

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



УТВЕРЖДАЮ  
Директор Морского колледжа

М.М. Майстришин

14 января 2026 г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ**

**ОП.06 Электрические машины и электропривод**

специальность

13.02.13

Эксплуатация и обслуживание электрического и  
электромеханического оборудования (по отраслям)

уровень среднего профессио-  
нального образования

Специалист среднего звена

квалификация

Техник

Год приема

2026

Севастополь  
2026

## 1 Общие вопросы курсового проекта (выполнения практических работ)

### 1.1 Подготовительная работа

Грузоподъемные механизмы (ГПМ) общего назначения на современных судах широко применяются для переработки различных грузов. Наибольшее распространение получили грузовые лебедки и краны.

По исполнению механической части грузовые лебедки и механизмы подъема крана могут иметь червячный или цилиндрический редуктор. Наибольшее распространение получили грузовые устройства с цилиндрическим редуктором, который по сравнению с червячным обеспечивает более высокий КПД механизма.

В данном курсовом проекте рассчитывается электрический привод грузоподъемного устройства на переменном токе.

Прежде чем начать работу по проектированию необходимо повторить соответствующие разделы электропривода, теории электропривода в части расчета мощности, выбора и проверке электродвигателей, электрических машин и аппаратуры управления.

Обучающийся должен ознакомиться с кинематической схемой грузоподъемного механизма. Знакомство можно провести по приведенным ниже литературным источникам и во время прохождения практики.

Курсовой проект рассчитан на (80...100) часов самостоятельной работы.

Тематику курсовых работ устанавливает цикловая комиссия электромеханических дисциплин.

### 1.2 План выполнения курсового проекта (выполнения практических работ)

Курсовой проект рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

- на основании заданного варианта выбрать из Регистровой книги судно-прототип и подготовить исходные данные;
- на основании исходных данных рассчитать моменты на валу двигателя при спуске и подъеме номинального груза и выбрать предварительно соответствующий электродвигатель;

- рассчитать и построить механические и электромеханические характеристики выбранного двигателя;
- рассчитать моменты, токи и время работы двигателя на отдельных этапах работы ГПМ и построить нагрузочные диаграммы;
- проверить выбранный электродвигатель на обеспечение заданной производительности ГПМ;
- проверить двигатель на нагрев.

### 1.3 Оформление курсового проекта

Курсовой проект должен состоять из пояснительной записки объемом (35...45) страниц формата А4 и двух листов графического материала.

Пояснительная записка к курсовому проекту должна включать в себя в указанной ниже последовательности следующие структурные элементы:

- титульный лист;
- задание на курсовой проект;
- содержание;
- основную часть;
- список литературы;
- приложения.

Оформление проекта должно соответствовать требованиям ГОСТ 2.105 ЕСКД, методических указаний по выполнению курсовых и дипломных проектов и требованиям настоящих методических указаний.

Текст пояснительной записки выполняется на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (210×297 мм) по ГОСТ 2.301-68 на формах (электронных шаблонах), установленных соответствующими стандартами Единой системы конструкторской документации (ЕСКД), способом компьютерной верстки.

Основной шрифт – Times New Roman, размером 14 pt, через 1,5 интервала. В таблицах допускается применять размер шрифта меньший, чем в тексте, с одинарным междустрочным интервалом и без абзацного отступа.

Поля документа следует оформлять: левое – 0,94 см., переплет – 1,66 см; пра-

вое – 0,94 см.; верхнее – 1,2 см; нижнее – 3,38 см. Расстояние до верхнего колонтитула – 0,63 см, до нижнего – 2,4 см.

Примечание – Поля в электронных шаблонах текстовых документов, на которых рекомендуется выполнять пояснительную записку отформатированы в соответствии с требованиями ЕСКД.

Абзацы в тексте начинаются отступом, равным 1,25 см – установка по умолчанию в «Microsoft Word».

Для исключения чрезмерно больших пробелов между словами рекомендуется устанавливать автоматическую расстановку переносов при настройке программы Microsoft Word.

Основная часть пояснительной записки должна включать в себя следующие разделы:

1 Общий раздел. Состоит из следующих подразделов:

1.1 Краткая характеристика и тактико-технические характеристики судна

В этом подразделе необходимо описать назначение, особенности устройства и эксплуатации судна-прототипа, для которого проектируется электропривод, привести краткие сведения о судовой электроэнергетической системе судна и основные его тактико-технические характеристики. Тактико-технические данные берутся из Регистровой книги судов.

1.2 Назначение, классификация и устройство проектируемого электропривода

В этом подразделе необходимо указать назначение, условия эксплуатации и основные элементы проектируемого электропривода.

1.3 Требования нормативных документов и Правил Регистра к проектируемому электроприводу

Обучающиеся должны изучить Правила Морского Регистра, других нормативных документов (ГОСТов) в отношении проектируемого электропривода.

1.4 Выбор и обоснование основных параметров электропривода

На основании подраздела 1.3 необходимо обосновать выбор рода тока, типа электродвигателя и т.п.

2 Расчетный раздел

На основании проведенных расчётов необходимо выбрать электродвигатель и проверить его на выполнение требований ГОСТов и Правил Регистра.

### 3 Технологический раздел

В этом разделе дается обоснование выбора электрической принципиальной схемы (Э3) и описывается ее работа. В соответствии с заданием на курсовой проект в раздел также могут включаться вопросы выбора питающего кабеля, коммутационной и защитной аппаратуры и т.п., а также вопросы технической эксплуатации устройства, техники безопасности, охраны окружающей среды и т.п.

В пояснительной записке приводится список использованной литературы и прилагаются необходимые приложения.

Графическая часть курсового проекта выполняется на двух листах:

Лист 1 – Электропривод устройства. Чертеж общего вида. Формат А1;

Лист 2 – Электропривод устройства. Схема электрическая принципиальная. Формат А1.

Схема должна включать Перечень элементов. Если поле чертежа не позволяет разместить его на листе графической части, то допускается выполнить его отдельным документом и поместить в приложении к пояснительной записке.

## 2 Расчетный раздел

### 2.1 Предварительный выбор электродвигателя

При выборе электродвигателя исходят из следующих соображений.

Высокая производительность грузоподъемных устройств достигается применением ЭД с большим диапазоном изменения скоростей и уменьшенным временем переходных процессов при пусках и торможениях. Сокращение пускового времени достигается благодаря увеличенным пусковым моментам, уменьшению моментов инерции и использованию ЭД со сравнительно небольшой частотой вращения. В ЭП переменного тока повышенный пусковой момент обеспечивается применением АД с повышенным скольжением серии МАП для повторно-кратковременного режима работы.

Предварительный выбор двигателя производят в следующем порядке.

На основании заданных параметров механизма (таблица 1) определяют статическую мощность подъема номинального груза, по которой производят предварительный выбор исполнительного двигателя.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

| Наименование параметров                                    | Значения |
|------------------------------------------------------------|----------|
| 1. Номинальная грузоподъемность, $m_n$ , т                 |          |
| 2. Масса холостого гака, $m_0$ , кг                        |          |
| 3. Расчетный диаметр грузового барабана, $D_6$ , м         |          |
| 4. Передаточное число, $i$                                 |          |
| 5. КПД лебедки при работе с номинальным грузом, $\eta$ , % |          |
| 6. Скорость подъема номинального груза, $v$ , м/мин        |          |
| 7. Скорость посадочная, $v_{\text{пос}}$ , м/мин           |          |
| 8. Высота подъема груза, $h$ , м                           |          |
| 9 Число циклов в час, $Z$                                  |          |
| 10. Напряжение судовой сети, $U$ , В                       |          |

2.1.1 Момент на валу электродвигателя при подъеме номинального груза

$M_{\text{ист}}$ , Нм

$$M_{1\text{ст}} = \frac{(G_{\text{н}} + G_0) \cdot D_6}{2 \cdot i \cdot \eta} \quad (1)$$

где  $G_{\text{н}} = 9,81 \cdot m_{\text{н}}$  и  $G_0 = 9,81 \cdot m_0$  – вес номинального груза и вес холостого гака соответственно, Н.

2.1.2 Момент на валу электродвигателя при спуске номинального груза  $M_{2\text{ст}}$ , Нм

$$M_{2\text{ст}} = \frac{(G_{\text{н}} + G_0) \cdot D_6}{2 \cdot i} \cdot \left(2 - \frac{1}{\eta}\right) \quad (2)$$

Спуск груза происходит при тормозном режиме работы ЭД, поэтому знак момента принимают отрицательным.

2.1.3 Скорость вращения электродвигателя на быстроходной обмотке, необходимая для обеспечения заданной скорости подъёма номинального груза,  $\omega$ , рад/с

$$\omega = \frac{v \cdot i}{30 \cdot D_6} \quad (3)$$

или частота вращения,  $n$ , об/мин

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} \quad (4)$$

2.1.4 Скорость вращения двигателя на тихоходной обмотке, необходимая для обеспечения посадочной скорости груза,  $\omega_{\text{пос}}$ , рад/с

$$\omega_{\text{пос}} = \frac{v_{\text{пос}} \cdot i}{30 \cdot D_6} \quad (5)$$

или частота вращения  $n_{\text{пос}}$ , об/мин

$$n_{\text{пос}} = \frac{30 \cdot \omega_{\text{пос}}}{\pi} \quad (6)$$

2.1.5 Мощность двигателя при подъёме номинального груза на быстроходной обмотке,  $P_{1\text{ст}}$ , кВт

$$P_{1\text{ст}} = M_{1\text{ст}} \cdot \omega \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

2.1.6 Мощность двигателя при посадке груза на тихоходной обмотке, , кВт

$$P_{\text{пос}} = M_{2\text{ст}} \cdot \omega_{\text{пос}} \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

На основании полученных данных из [15, §2.7], или из таблиц Приложения А, выбирается электродвигатель для повторно-кратковременного режима серии

МАП (100... 700) и записываются все его параметры:

- тип двигателя;
- число полюсов,  $2p$ ;
- номинальная мощность,  $P_n$ , кВт ;
- напряжение,  $U_n$ , В;
- режим работы (ПВ процент);
- номинальная частота вращения,  $n_n$ , об/мин;
- ток статора номинальный, пусковой и максимальный, А;
- моменты пусковой и максимальный, Нм;
- коэффициент мощности,  $\cos \varphi$ ;
- коэффициент полезного действия,  $\eta_n$ , процент;
- момент инерции,  $J_{дв}$ , кг·м<sup>2</sup>;
- климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69 и степень защиты в со-

ответствии с требованиями ГОСТ 14254-96.

При этом для грузовых лебедок, работающих в напряженном режиме, обычно выбирают двигатели с ПВ = 40 %, а для менее напряженного режима – с ПВ = 25 %.

Данные рекомендуется свести в таблицу.

К выбранному двигателю ГОСТ 12617-78 [5] предъявляет следующие требования:

Номинальный момент двигателя на обмотке максимальной скорости должен быть не менее статического момента при подъеме номинального груза.

