открытия и закрытия дверей с автоматическим приводом (значения указаны в таблице 8.4).

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:

$$t'_5 = 2t_5 E . \quad (8.37)$$

Время остановок кабины за полный рейс рассчитывается по формуле

$$\Sigma t_2 = t'_4 + t'_5 . \quad (8.38)$$

С учётом дополнительного времени время полного рейса кабины

$$T = (\Sigma t_1 + \Sigma t_2) + 0,1(\Sigma t_1 + \Sigma t_2). \quad (8.39)$$

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 **Шишов, О. В.** Технические средства автоматизации и управления: учебное пособие / О. В. Шишов. – Москва: ИНФРА-М, 2018. – 396 с.

2 **Иванов, А. А.** Автоматизация технологических процессов и производств: учебное пособие / А. А. Иванов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2018. – 224 с.

3 **Иванов, А. А.** Модернизация промышленных предприятий на базе современных систем автоматизации и управления: учебное пособие / А. А. Иванов. – Москва: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2019. – 384 с.

4 **Васильев, Б. Ю.** Электропривод. Энергетика электропривода : учебник / Б. Ю. Васильев. – Москва: СОЛОН-Пресс, 2017. – 268 с.

5 Электропривод типовых производственных механизмов: учебное пособие / Ю. Н. Дементьев [и др.]. – Москва : Юрайт, 2018. – 403 с.

6 **Никитенко, Г. В.** Электропривод производственных механизмов: учебное пособие / Г. В. Никитенко. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург; Москва; Краснодар : Лань, 2022. – 224 с.