Электродвигатель должен развивать на всех обмотках, кроме обмотки наименьшей скорости, расчетный пусковой момент (при номинальном напряжении), равный 1,5 – 2,5 момента, соответствующего номинальному тяговому усилию на барабане лебедки. На обмотке наименьшей скорости расчетный пусковой момент (при номинальном напряжении) должен быть не менее 1,3 номинального момента электродвигателя. Эти условия записываются в виде неравенств

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{н}}} \geq M_{\text{лст}}$$

$$M_{\text{п.выш}} \geq (1,3 \div 2,5) \cdot \frac{M_{\text{лст}}}{\eta}$$

$$M_{\text{п.низш}} \geq 1,3 \cdot M_{\text{н.низш}}$$
(9)

## 2.2 Расчет и построение характеристик выбранного двигателя

Расчёт построение характеристик проводится для высшей и низшей рабочих скоростей электродвигателя. Характеристику для средней скорости трехскоростного двигателя можно не строить, так как она является промежуточной. Расчет проводится в следующей последовательности:

### 2.2.1 Номинальный момент двигателя, $M_{\text{н}}$ , Н

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{н}}}$$
(10)

### 2.2.2 Синхронная частота вращения, $\omega_{\text{с}}$ , рад/с

$$\omega_{\text{с}} = \frac{2\pi f}{p}$$
(11)

$f = 50$  Гц - частота тока,

### 2.2.3 Номинальная частота вращения, $\omega_{\text{н}}$ , рад/с,

$$\omega_{\text{н}} = 0,105 \cdot n_{\text{н}}$$
(12)

### 2.2.4 Номинальное скольжение, $s_{\text{н}}$

$$s_{\text{н}} = \frac{\omega_{\text{с}} - \omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{с}}}$$
(13)

### 2.2.5 Критическое скольжение, $s_{\text{кр}}$

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{н}}(k_m + \sqrt{k_m^2 - 1})$$
(14)

где  $k_m = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}}$  – кратность максимального момента.

### 2.2.6 Ток холостого хода электродвигателя, $I_0$ , А,

$$I_0 = I_{\text{н}}(\sin \varphi - \frac{s_{\text{н}}}{s_{\text{кр}}} \cdot \cos \varphi)$$
(15)

где  $\sin\varphi$  – соответствует номинальному значению  $\cos\varphi$  для соответствующей обмотки.

2.2.7 Задавая значениями скольжения от  $s=0$  до  $s=1$  рассчитывают соответствующие скорости двигателя по принятым значениям,  $\omega$ , рад/с, по зависимостям (16) – (19). Обязательно рассчитываются параметры для номинального и критического скольжений

$$\omega = \omega_c(1 - s) \quad (16)$$

2.2.8 Рассчитывают момент электродвигателя,  $M$ , Н·м, по принятым значениям скольжения,

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}} \quad (17)$$

Для скольжений больше критического расчет ведётся по уточненной формуле Клосса-Чекунова (18)

$$M = \sqrt{M_{\text{н}}^2 + \frac{0,93M_{\max}^2 - M_{\text{н}}^2}{(1 - 1,3s_{\text{кр}})^2}(1 - s)^2} \quad (18)$$

2.2.9 Для принятых значений скольжения рассчитывают ток статора,  $I$ , А,

$$I = \sqrt{\left(I_{\text{н}}^2 - I_0^2\right) \frac{sM}{s_{\text{н}}M_{\text{н}}} + I_0^2} \quad (19)$$

Рассчитанные данные сводятся в таблицу предлагаемой формы (таблица 2)

По данным таблицы 2 строят механическую и электромеханическую характеристики, приведенные в Приложении Б.

Таблица 2 – Данные для построения характеристик электродвигателя

| Скольжение, $s$                                         | Угловая скорость, $\omega$ , рад/с | Частота вращения, $n$ , об/мин | Момент, $M$ , Н·м | Ток, $I$ , А |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------|
| Значения параметров для $2p = \underline{\hspace{2cm}}$ |                                    |                                |                   |              |
| 0,00                                                    |                                    |                                |                   |              |
| 0,05                                                    |                                    |                                |                   |              |
| $s_{\text{н}}$                                          |                                    |                                |                   |              |
| 0,1                                                     |                                    |                                |                   |              |
| 0,2                                                     |                                    |                                |                   |              |
| $s_{\text{кр}}$                                         |                                    |                                |                   |              |
| 0,5                                                     |                                    |                                |                   |              |

| Скольжение, $s$ | Угловая скорость, $\omega$ , рад/с | Частота вращения, $n$ , об/мин | Момент, $M$ , Н·м | Ток, $I$ , А |
|-----------------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------|
| 0,7             |                                    |                                |                   |              |
| и т.д.<br>..... |                                    |                                |                   |              |
| 1,0             |                                    |                                |                   |              |

## 2.3 Построение нагрузочной диаграммы

### 2.3.1 Подъём номинального груза

2.3.1.1 По характеристикам двигателя, построенным для высшей скорости, для рассчитанного в п. 2.1.1 значения статического момента  $M_{\text{лст}}$  определяются соответствующие значения угловой скорости  $\omega_1$ , рад/с, и тока статора,  $I_1$ , А.

2.3.1.2 Приведенный к валу двигателя момент инерции электропривода при подъёме груза,  $J_{\text{пр}}$ , кг м<sup>2</sup>

$$J_{\text{пр}} = kJ_{\text{дв}} + (m_n + m_o) \cdot \left( \frac{v}{60 \cdot \omega_n} \right)^2 \quad (20)$$

где  $k = 1,1 \div 1,3$  – коэффициент, учитывающий инерционность передачи и барабана.

### 2.3.1.3 Динамический момент при разгоне $M_{\text{лдин}}$ , Нм

$$M_{\text{лдин}} = M_{\text{п}} - M_{\text{лст}} \quad (21)$$

### 2.3.1.4 Время разгона, $t_{\text{лп}}$ , с

$$t_{\text{лп}} = J_{\text{пр}} \frac{\omega_1}{M_{\text{лд}}} \quad (22)$$

### 2.3.1.5 Расчетный тормозной момент, $M_{\text{тр.расч}}$ , Н м

$$M_{\text{тр.расч}} = \frac{P_n \cdot \eta_n^2}{\omega_n} \quad (23)$$

### 2.3.1.6 Тормозной момент $M_{\text{т}}$ , Н м

$$M_{\text{т}} = k \cdot M_{\text{тр.п}} \quad (24)$$

где  $k$  – коэффициент запаса, выбирается в пределах 1,5 – 2,0.

### 2.3.1.7 Постоянные потери в электродвигателе, $\Delta P$ , кВт

$$\Delta P = \frac{P_n}{2} \left( \frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \quad (25)$$

2.3.1.8 Тормозной момент, обусловленный постоянными потерями в электродвигателе,  $M_{т.дв}$ , Н м

$$M_{т.дв} = \frac{\Delta P}{\omega_1} \quad (26)$$

2.3.1.9 Суммарный тормозной момент,  $M_{1т}$ , Н м

$$M_{1т} = M_{лст} + M_{т} + M_{т.дв} \quad (27)$$

2.3.1.10 Время остановки поднимаемого груза при отключении электродвигателя  $t_{1т}$ , с

$$t_{1т} = J_{пр} \frac{\omega_1}{M_{1т}} \quad (28)$$

2.3.1.11 Установившаяся скорость при подъёме груза,  $V_1$ , м/мин

$$v_1 = \frac{30 D_6 \omega_1}{i} \quad (29)$$

2.3.1.12 Путь пройденный грузом при разгоне и торможении,  $H_1$ , м

$$h_1 = \frac{v_1}{2} (t_{1п} + t_{1т}) \quad (30)$$

2.3.1.13 Время подъёма груза при установившемся режиме,  $t_{1y,c}$

$$t_{1y} = \frac{h - h_1}{v_1} \quad (31)$$

2.3.2 Тормозной спуск груза

2.3.2.1 Спуск номинального груза производится на низшей скорости. Статический момент, действующий на вал двигателя при подъеме,  $M_{2ст}$ , определен в п. 2.1.2. По характеристикам электродвигателя для низшей скорости определяются соответствующие моменту  $M_{2ст}$  угловая скорость и ток:  $\omega_2$ . рад/с;  $I_2$ , А.

2.3.2.2 Поскольку в пределах допустимых нагрузок механическую характеристику для генераторного и двигательного режимов можно представить одной линией, скорость рекуперативного торможения,  $\omega_2$ , рад/с, можно определить по формуле (32)

$$\omega_2 = 2\omega_{с.м} - \omega_{2м} \quad (32)$$

2.3.2.3 Время разгона двигателя при опускании груза,  $t_{2п}$ , с, с включённым двигателем

$$t_{2п} = J_{пр} \frac{\omega_2}{M_{п} + M_{2ст}} \quad (33)$$

2.3.2.4 Тормозной момент при остановке,  $M_{2т}$ , Н·м

$$M_{2т} = M_{т} + M_{т.дв} - M_{2ст} \quad (34)$$

2.3.2.5 Время остановки опускаемого груза,  $t_{2т}$ , с

$$t_{2т} = J_{пр} \frac{\omega_2}{M_{2т}} \quad (35)$$

2.3.2.6 Скорость опускаемого груза,  $v_2$ , м/мин

$$v_2 = \frac{30 \cdot D_6 \cdot \omega_2}{i} \quad (36)$$

2.3.2.8 Путь, пройденный грузом при разгоне и торможении,  $H_2$ , м

$$h_2 = \frac{v_2}{2} (t_{2п} + t_{2т}) \quad (37)$$

2.3.2.9 Время опускания груза при установившемся режиме  $t_{2у}$ , с

$$t_{2у} = \frac{h - h_2}{v_2} \quad (38)$$

2.3.3 Подъем холостого гака

Подъем холостого гака осуществляется на высшей скорости.

2.3.3.1 Момент на валу электродвигателя при подъёме холостого гака,  $M_{3ст}$ ,

Н·м

$$M_{3ст} = \frac{G_0 \cdot D_6}{2 \cdot i \cdot \eta_0} \quad (39)$$

где  $\eta_0$  – КПД при  $G_0 / G_n = 0,6 / 29,4 = 0,02$ , определяется по [18], или по графику, приведенному на рисунке В.1 Приложения В.

2.3.3.2 По характеристикам двигателя определяются угловая скорость  $\omega_3$ , рад/с, и ток,  $I_3$ , А, соответствующие моменту  $M_{3ст}$ .

2.3.3.3 Приведенный к валу двигательный момент инерции электропривода,  $J_{0пр}$ , кг·м<sup>2</sup>, без груза

$$J_{0пр} = k J_{дв} \quad (40)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий инерционность передачи и барабана, принят

в п. 2.3.1.2.

2.3.3.4 Время разгона при подъёме холостого гака,  $t_{3п}$ , с

$$t_{3п} = J_{0пр} \cdot \frac{\omega_3}{M_{п} - M_{3ст}} \quad (41)$$

2.3.3.5 Тормозной момент при отключении двигателя в конце подъёма гака,  $M_{3т}$ , Н м

$$M_{3т} = M_{3ст} + M_{т} + M_{т.дв} \quad (42)$$

2.3.3.6 Время остановки поднимаемого гака  $t_{3т}$ , с

$$t_{3т} = J_{0пр} \cdot \frac{\omega_3}{M_{3т}} \quad (43)$$

2.3.3.7 Скорость подъёма холостого гака,  $V_3$ , м/мин

$$v_3 = \frac{30 \cdot D_6 \cdot \omega_3}{i} \quad (44)$$

2.3.3.8 Путь, пройденный гаком при разгоне и торможении,  $H_3$ , м

$$h_3 = \frac{v_3}{2} \cdot (t_{3п} + t_{3т}) \quad (45)$$

2.3.3.9 Время установившегося режима при подъёме холостого гака  $t_{3у}$ , с

$$t_{3у} = \frac{h - h_3}{v_3} \quad (46)$$

2.3.4 Силовой пуск холостого гака

Силовой спуск холостого гака производится на высшей скорости.

2.3.4.1 Момент на валу электродвигателя при опускании холостого гака,  $M_{4ст}$ , Н м

$$M_{4ст} = \frac{G_0 \cdot D_6}{2 \cdot i} \cdot \left( 2 - \frac{1}{\eta_0} \right) \quad (47)$$

Как правило, момент на валу при опускании холостого гака получается отрицательным (со знаком «минус»), что свидетельствует о том, что действующего момента недостаточно для преодоления потерь в передаче и груз под действием только этого момента опускаться не будет. Поэтому для опускания груза двигатель должен работать в двигательном режиме с моментом равным  $M_{4ст}$ . На нагрузочной диаграмме этот момент отобразится в положительном направлении.

2.3.4.2 По характеристикам двигателя для высшей скорости определяются угловая скорость и ток, соответствующие моменту  $M_{4ст} : \omega_4 \cdot \text{рад/с}; I_4, \text{А}$ .

2.3.4.3 Время разгона при опускании холостого гака,  $t_{4п}, \text{с}$

$$t_{4п} = J_{0пр} \cdot \frac{\omega_4}{M_{п} - M_{4ст}} \quad (48)$$

2.3.4.4 Тормозной момент при отключении двигателя,  $M_{4т}, \text{Н м}$

$$M_{4т} = M_{4ст} + M_{т} + M_{т.дв} \quad (49)$$

в эту формулу момент  $M_{4ст}$  подставляется с положительным знаком, так как для рассматриваемого режима он является тормозным.

2.3.4.5 Время остановки опускаемого гака,  $t_{4т}, \text{с}$

$$t_{4т} = J_{0пр} \cdot \frac{\omega_4}{M_{4т}} \quad (50)$$

2.3.4.6 Скорость опускания холостого гака,  $V_4, \text{м/мин}$

$$v_4 = \frac{30 \cdot D_6 \cdot \omega_4}{i} \quad (51)$$

2.3.4.7 Путь, пройденный гакom при разгоне и торможении,  $H_4, \text{м}$

$$h_4 = \frac{v_4}{2} (t_{4п} + t_{4т}) \quad (52)$$

2.3.4.8 Время установившегося движения при опускании холостого гака,  $t_{4у}$

, с

$$t_{4у} = \frac{h - h_4}{v_4} \quad (53)$$

Расчетные данные пункта 2.3 сводятся в таблицу 3, предлагаемой формы, пользуясь которой строят нагрузочные диаграммы, рисунки Г.1 и Г.2, Приложение Г.

Таблица 3 - Данные для построения нагрузочной диаграммы

| Режим работы                 | Ток, $I, \text{А}$ |   | Время, $t, \text{с}$ |   | Момент, $M, \text{Нм}$ |  |
|------------------------------|--------------------|---|----------------------|---|------------------------|--|
| 1. Подъем номинального груза | -                  | - | -                    | - | $M_{1ст}$              |  |
| - разгон                     | $I_{п}$            |   | $t_{1п}$             |   | $M_{1п}$               |  |
| - установившийся режим       | $I_1$              |   | $t_{1у}$             |   | -                      |  |
| - торможение                 | -                  | - | $t_{1т}$             |   | $M_{1т}$               |  |

| Режим работы                       | Ток, $I$ , А |   | Время, $t$ , с |   | Момент, $M$ , Нм |   |
|------------------------------------|--------------|---|----------------|---|------------------|---|
| 2. Горизонтальное перемещение      | -            | - | $t_{01}$       |   | -                | - |
| 3. Тормозной спуск груза           | -            | - | -              | - | $M_{2ст}$        |   |
| - разгон                           | $I_{п}$      |   | $t_{2п}$       |   | $M_{2п}$         |   |
| - установившийся режим             | $I_2$        |   | $t_{2у}$       |   | -                | - |
| - торможение                       | -            | - | $t_{2т}$       |   | $M_{2т}$         |   |
| 4. Расстроповка груза              | -            | - | $t_{02}$       |   | -                |   |
| 5. Подъем холостого гака           | -            | - | -              |   | $M_{3ст}$        |   |
| - разгон                           | $I_{п}$      |   | $t_{3п}$       |   | $M_{3п}$         |   |
| - установившийся режим             | $I_3$        |   | $t_{3у}$       |   | -                | - |
| - торможение                       | -            | - | $t_{3т}$       |   | $M_{3т}$         |   |
| 6. Горизонтальное перемещение гака | -            | - | $t_{03}$       |   | -                | - |
| 7. Силовой спуск холостого гака    | -            | - | -              | - | $M_{4ст}$        |   |
| - разгон                           | $I_{п}$      |   | $t_{4п}$       |   | $M_{4п}$         |   |
| - установившийся режим             | $I_4$        |   | $t_{4у}$       |   | -                | - |
| - торможение                       | -            | - | $t_{4т}$       |   | $M_{4т}$         |   |
| 8. Застроповка груза               | -            | - | $t_{04}$       |   | -                | - |

2.4 Проверка электродвигателя на обеспечение заданной производительности лебедки

2.4.1 Полная продолжительность цикла,  $T$ , с

$$T = \sum t_{\text{раб}} + \sum t_0 \quad (54)$$

где  $\sum t_{\text{раб}}$  – рабочее время;  $\sum t_0$  – время, когда лебедка не работает.

$$\sum t_{\text{раб}} = t_{1п} + t_{1у} + t_{2п} + t_{1у} + t_{3п} + t_{3у} + t_{4п} + t_{4у}$$

$$\sum t_0 = t_{1т} + t_{01} + t_{2т} + t_{02} + t_{3т} + t_{03} + t_{4т} + t_{04}$$

2.4.2 Рассчитывается число циклов в час,  $Z_{\text{расч}}$ , сравнивается с заданным значением

$$Z_{\text{расч}} = \frac{3600}{T} \quad (55)$$

$$Z_{\text{расч}} \geq Z_3$$

и делается вывод о соответствии (не соответствии) производительности лебедки требованиям задания.

## 2.5 Проверка электродвигателя на нагрев

2.5.1 Расчетная продолжительность включений, ПВ, % или  $\varepsilon$ , в относительных единицах

$$\text{ПВ}\% = \frac{\sum t_{\text{раб}}}{T} \cdot 100\% \quad (56)$$

$$\varepsilon = \frac{\sum t_{\text{раб}}}{T}$$

2.5.2 Рассчитывается эквивалентный ток  $I_{\varepsilon}$ , А

$$I_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\left(\frac{I_n + I_1}{2}\right)^2 t_{1n} + I_1^2 t_{1y} + \left(\frac{I_n + I_2}{2}\right)^2 t_{2n} + I_2^2 t_{2y} + \left(\frac{I_n + I_3}{2}\right)^2 t_{3n} + I_3^2 t_{3y} + \left(\frac{I_n + I_4}{2}\right)^2 t_{4n} + I_4^2 t_{4y}}{\alpha(t_{1n} + t_{2n} + t_{3n} + t_{4n}) + t_{1y} + t_{2y} + t_{3y} + t_{4y}}} \quad (57)$$

2.5.3 Номинальный эквивалентный ток, соответствующий реальному значению продолжительности включения,  $I_{\varepsilon n}$ , А

$$I_{\varepsilon n} = I_{\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}} \quad (58)$$

где  $\varepsilon_n - 0,15; 0,25; 0,40$  – номинальная продолжительность включения выбранного двигателя.

2.5.4 Проверяется условие  $I_{\varepsilon n} \leq I_n$  и делается вывод о возможности использования выбранного двигателя для лебедки с заданными параметрами без перегрева.

Пример расчета приведен в Приложении Д.

### 3 Технологический раздел

#### 3.1 Разработка схемы управления

После выполнения расчета необходимо разработать или выбрать схему управления электроприводом грузоподъемного механизма.

При разработке схемы управления следует руководствоваться следующими соображениями:

- при местном управлении и мощности электродвигателя до (10...15) кВт целесообразно применять контроллерную систему управления (контроллеры серий КВ 1000 и КВ 2000),
- при дистанционном управлении, что имеет очень редкое применение, и при мощности более (10...15) кВт следует применять контакторную систему управления (магнитные контроллеры постоянного тока типа БП и ВП и переменного тока типа БТ и ВТ).

Более подробно эти вопросы рассмотрены в [6] – [11], [14] – [20].

После разработки схемы следует составить краткую инструкцию по эксплуатации и техническому обслуживанию электропривода с приведением характерных неисправностей и методов их устранения, а также мер, направленных на безопасность обслуживания

## Список литературы

1. ГОСТ 2.710-84. ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. – М.: Стандартинформ, 2017.
2. ГОСТ 2.709-89. ЕСКД. Обозначения условные проводов и контактных соединений электрических элементов, оборудования и участков цепей в электрических схемах. – М.: Стандартинформ, 2017.
3. ГОСТ 2.747-68. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Размеры условных графических обозначений. – М.: Стандартинформ, 2017.
4. ГОСТ 2.755-87. ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения. – М.: Стандартинформ, 2017.
5. ГОСТ 12617-78. Лебедки судовые грузовые. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2017.
6. Аристов Ю.К. Судовые вспомогательные механизмы и системы. / Ю.К. Аристов. – М.: Транспорт, 1985, 288 с.
7. Головин Ю.К. Судовые электрические приводы: учеб. для мореход. училищ / Ю.К. Головин. – М.: Транспорт, 1984.
8. Гурович А.Н. Справочник по судовым устройствам. В 2-х т. Т. 1. Рулевые, якорные и швартовные устройства. – Л.: Судостроение, 1975.
9. Завиша В.В. Судовые вспомогательные механизмы / В.В. Завиша, Б.Г. Деккин. – М.: Транспорт, 1974, 392 с.
10. Кацман М.М. Электрический привод: учебник / М.М. Кацман. – М.: Академия, 2014, – 384 с.
11. Колесников О.Г. Судовые вспомогательные механизмы и системы / О.Г. Колесников. – М.: Транспорт, 1977. – 464 с.
12. Правила классификации и постройки морских судов (редакция 2018 года). В 2-х томах. – [19 издание] : НД 2-020101-104. – СПб.: Морской Регистр, 2018.
13. Правила по грузоподъемным устройствам морских судов (редакция 2018 года) : НД 2-020101-106. – СПб.: Морской Регистр, 2018.

14. Справочник судового электротехника. В 3-х т. Т. 1. Судовые электроэнергетические системы и устройства / под ред. Г.И. Китаенко. Т. 1. Судовые электроэнергетические системы и устройства. – Л.: Судостроение, 1975. – 520 с.
15. Судовые электроприводы: Справочник. В 2-х т. Т. 1. / А.И. Богословский и др. Т. 1. – Л.: Судостроение, 1983.
16. Судовые электроприводы: Справочник. В 2-х т. Т. 2. / А.И. Богословский и др. Т. 2. – Л.: Судостроение, 1983.
17. Фесенко В.И. Автоматизированные судовые электроприводы / В.И. Фесенко. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983.
18. Чекунов К.А. Судовые электроприводы и электродвижение судов: учеб. / К.А. Чекунов. – М.: Транспорт, 1986. – 352 с.
19. Судовые устройства: Справочник / под ред. М.Н. Александрова. – Л.: Судостроение, 1987. – 656 с.
20. Харин Б.Г. Судовые вспомогательные механизмы и системы: Учеб. для вузов / В.М. Харин, Б.Г. Декин, О.Н. Занько, В.Т. Писклов; под ред. В.М. Харина. – М.: Транспорт, 1982. – 319 с.



## Параметры двигателей МАП

Таблица А.1 – Основные параметры двухскоростных двигателей серии МАП для повторно-кратковременного режима работы

| Тип электро-<br>двигателя | Число<br>полюсов<br>$2p$ | Мощность<br>на валу,<br>$P$ , кВт | Режим<br>работы<br>ПВ % | Частота<br>вращения,<br>$n$ , об/мин | Номинальный<br>ток статора,<br>$I_{ном}$ , А | $\cos\varphi$ | КПД, % | Максимальный<br>момент,<br>$M_{max}$ , Н·м | Пусковой<br>момент,<br>$M_{п}$ , Н·м | Пусковой ток,<br>$I_{п}$ , А | Сопротивление<br>фазы статора,<br>$R$ , Ом | Момент<br>инерции<br>ротора,<br>$J$ , кг·м <sup>2</sup> |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|---------------|--------|--------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| МАП121-4/8                | 4                        | 1,3                               | 40                      | 1395                                 | 3,5                                          | 0,82          | 70,9   | 25,5                                       | 21,6                                 | 17                           | 4,78                                       | 0,028                                                   |
|                           | 8                        | 0,8                               | 15                      | 635                                  | 3,5                                          | 0,73          | 43,9   | 23,5                                       | 21,6                                 | 8,4                          |                                            |                                                         |
| МАП122-4/12               | 4                        | 2,2                               | 40                      | 1385                                 | 6,1                                          | 0,77          | 69,0   | 36,3                                       | 36,3                                 | 28                           | 2,36                                       | 0,038                                                   |
|                           | 12                       | 0,7                               | 15                      | 400                                  | 5,1                                          | 0,56          | 35,2   | 35,3                                       | 35,3                                 | 8                            |                                            |                                                         |
| МАП221-4/12               | 4                        | 3,6                               | 40                      | 1390                                 | 9,0                                          | 0,79          | 47,8   | 62,8                                       | 54,9                                 | 46                           | 1,5                                        | 0,060                                                   |
|                           | 12                       | 1,3                               | 15                      | 405                                  | 7,6                                          | 0,54          | 30,5   | 67,7                                       | 67,7                                 | 16                           |                                            |                                                         |
| МАП421-4/12               | 4                        | 6,0                               | 40                      | 1420                                 | 13,7                                         | 0,82          | 82,4   | 142,2                                      | 127,5                                | 95                           | 0,63                                       | 0,175                                                   |
|                           | 12                       | 3,5                               | 15                      | 400                                  | 19,5                                         | 0,62          | 53,7   | 166,8                                      | 161,9                                | 33                           |                                            |                                                         |
| МАП421-6/12               | 6                        | 5,5                               | 25                      | 935                                  | 16,6                                         | 0,63          | 80,5   | 152,1                                      | 137,3                                | 80                           | 0,46                                       | 0,175                                                   |
|                           | 12                       | 2,5                               | 15                      | 445                                  | 15,5                                         | 0,49          | 55,4   | 166,8                                      | 161,9                                | 33                           |                                            |                                                         |
| МАП422-4/12               | 4                        | 10,0                              | 40                      | 1410                                 | 21,6                                         | 0,86          | 82,7   | 235,4                                      | 196,2                                | 145                          | 1,36                                       | 0,250                                                   |
|                           | 12                       | 3,5                               | 15                      | 435                                  | 17,3                                         | 0,54          | 59,8   | 215,8                                      | 215,8                                | 40                           |                                            |                                                         |
| МАП521-4/16               | 4                        | 13                                | 40                      | 1370                                 | 25,3                                         | 0,92          | 79,6   | 245,3                                      | 225,6                                | 130                          | 0,90                                       | 0,375                                                   |
|                           | 16                       | 3,5                               | 15                      | 285                                  | 17,1                                         | 0,6           | 49,3   | 245,3                                      | 245,3                                | 32                           |                                            |                                                         |
| МАП422-6/12               | 6                        | 10,0                              | 25                      | 930                                  | 28,3                                         | 0,69          | 77,4   | 333,5                                      | 309,0                                | 133                          | 0,49                                       | 0,375                                                   |
|                           | 12                       | 3,5                               | 15                      | 445                                  | 17,3                                         | 0,54          | 92,1   | 215,8                                      | 215,8                                | 40                           |                                            |                                                         |
| МАП422-4/16               | 4                        | 13,0                              | 40                      | 1385                                 | 25,7                                         | 0,94          | 49,5   | 245,3                                      | 225,6                                | 130                          | 0,35                                       | 0,725                                                   |
|                           | 16                       | 3,5                               | 15                      | 285                                  | 15,5                                         | 0,66          | 28,8   | 230,5                                      | 230,5                                | 23                           |                                            |                                                         |
| МАП521-8/16               | 8                        | 13                                | 25                      | 700                                  | 34,0                                         | 0,71          | 63,3   | 510,1                                      | 510,1                                | 150                          | 0,33                                       | 0,725                                                   |
|                           | 16                       | 3,5                               | 15                      | 290                                  | 12,6                                         | 0,55          | 35,9   | 382,6                                      | 382,6                                | 60                           |                                            |                                                         |
| МАП622-4/6                | 4                        | 70                                | 40                      | 1420                                 | 3,5                                          | 0,93          | 84,8   | 902,5                                      | 559,2                                | 650                          | 0,04                                       | 1,500                                                   |
|                           | 6                        | 40                                | 40                      | 920                                  | 3,5                                          | 0,9           | 73,5   | 833,9                                      | 735,8                                | 380                          |                                            |                                                         |

Таблица А.2 – Основные параметры трехскоростных двигателей серии МАП для повторно-кратковременного режима работы

| Тип электро-<br>двигателя | Число<br>полюсов<br>$2p$ | Мощность<br>на валу,<br>$P$ , кВт | Режим<br>работы<br>ПВ % | Частота<br>вращения,<br>$n$ , об/мин | Номинальный<br>ток статора, $I_{ном}$<br>А | $\cos\varphi$ | КПД,<br>% | Максимальный<br>момент,<br>$M_{max}$ , Н·м | Пусковой<br>момент,<br>$M_{п}$ , Н·м | Пусковой ток,<br>$I_{п}$ , А | Сопротивление<br>фазы статора,<br>$R$ , Ом | Момент<br>инерции<br>ротора,<br>$J$ , кг·м <sup>2</sup> |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|-----------|--------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| МАП621-4/8/24             | 4                        | 30                                | 40                      | 1350                                 | 59,1                                       | 0,93          | 77,9      | 490,5                                      | 392,4                                | 300                          | 0,091                                      | 1,16                                                    |
|                           | 8                        | 15                                | 40                      | 690                                  | 38,5                                       | 0,74          | 77,1      | 539,6                                      | 490,5                                | 175                          |                                            |                                                         |
|                           | 24                       | 3,2                               | 15                      | 165                                  | 26,3                                       | 0,56          | 30,0      | 313,9                                      | 313,9                                | 42                           |                                            |                                                         |
| МАП622-6/12/24            | 6                        | 32                                | 40                      | 900                                  | 70,0                                       | 0,88          | 79,0      | 833,9                                      | 716,1                                | 340                          | 0,127                                      | 1,50                                                    |
|                           | 12                       | 16                                | 25                      | 435                                  | 59,5                                       | 0,62          | 66,5      | 686,7                                      | 667,1                                | 150                          |                                            |                                                         |
|                           | 24                       | 5                                 | 15                      | 160                                  | 44,7                                       | 0,50          | 29,8      | 588,6                                      | 588,6                                | 72                           |                                            |                                                         |
| МАП622-4/8/24             | 4                        | 44                                | 40                      | 1350                                 | 79,1                                       | 0,94          | 89,0      | 588,6                                      | 569,0                                | 410                          | 0,091                                      | 1,50                                                    |
|                           | 8                        | 20                                | 40                      | 665                                  | 47,3                                       | 0,74          | 77,6      | 735,8                                      | 637,7                                | 220                          |                                            |                                                         |
|                           | 24                       | 4,5                               | 25                      | 175                                  | 39,4                                       | 0,47          | 33,9      | 490,5                                      | 490,5                                | 60                           |                                            |                                                         |
| МАП622-4/6/12             | 4                        | 52                                | 40                      | 1360                                 | 101,3                                      | 0,93          | 83,4      | 882,9                                      | 784,8                                | 550                          | 0,061                                      | 1,50                                                    |
|                           | 6                        | 25                                | 25                      | 870                                  | 56,0                                       | 0,86          | 50,8      | 882,9                                      | 833,9                                | 330                          |                                            |                                                         |
|                           | 12                       | 25                                | 25                      | 430                                  | 84,9                                       | 0,64          | 84,9      | 1275,3                                     | 1275,3                               | 210                          |                                            |                                                         |

Характеристики электродвигателя

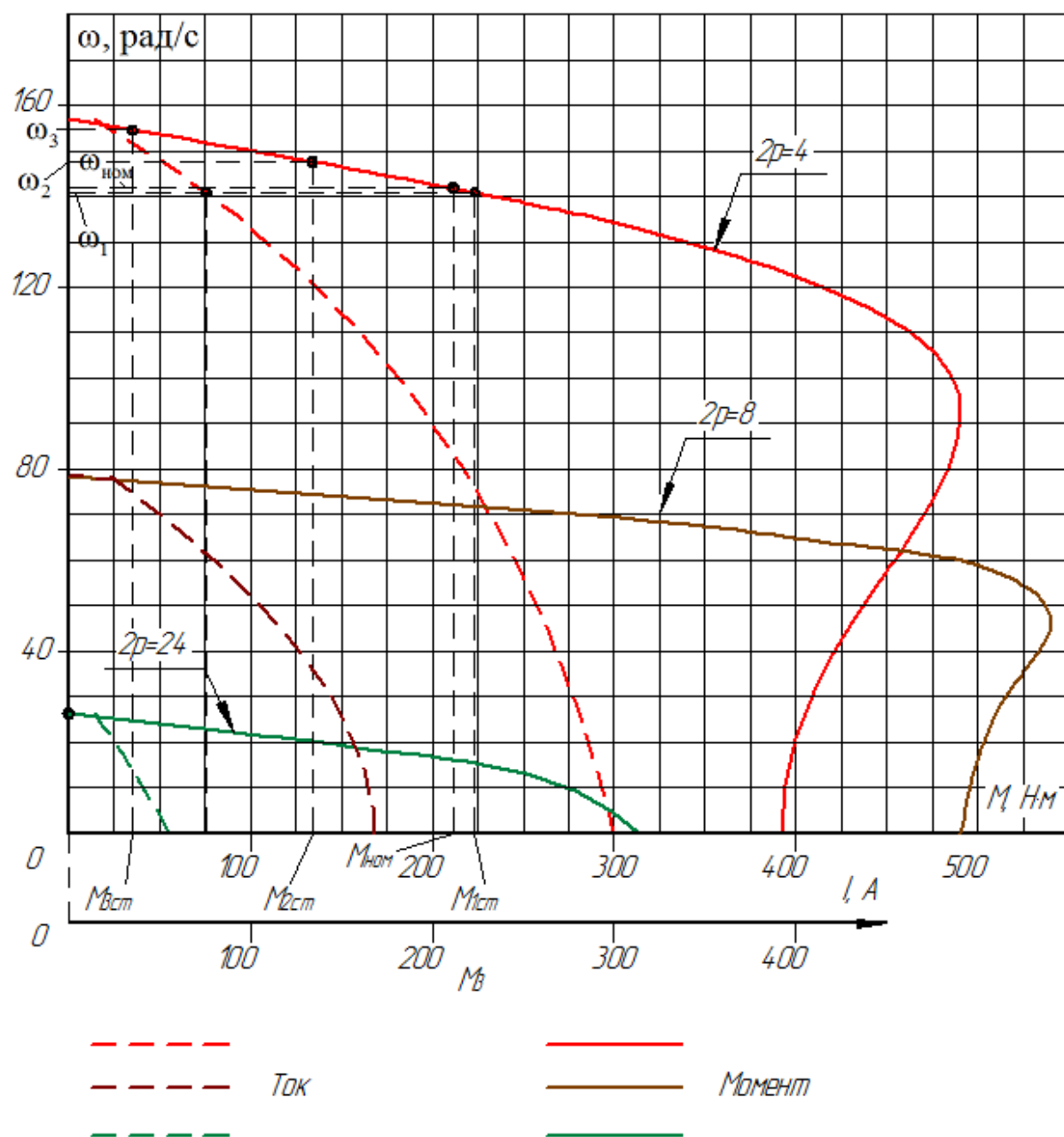


Рисунок Б.1 – Механические и электромеханические характеристики электродвигателя МАП621-4/8/24

## Приложение В

### Зависимость КПД зубчатых передач от загрузки механизма

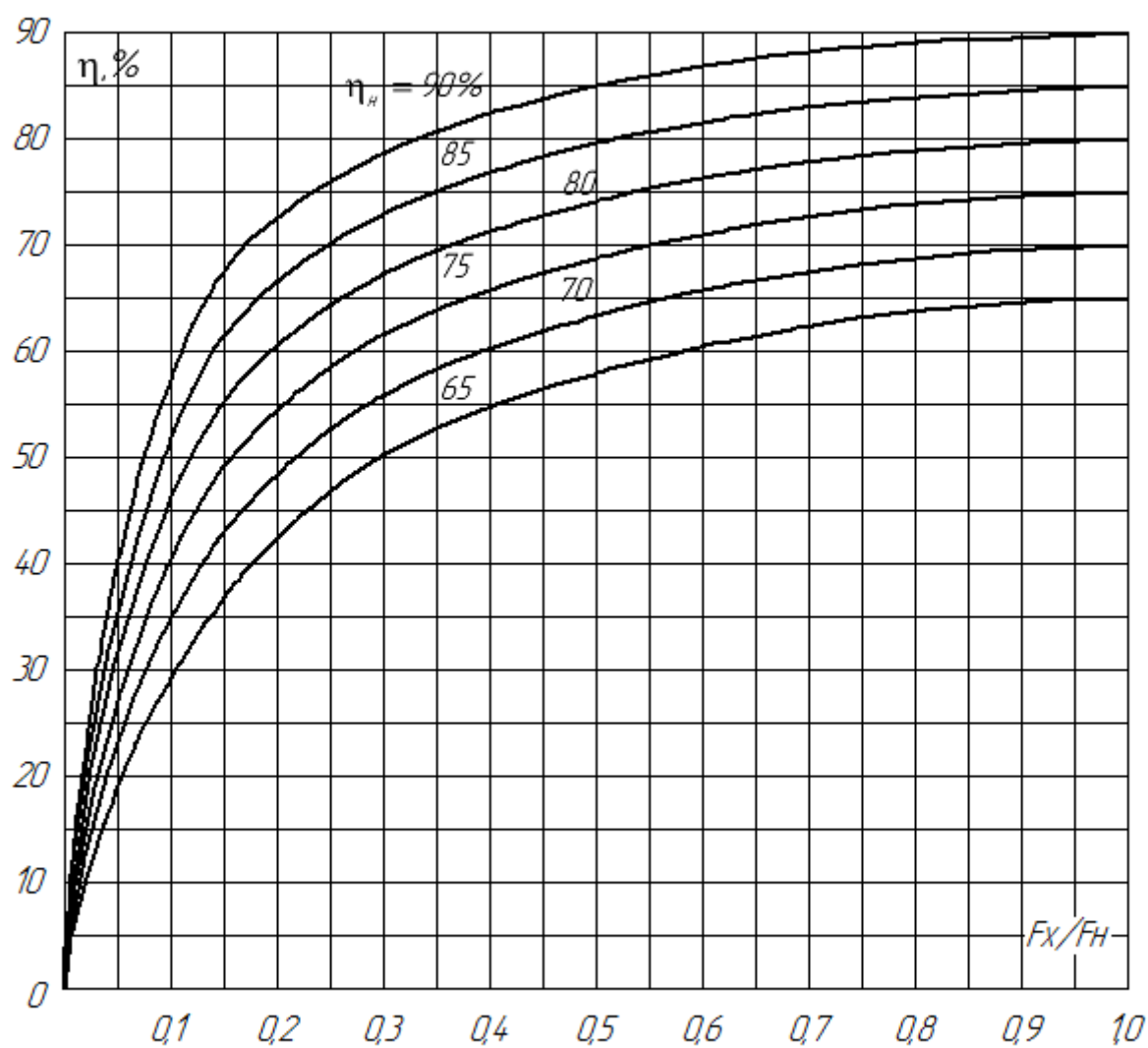


Рисунок В.1 – Зависимость КПД зубчатых передач от загрузки механизма

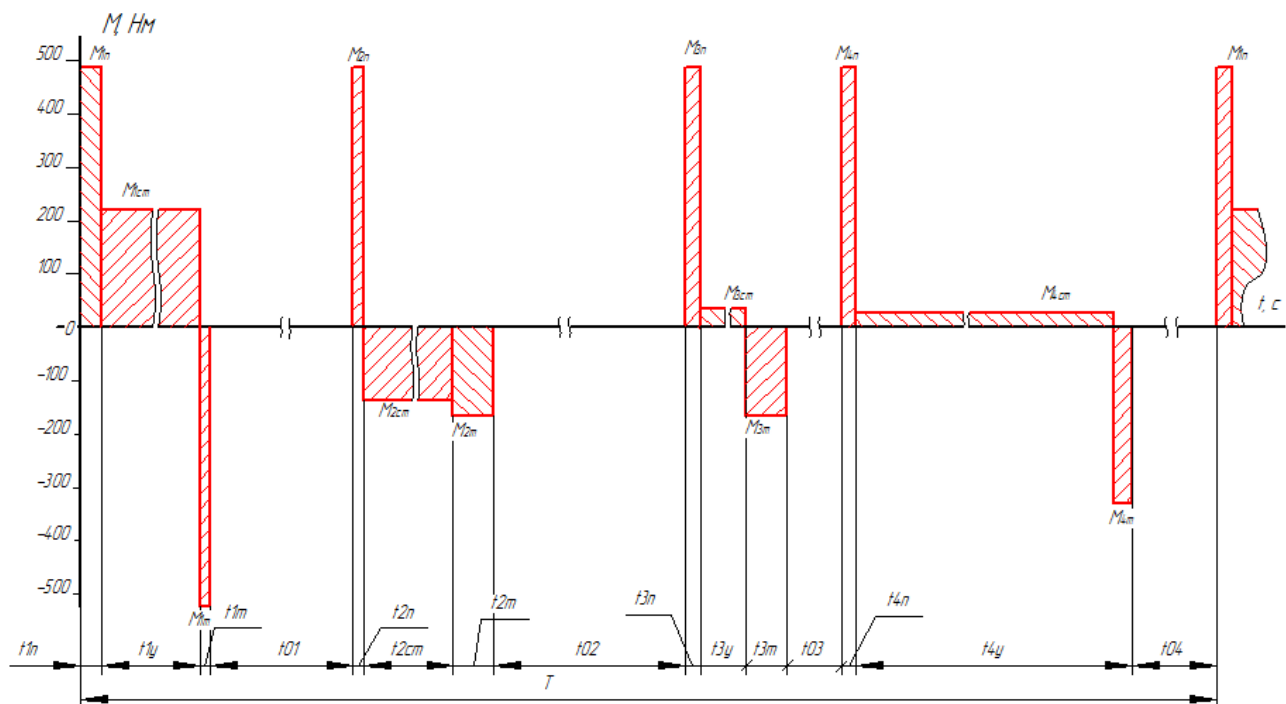


Рисунок Г.1 – Нагрузочная диаграмма  $M = f(t)$

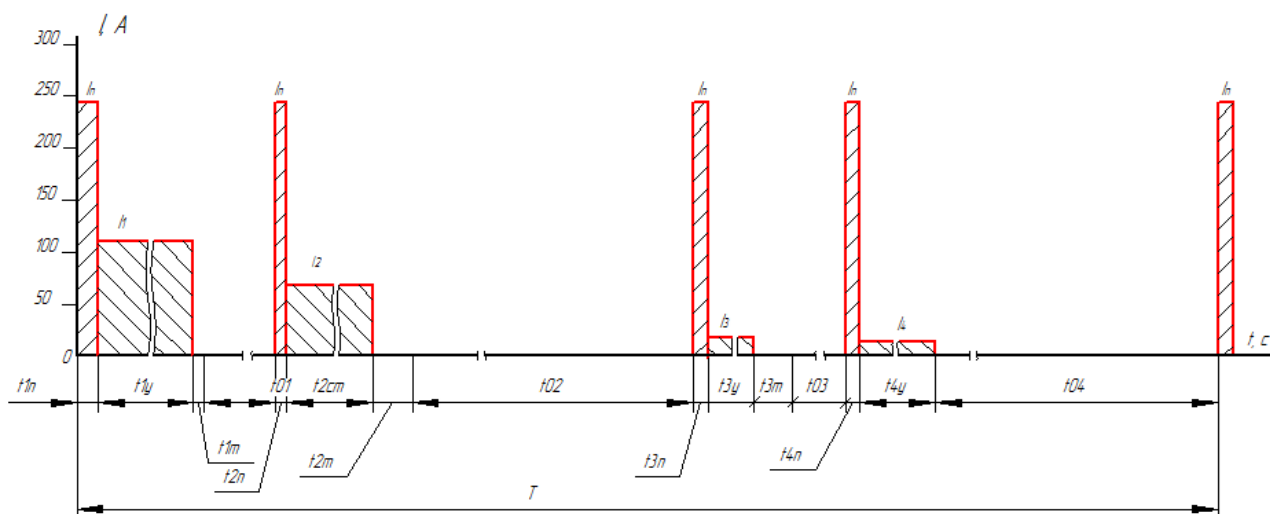


Рисунок Г.2 – Нагрузочная диаграмма  $I = f(t)$

## Приложение Д

### Пример расчета

#### 1 Общий раздел

##### 1.1 Краткая характеристика и тактико-технические характеристики судна

Прототипом в данном курсовом проекте является судно со следующими данными:

Название – «Анатолий Карякин»

Порт приписки – Петропавловск-Камчатский

Символ класса РС – КМ(\*) Ice2 R3

Тип судна – Накатное/генгруз

Год и страна постройки – 25.12.2010 г, Корея, НДР

Дедвейт – 870 т

Водоизмещение – 1488 т

Длина наибольшая: 56,46м

Ширина габаритная – 14,0 м

Высота борта – 6,20 м

Осадка – 2,8 м

Скорость – 11,0 уз

Напряжение сети, U: 380 В

Число водонепроницаемых переборок – 8 шт.

Марка главного двигателя – TBD604BL6

Число и мощность главных двигателей: 2×600 кВт

Тип движителя: винт фиксированного шага цельнолитой

Мощность судовых электростанций: Основной 2×75 кВт

Резервный 1×50 кВт

## 2 Расчетный раздел

### 2.1 Предварительный выбор электродвигателя

Исходные данные для расчета электродвигателя приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные

| Наименование параметров                                | Значения |
|--------------------------------------------------------|----------|
| 1. Номинальная грузоподъемность, $m_n$ , т             | 3        |
| 2. Масса холостого гака, $m_0$ , кг                    | 60       |
| 3. Расчетный диаметр грузового барабана, $D_6$ м       | 0,5      |
| 4. Передаточное число, $i$                             | 42       |
| 5. КПД лебедки при работе с номинальным грузом, $\eta$ | 0,8      |
| 6. Скорость подъема номинального груза, $v$ , м/мин    | 50       |
| 7. Скорость посадочная, $v_{\text{пос}}$ , м/мин       | 8        |
| 8. Высота подъема груза, $h$ , м                       | 15       |
| 9 Число циклов в час, $Z$                              | 15       |
| 10. Напряжение судовой сети, $U$ , В                   | 380      |

2.1.1 Момент на валу электродвигателя при подъеме номинального груза  
 $M_{1\text{ст}}$ , Нм

$$M_{1\text{ст}} = \frac{(G_n + G_0) \cdot D_6}{2 \cdot i \cdot \eta} \quad (1)$$

где  $G_n = 9,81 \cdot m_n = 9,81 \cdot 3000 = 29,4 \cdot 10^3$  и  $G_0 = 9,81 \cdot m_0 = 9,81 \cdot 60 = 0,6 \cdot 10^3$  – вес номинального груза и вес холостого гака соответственно, Н.

$$M_{1\text{ст}} = \frac{(29,4 + 0,6) \cdot 10^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 42 \cdot 0,8} = 223$$

2.1.2 Момент на валу электродвигателя при спускании номинального груза  
 $M_{2\text{ст}}$ , Нм

$$M_{2\text{ст}} = \frac{(G_n + G_0) \cdot D_6}{2 \cdot i} \cdot \left(2 - \frac{1}{\eta}\right) \quad (2)$$

$$M_{2\text{ст}} = \frac{(29,4 + 5,9) \cdot 10^3 \cdot 0,55}{2 \cdot 42} \cdot \left(2 - \frac{1}{0,8}\right) = 134$$

2.1.3 Скорость вращения электродвигателя на быстроходной обмотке, необходимая для обеспечения заданной скорости подъема номинального груза,

$\omega$ , рад/с

$$\omega = \frac{v \times i}{30 \cdot D_6} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{50 \cdot 42}{30 \cdot 0,5} = 140$$

или частота вращения,  $n$ , об/мин

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} \quad (4)$$

$$n = \frac{30 \cdot 140}{3,14} = 1340$$

2.1.4 Скорость вращения двигателя на тихоходной обмотке, необходимая для обеспечения посадочной скорости груза,  $\omega_{\text{пос}}$ , рад/с

$$\omega_{\text{пос}} = \frac{v_{\text{пос}} \cdot i}{30 D_6} \quad (5)$$

$$\omega_{\text{пос}} = \frac{4 \cdot 42}{30 \cdot 0,5} = 22,4$$

или частота вращения  $n_{\text{пос}}$ , об/мин

$$n_{\text{пос}} = \frac{30 \cdot \omega_{\text{пос}}}{\pi} \quad (6)$$

$$n_{\text{пос}} = \frac{30 \cdot 22,4}{3,14} = 214$$

2.1.5 Мощность двигателя при подъёме номинального груза на быстроходной обмотке,  $P_{1\text{ст}}$ , кВт

$$P_{1\text{ст}} = M_{1\text{ст}} \cdot \omega \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

$$P_{1\text{ст}} = 223 \cdot 140 \cdot 10^{-3} = 31,3$$

2.1.6 Мощность двигателя при посадке груза на тихоходной обмотке, , кВт

$$P_{\text{пос}} = M_{2\text{ст}} \cdot \omega_{\text{пос}} \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

$$P_{\text{пос}} = 134 \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} = 3,0$$

Предварительно из [16] выбираем электродвигатель типа МАП 621-4/8/24. Его технические данные приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Технические данные электродвигателя МАП 621-4/8/24

| Наименование параметров                          | Значения               |       |       |
|--------------------------------------------------|------------------------|-------|-------|
| 1. Число полюсов, $2p$                           | 4                      | 8     | 24    |
| 2. Мощность $P_n$ , кВт                          | 30                     | 15    | 3,2   |
| 3. Номинальная частота вращения, $n_n$ , об/мин  | 1350                   | 690   | 165   |
| 4. Номинальный ток, $I_n$ , А                    | 59,1                   | 38,5  | 26,3  |
| 5. Пусковой ток, $I_p$ , А                       | 300                    | 175   | 42    |
| 6. Момент максимальный, $M_{max}$ , Нм           | 490,5                  | 539,6 | 313,9 |
| 7. Момент пусковой, $M_p$ , Нм                   | 392,4                  | 490,5 | 313,9 |
| 8. Коэффициент мощности, $\cos \varphi$          | 0,93                   | 0,74  | 0,56  |
| 9. Режим работы (ПВ, процент)                    | 40                     | 40    | 15    |
| 10. КПД, $\eta_n$ , процент                      | 78                     | 77    | 30    |
| 11. Момент инерции, $J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup> | 1,16                   |       |       |
| 12. Напряжение, $U$ , В                          | 380                    |       |       |
| 13. Исполнение                                   | IP 56 (водозащищенное) |       |       |

Проверим условия выполнения требований ГОСТ 12617-78 [5] к выбранному двигателю.

$$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n} \geq M_{лст}$$

$$M_{п.высш} \geq (1,3 \div 2,5) \cdot \frac{M_{лст}}{\eta} \quad (9)$$

$$M_{п.низш} \geq 1,3 \cdot M_{н.низш}$$

$$M_n = \frac{30 \times 10^3}{141,8} = 212 \text{ [Нм]} \leq M_{лст} = 223 \text{ [Нм]}$$

$$M_{п.высш} = 392 \text{ [Нм]} \geq 1,3 \cdot \frac{M_{лст}}{\eta} = 1,3 \cdot \frac{223}{0,8} = 362 \text{ [Нм]}$$

$$M_{п.низш} = 314 \text{ [Нм]} \geq 1,3 \cdot M_{н.низш} = 1,3 \cdot 185 = 240 \text{ [Нм]}$$

Номинальный момент двигателя несколько меньше максимального расчетного, однако это превышение небольшое, и, учитывая, что двигатель работает с максимальным моментом только часть времени, двигатель принимаем к дальнейшему расчету. Прочие условия выполняются.

## 2.2 Расчет и построение характеристик выбранного двигателя

В пояснительной записке приведен пример расчета только для высшей скорости, расчет для прочих скоростей аналогичен, данные расчётов сведены в таблице 3. Расчет проводим в следующей последовательности:

### 2.2.1 Номинальный момент двигателя, $M_n$ , Н

$$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n} \quad (10)$$

$$M_n = \frac{30 \cdot 10^3}{141,3} = 212,3$$

### 2.2.2 Синхронная частота вращения, $\omega_c$ , рад/с

$$\omega_c = \frac{2\pi f}{p} \quad (11)$$

где  $f = 50$  Гц - частота тока,

$$\omega_c = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157$$

### 2.2.3 Номинальная частота вращения, $\omega_n$ , рад/с,

$$\omega_n = 0,105 \cdot n_n \quad (12)$$

$$\omega_n = 0,105 \cdot 1350 = 141,8$$

### 2.2.4 Номинальное скольжение, $s_n$

$$s_n = \frac{\omega_c - \omega_n}{\omega_c} \quad (13)$$

$$s_n = \frac{157 - 141,8}{157} = 0,097$$

### 2.2.5 Критическое скольжение $s_{кр}$

$$s_{кр} = s_n (k_m + \sqrt{k_m^2 - 1}) \quad (14)$$

$$s_{кр} = 0,097 \cdot (2,32 + \sqrt{2,32^2 - 1}) = 0,428$$

где  $k_m = \frac{M_{\max}}{M_n} = \frac{490}{212} = 2,32$  – кратность максимального момента.

### 2.2.6 Ток холостого хода электродвигателя, $I_0$ , А,

$$I_0 = I_{\text{н}} \left( \sin \varphi - \frac{s_{\text{н}}}{s_{\text{кр}}} \cdot \cos \varphi \right) \quad (15)$$

$$I_0 = 63 \cdot \left( 0,368 - \frac{0,097}{0,428} \cdot 0,93 \right) = 9,9$$

где  $\sin \varphi = 0,368$ , соответствует  $\cos \varphi = 0,93$ .

2.2.7 Задавая значения скольжения от  $s=0$  до  $s=1$  рассчитываем соответствующие скорости двигателя по принятым значениям,  $\omega$ , рад/с, по зависимостям (16) – (19). В пунктах 2.2.7 – 2.2.9 приведен расчет только для  $s = 0,2$  и четырех полюсов. Для прочих значений скольжения и чисел полюсов расчеты аналогичны, данные расчетов приведены в таблице 3.

$$\omega = \omega_c (1 - s) \quad (16)$$

$$\omega_8 = \omega_{c8} (1 - s) = 157 \cdot (1 - 0,2) = 125,6$$

2.2.8 Рассчитываем момент электродвигателя,  $M$ , Н·м, по принятым значениям скольжения,

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}} \quad (17)$$

$$M = \frac{2 \cdot 490}{\frac{0,2}{0,428} + \frac{0,428}{0,2}} = 376,1$$

Для скольжений больше критического расчет ведем по уточненной формуле Клосса-Чекунова (18)

$$M = \sqrt{M_{\text{п}}^2 + \frac{0,93 M_{\text{max}}^2 - M_{\text{п}}^2}{(1 - 1,3 s_{\text{кр}})^2} (1 - s)^2} \quad (18)$$

Так, например, для  $s = 0,5$

$$M = \sqrt{392,4^2 + \frac{0,93 \cdot 490^2 - 392,4^2}{(1 - 1,3 \cdot 0,428)^2} (1 - 0,5)^2} = 576$$

2.2.9 Рассчитываем ток статора,  $I$ , А,

$$I = \sqrt{\left( I_{\text{н}}^2 - I_0^2 \right) \frac{s M}{s_{\text{н}} M_{\text{н}}} + I_0^2} \quad (19)$$

$$I = \sqrt{(63^2 - 9,9^2) \frac{0,2 \cdot 376}{0,097 \cdot 211,6} + 9,9^2} = 119$$

Таблица 3 – Данные для построения характеристик

| Скольжение, $s$                   | Угловая скорость, $\omega$ , рад/с | Частота вращения, $n$ , об/мин | Момент, $M$ , Н·м | Ток, $I$ , А |
|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------|
| Значения параметров для $2p = 4$  |                                    |                                |                   |              |
| 0,000                             | 157,0                              | 1500,0                         | 0,0               | 9,9          |
| 0,012                             | 155,1                              | 1481,6                         | 28,0              | 12,7         |
| 0,015                             | 154,6                              | 1477,1                         | 35,0              | 14,1         |
| 0,060                             | 147,6                              | 1410,0                         | 134,8             | 40,3         |
| $s_H = 0,097$                     | 141,8                              | 1354,3                         | 211,6             | 63,0         |
| 0,103                             | 140,8                              | 1345,2                         | 223,4             | 66,6         |
| 0,200                             | 125,6                              | 1200,0                         | 376,1             | 119,4        |
| 0,300                             | 109,9                              | 1050,0                         | 461,0             | 161,7        |
| $s_{кр} = 0,428$                  | 89,8                               | 857,7                          | 490,5             | 199,1        |
| 0,600                             | 62,8                               | 600,0                          | 459,1             | 229,2        |
| 0,800                             | 31,4                               | 300,0                          | 410,1             | 248,2        |
| 1,000                             | 0,0                                | 857,7                          | 392,4             | 304,1        |
| Значения параметров для $2p = 8$  |                                    |                                |                   |              |
| 0,000                             | 78,5                               | 750,0                          | 0,000             | 21,0         |
| 0,050                             | 74,6                               | 712,5                          | 137,4             | 30,7         |
| 0,065                             | 73,4                               | 701,3                          | 176,6             | 35,7         |
| $s_H = 0,077$                     | 72,5                               | 692,2                          | 207,0             | 40,0         |
| 0,100                             | 70,7                               | 675,0                          | 261,8             | 48,4         |
| 0,200                             | 62,8                               | 600,0                          | 440,6             | 82,7         |
| 0,250                             | 58,9                               | 562,5                          | 492,2             | 96,8         |
| 0,300                             | 55,0                               | 525,0                          | 522,8             | 108,8        |
| $s_{кр} = 0,386$                  | 48,2                               | 460,2                          | 539,6             | 124,8        |
| 0,500                             | 39,3                               | 375,0                          | 520,6             | 139,3        |
| 0,600                             | 31,4                               | 300,0                          | 510,0             | 147,8        |
| 1,000                             | 0,0                                | 0,0                            | 490,5             | 163,7        |
| Значения параметров для $2p = 24$ |                                    |                                |                   |              |
| 0,000                             | 26,17                              | 250,0                          | 0,0               | 18,7         |
| 0,050                             | 24,86                              | 237,5                          | 30,2              | 19,1         |
| 0,100                             | 23,55                              | 225,0                          | 59,9              | 20,0         |
| 0,200                             | 20,93                              | 200,0                          | 116,6             | 25,3         |
| 0,250                             | 19,63                              | 187,5                          | 142,8             | 25,1         |
| 0,300                             | 18,32                              | 175,0                          | 167,4             | 27,3         |

| Скольжение, $s$ | Угловая скорость, $\omega$ , рад/с | Частота вращения, $n$ , об/мин | Момент, $M$ , Н·м | Ток, $I$ , А |
|-----------------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------|
| $s_n = 0,338$   | 17,33                              | 165,5                          | 184,7             | 29,0         |
| 0,600           | 10,47                              | 100,0                          | 271,9             | 40,4         |
| 0,700           | 7,85                               | 75,0                           | 291,0             | 44,2         |
| 0,800           | 5,23                               | 50,0                           | 303,5             | 47,5         |
| 0,900           | 2,62                               | 25,0                           | 310,7             | 50,5         |
| 1,000           | 0,00                               | 0,0                            | 313,7             | 53,0         |

По данным таблицы 3 строим механическую и скоростную характеристики, приведенные в Приложении А.

### 2.3 Построение нагрузочной диаграммы

#### 2.3.1 Подъем номинального груза

2.3.1.1 Подъем номинального груза производится на высшей скорости. Статический момент, действующий на вал двигателя при подъеме  $M_{\text{лст}} = 223$  Нм, определен в п. 2.1.1 Моменту  $M_{\text{лст}}$  соответствует угловая скорость и ток, определённые по характеристикам электродвигателя для высшей скорости

$$\omega_1 = 140,8 \text{ рад/с}; I_1 = 66,6 \text{ А}.$$

Ток, потребляемый двигателем, в пределах допустимых нагрузок пропорционален моменту на валу и может быть найден по формуле (20)

$$I_1 = I_n \cdot \frac{M_{\text{лст}}}{M_n} \quad (20)$$

$$I_1 = 63 \cdot \frac{223,4}{212} = 66,5$$

2.3.1.2 Приведенный к валу двигателя момент инерции электропривода при подъёме груза,  $J_{\text{пр}}$ , кг м<sup>2</sup>

$$J_{\text{пр}} = kJ_{\text{дв}} + (m_n + m_o) \cdot \left( \frac{v}{60 \cdot \omega_n} \right)^2 \quad (21)$$

$$J_{\text{пр}} = 1,2 \cdot 1,16 + (3000 + 60) \cdot \left( \frac{50}{60 \cdot 141,8} \right)^2 = 1,5$$

где  $k = 1,1 \div 1,3$  – коэффициент, учитывающий инерционность передачи и барабана,

принимаем  $k = 1, 2$ .

### 2.3.1.3 Динамический момент при разгоне $M_{1\text{дин}}$ , Нм

$$M_{1\text{дин}} = M_{\text{п}} - M_{1\text{ст}} \quad (22)$$

где  $M_{\text{п}}$  – пусковой момент на обмотке средней скорости,  $M_{\text{п}} = 490$  Нм.

$$M_{1\text{дин}} = 490 - 223 = 267$$

### 2.3.1.4 Время разгона, $t_{1\text{п}}$ , с

$$t_{1\text{п}} = J_{\text{пр}} \frac{\omega_1}{M_{1\text{д}}} \quad (23)$$

$$t_{1\text{п}} = 1,5 \cdot \frac{140,8}{267} = 0,8$$

### 2.3.1.5 Расчетный тормозной момент $M_{\text{т.расч}}$ , Н м

$$M_{\text{т.расч}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot \eta^2}{\omega_{\text{н}}} \quad (24)$$

$$M_{\text{т.расч}} = \frac{30 \cdot 0,8^2}{141,8} \cdot 10^3 = 135$$

### 2.3.1.6 Требуемый тормозной момент электромагнитного тормоза $M_{\text{т}}$ , Н м

$$M_{\text{т}} = k \cdot M_{\text{т.р}} \quad (25)$$

$$M_{\text{т}} = 2 \cdot 135 = 270$$

где  $k$  – коэффициент запаса, выбирается в пределах 1,5 – 2,0.

### 2.3.1.7 Постоянные потери в электродвигателе, $\Delta P$ , кВт

$$\Delta P = \frac{P_{\text{н}}}{2} \left( \frac{1}{\eta_{\text{н}}} - 1 \right) \quad (26)$$

$$\Delta P = \frac{30}{2} \left( \frac{1}{0,78} - 1 \right) = 4,3$$

2.3.1.8 Тормозной момент, обусловленный постоянными потерями в электродвигателе,  $M_{\text{т.дв}}$ , Н м

$$M_{\text{т.дв}} = \frac{\Delta P}{\omega_1} \quad (27)$$

$$M_{\text{т.дв}} = \frac{4,3 \cdot 10^3}{141} = 31$$

### 2.3.1.9 Суммарный тормозной момент, $M_{1т}$ , Н м

$$M_{1т} = M_{1ст} + M_{т} + M_{т.дв} \quad (28)$$

$$M_{1т} = 223 + 270 + 31 = 524$$

### 2.3.1.10 Время остановки поднимаемого груза при отключении электродвигателя $t_{1т}$ , с

$$t_{1т} = J_{np} \frac{\omega_1}{M_{1т}} \quad (29)$$

$$t_{1т} = 1,5 \cdot \frac{141}{524} = 0,4$$

### 2.3.1.11 Установившаяся скорость при подъёме груза, $V_1$ , м/мин

$$v_1 = \frac{30 D_6 \omega_1}{i} \quad (30)$$

$$v_1 = \frac{30 \cdot 0,5 \cdot 141}{42} = 50,3$$

### 2.3.1.12 Путь пройденный грузом при разгоне и торможении, $H_1$ , м

$$h_1 = \frac{v_1}{2} (t_{1п} + t_{1т}) \quad (31)$$

$$h_1 = \frac{50,3}{2 \cdot 60} \cdot (0,8 + 0,4) = 0,5$$

### 2.3.1.13 Время подъёма груза при установившемся режиме, $t_{1y,c}$

$$t_{1y} = \frac{h - h_1}{v_1} \quad (32)$$

$$t_{1y} = \frac{15 - 0,5}{50,3} \cdot 60 = 17,3$$

## 2.3.2 Тормозной спуск груза

2.3.2.1 Статический момент, действующий на вал двигателя при спуске  $M_{2ст} = 134$  Нм, определен в п. 2.1.2. Моменту  $M_{2ст}$  соответствует угловая скорость и ток, определённые по характеристикам электродвигателя для низшей скорости

$$\omega_2 = 147,6 \text{ рад/с}; \quad I_2 = 40,3 \text{ А}$$

или по формуле (20)

$$I_2 = 63 \cdot \frac{223,4}{134} = 39,9$$

2.3.2.2 Поскольку в пределах допустимых нагрузок механическую характеристику для генераторного и двигательного режимов можно представить одной линией, скорость рекуперативного торможения,  $\omega_2$ , рад/с, определяется по формуле

$$\omega_2 = 2\omega_c - \omega_2 \quad (33)$$

$$\omega_2 = 2 \cdot 157,0 - 147,6 = 166,4$$

где  $\omega_c = 157$  рад/с – синхронная угловая скорость на обмотке высшей скорости;

2.3.2.3 Время разгона двигателя при опускании груза,  $t_{2п}$ , с, с включённым двигателем

$$t_{2п} = J_{np} \frac{\omega_2}{M_{п} + M_{2ст}} \quad (34)$$

$$t_{2п} = 1,5 \cdot \frac{166,4}{490,5 + 134} = 0,4$$

где  $M_{п} = 490,5$  Нм – пусковой момент на обмотке средней скорости.

2.3.2.4 Тормозной момент при остановке,  $M_{2т}$ , Н м

$$M_{2т} = M_{т} + M_{т,дв} - M_{2ст} \quad (35)$$

$$M_{2т} = 270 + 31 - 134 = 167$$

2.3.2.5 Время остановки опускаемого груза,  $t_{2т}$ , с

$$t_{2т} = J_{np} \frac{\omega_2}{M_{2т}} \quad (36)$$

$$t_{2т} = 1,5 \cdot \frac{166,4}{167} = 1,5$$

2.3.2.6 Скорость опускаемого груза,  $v_2$ , м/мин

$$v_2 = \frac{30D_6\omega_2}{i} \quad (37)$$

$$v_2 = \frac{30 \cdot 0,5 \cdot 166,4}{42} = 59,4$$

2.3.2.7 Путь, пройденный грузом при разгоне и торможении,  $H_2$ , м

$$h_2 = \frac{v_2}{2} (t_{2п} + t_{2т}) \quad (38)$$

$$h_2 = \frac{59,4}{2 \cdot 60} (0,4 + 1,5) = 0,9$$

2.3.2.8 Время опускания груза при установившемся режиме  $t_{2y}$ , с

$$t_{2y} = \frac{h - h_2}{v_2} \quad (39)$$

$$t_{2y} = \frac{15 - 0,9}{59,4} \cdot 60 = 14,2$$

2.3.3 Подъем холостого гака

2.3.3.1 Момент на валу электродвигателя при подъёме холостого гака,  $M_{3ст}$ ,

Н·м

$$M_{3ст} = \frac{G_0 \cdot D_6}{2 \cdot i \cdot \eta_0} \quad (40)$$

где  $\eta_0 = 0,1$  – КПД при  $G_0/G_n = 0,6/29,4 = 0,02$ , определяется по [5]

$$M_{3ст} = \frac{0,6 \cdot 10^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 42 \cdot 0,1} = 35$$

Моменту  $M_{3ст}$  соответствует угловая скорость и ток (определены по характеристикам)

$$\omega_3 = 154,6 \text{ рад/с}; I_3 = 14,1 \text{ А}$$

2.3.3.2 Приведенный к валу двигательный момент инерции электропривода,  $J_{0пр}$ , кг м<sup>2</sup>, без груза

$$J_{0пр} = kJ_{дв} \quad (41)$$

где  $k = 1,2$  – коэффициент, учитывающий инерционность передачи и барабана, принят в п. 2.3.1.2.

$$J_{0пр} = 1,2 \cdot 1,16 = 1,4$$

2.3.3.3 Время разгона при подъёме холостого гака,  $t_{3п}$ , с

$$t_{3п} = J_{0пр} \cdot \frac{\omega_3}{M_n - M_{3ст}} \quad (42)$$

$$t_{3п} = 1,4 \cdot \frac{154,5}{490,5 - 35} = 0,5$$

2.3.3.4 Тормозной момент при отключении двигателя в конце подъёма гака,

$M_{3т}$ , Н м

$$M_{3т} = M_{3ст} + M_{т} + M_{т,ДВ} \quad (43)$$

$$M_{3т} = 35 + 270 + 31 = 336$$

2.3.3.5 Время остановки поднимаемого гака  $t_{3т}$ , с

$$t_{3т} = J_{0пр} \cdot \frac{\omega_3}{M_{3т}} \quad (44)$$

$$t_{3т} = 1,4 \cdot \frac{154,5}{336} = 0,6$$

2.3.3.6 Скорость подъёма холостого гака,  $V_3$ , м/мин

$$v_3 = \frac{30 \cdot D_6 \cdot \omega_3}{i} \quad (45)$$

$$v_3 = \frac{30 \cdot 0,5 \cdot 154,5}{42} = 55,2$$

2.3.3.7 Путь, пройденный гакom при разгоне и торможении,  $H_3$ , м

$$h_3 = \frac{v_3}{2} \cdot (t_{3п} + t_{3т}) \quad (46)$$

$$h_3 = \frac{55,2}{2 \cdot 60} (0,5 + 0,5) = 0,5$$

2.3.3.8 Время установившегося режима при подъёме холостого гака  $t_{3у}$ , с

$$t_{3у} = \frac{h - h_3}{v_3} \quad (47)$$

$$t_{3у} = \frac{15 - 0,5}{55,2} \cdot 60 = 15,8$$

2.3.4 Силовой пуск холостого гака

Силовой спуск холостого гака производится на высшей скорости

2.3.4.1 Момент на валу электродвигателя при опускании холостого гака,  $M_{4ст}$

, Н м

$$M_{4ст} = \frac{G_0 \cdot D_6}{2 \cdot i} \cdot \left( 2 - \frac{1}{\eta_0} \right) \quad (48)$$

$$M_{4\text{ст}} = \frac{0,6 \cdot 10^3 \cdot 0,5}{2 \cdot 42} \cdot \left( 2 - \frac{1}{0,1} \right) = -28,0$$

Моменту  $M_{4\text{ст}}$  соответствует угловая скорость и ток (по характеристикам)

$$\omega_4 = 155,1 \text{ рад/с}; I_4 = 12,7 \text{ А}$$

2.3.4.2 Время разгона при опускании холостого гака,  $t_{4\text{п}}$ , с

$$t_{4\text{п}} = J_{0\text{пр}} \cdot \frac{\omega_4}{M_{\text{п}} - M_{4\text{ст}}} \quad (49)$$

$$t_{4\text{п}} = 1,4 \cdot \frac{155}{490,5 - 28,0} = 0,5$$

2.3.4.3 Тормозной момент при отключении двигателя,  $M_{4\text{т}}$ , Н м

$$M_{4\text{т}} = M_{4\text{ст}} + M_{\text{т}} + M_{\text{т,дв}} \quad (50)$$

$$M_{4\text{т}} = 28 + 270 + 31 = 329$$

2.3.4.4 Время остановки опускаемого гака,  $t_{4\text{т}}$ , с

$$t_{4\text{т}} = J_{0\text{пр}} \cdot \frac{\omega_4}{M_{4\text{т}}} \quad (51)$$

$$t_{4\text{т}} = 1,4 \cdot \frac{155}{329} = 0,7$$

2.3.4.5 Скорость опускания холостого гака,  $v_4$ , м/мин

$$v_4 = \frac{30 \cdot D_6 \cdot \omega_4}{i} \quad (52)$$

$$v_4 = \frac{30 \cdot 0,5 \cdot 155}{42} = 55,4$$

2.3.4.6 Путь, пройденный гакм при разгоне и торможении,  $H_4$ , м

$$h_4 = \frac{v_4}{2} (t_{4\text{п}} + t_{4\text{т}}) \quad (53)$$

$$h_4 = \frac{55,4}{2 \cdot 60} (0,6 + 0,7) = 0,6$$

2.3.4.7 Время установившегося движения при опускании холостого гака,  $t_{4\text{у}}$ ,

с

$$t_{4y} = \frac{h - h_4}{v_4} \quad (54)$$

$$t_{4y} = \frac{15 - 0,6}{55,4} \cdot 60 = 15,6$$

Расчетные данные пункта 2.3 сводим в таблицу 4, пользуясь которой строим нагрузочные диаграммы (Приложение Б).

Таблица 4 - Данные для построения нагрузочной диаграммы

| Режим работы                       | Ток, I, А |       | Время, t, с |      | Момент, M, Нм |       |
|------------------------------------|-----------|-------|-------------|------|---------------|-------|
| 1. Подъем номинального груза       | -         | -     | -           | -    | $M_{1ст}$     | 223,4 |
| - разгон                           | $I_{п}$   | 175,0 | $t_{1п}$    | 0,8  | $M_{1п}$      | 490,5 |
| - установившийся режим             | $I_1$     | 66,6  | $t_{1y}$    | 17,3 | -             | 223,4 |
| - торможение                       | -         | -     | $t_{1т}$    | 0,4  | $M_{1т}$      | 524,0 |
| 2. Горизонтальное перемещение      | -         | -     | $t_{01}$    | 20,0 | -             | -     |
| 3. Тормозной спуск груза           | -         | -     | -           | -    | $M_{2ст}$     | 134,0 |
| - разгон                           | $I_{п}$   | 175,0 | $t_{2п}$    | 0,4  | $M_{2п}$      | 313,9 |
| - установившийся режим             | $I_2$     | 24,5  | $t_{2y}$    | 14,2 | -             | 134,0 |
| - торможение                       | -         | -     | $t_{2т}$    | 1,5  | $M_{2т}$      | 167,0 |
| 4. Расстроповка груза              | -         | -     | $t_{02}$    | 60,0 | -             | -     |
| 5. Подъем холостого гака           | -         | -     | -           | -    | $M_{3ст}$     | 35,0  |
| - разгон                           | $I_{п}$   | 175,0 | $t_{3п}$    | 0,6  | $M_{3п}$      | 490,5 |
| - установившийся режим             | $I_3$     | 14,1  | $t_{3y}$    | 15,8 | -             | 35,0  |
| - торможение                       | -         | -     | $t_{3т}$    | 0,6  | $M_{3т}$      | 336,0 |
| 6. Горизонтальное перемещение гака | -         | -     | $t_{03}$    | 20,0 | -             | -     |
| 7. Силовой спуск холостого гака    | -         | -     | -           | -    | $M_{4ст}$     | -28,0 |
| - разгон                           | $I_{п}$   | 175   | $t_{4п}$    | 0,5  | $M_{4п}$      | 490,5 |
| - установившийся режим             | $I_4$     | 12,7  | $t_{4y}$    | 15,6 | -             | 28,0  |
| - торможение                       | -         | -     | $t_{4т}$    | 0,7  | $M_{4т}$      | 329,0 |
| 8. Застроповка груза               | -         | -     | $t_{04}$    | 60,0 | -             | -     |

2.4 Проверка электродвигателя на обеспечение заданной производительности лебедки

2.4.1 Полная продолжительность цикла, T, с

$$T = \sum t_{\text{раб}} + \sum t_0 \quad (55)$$

где  $\sum t_{\text{раб}}$  – рабочее время;  $\sum t_0$  – время, когда лебедка не работает.

$$\sum t_{\text{раб}} = t_{1\text{п}} + t_{1\text{yp}} + t_{2\text{п}} + t_{1\text{y}} + t_{3\text{п}} + t_{3\text{y}} + t_{4\text{п}} + t_{4\text{y}}$$

$$\sum t_0 = t_{1\text{т}} + t_{01} + t_{2\text{т}} + t_{02} + t_{3\text{т}} + t_{03} + t_{4\text{т}} + t_{04}$$

$$\sum t_{\text{раб}} = 0,8 + 17,3 + 0,4 + 14,2 + 0,6 + 15,8 + 0,5 + 15,6 = 65$$

$$\sum t_0 = 0,4 + 20 + 1,5 + 60 + 0,6 + 20 + 0,7 + 60 = 163$$

$$T = 65 + 163 = 228$$

2.4.2 Число циклов в час,  $Z_{\text{расч}}$ , штук

$$Z_{\text{расч}} = \frac{3600}{T} \quad (56)$$

$$Z_{\text{расч}} = \frac{3600}{228} = 15,8 \geq Z_3 = 15,0$$

Производительность лебедки удовлетворяет требованиям задания.

## 2.5 Проверка электродвигателя на нагрев

2.5.1 Расчетная продолжительность включений, ПВ, процент или  $\varepsilon$

$$\text{ПВ}\% = \frac{\sum t_{\text{раб}}}{T} \quad (57)$$

$$\text{ПВ}\% = \frac{65}{229} \cdot 100 = 28,5 \%; \quad \varepsilon = 0,285.$$

2.5.2 Эквивалентный ток  $I_{\varepsilon}$ , А

$$I_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\left(\frac{I_{\text{п}} + I_1}{2}\right)^2 t_{1\text{п}} + I_1^2 t_{1\text{y}} + \left(\frac{I_{\text{п}} + I_2}{2}\right)^2 t_{2\text{п}} + I_2^2 t_{2\text{y}} + \left(\frac{I_{\text{п}} + I_3}{2}\right)^2 t_{3\text{п}} + I_3^2 t_{3\text{y}} + \left(\frac{I_{\text{п}} + I_4}{2}\right)^2 t_{4\text{п}} + I_4^2 t_{4\text{y}}}{\alpha(t_{1\text{п}} + t_{2\text{п}} + t_{3\text{п}} + t_{4\text{п}}) + t_{1\text{y}} + t_{2\text{y}} + t_{3\text{y}} + t_{4\text{y}}}} \quad (58)$$

где  $\alpha = \frac{1+\beta}{2}$ ,  $\beta$  – коэффициенты, учитывающие ухудшение охлаждения двигателя

при пониженных скоростях. Для закрытых обдуваемых двигателей

$$\beta = 0,3 \div 0,55. \text{ Принимаем } \beta = 0,4; \alpha = \frac{1+0,4}{2} = 0,7.$$

$$I_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\left(\frac{175+67}{2}\right)^2 \cdot 0,8 + 67^2 \cdot 17 + \left(\frac{175+40}{2}\right)^2 \cdot 0,4 + 40^2 \cdot 14,2 + \left(\frac{175+14}{2}\right)^2 \cdot 0,6 + 14^2 \cdot 16 + \left(\frac{175+13}{2}\right)^2 \cdot 0,5 + 13^2 \cdot 16}{0,7(0,8+0,4+0,6+0,5)+17+14+16+16}} = 49,4$$

2.5.3 Номинальный эквивалентный ток,  $I_{\varepsilon H}$ , А

$$I_{\varepsilon H} = I_{\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_H}} \quad (59)$$

$$I_{\varepsilon H} = 49,4 \sqrt{\frac{0,285}{0,4}} = 41,7$$

Таким образом,  $I_{\varepsilon H} = 41,7 < I_H = 63$  [А], т.е. в заданном режиме двигатель перегреваться не будет.

## 2.6 Расчет и выбор питающего кабеля

Расчет и выбор кабеля от ГРЩ до электродвигателя производим по большему рабочему (номинальному) току двигателя и проверяем на потерю напряжения, которое согласно Правилам Регистра не должно превышать 6 %.

Для тока  $I_H = 63$  А выбираем судовой кабель серии КНР  $3 \times 25$  мм<sup>2</sup> и проверяем его на потерю напряжения  $\Delta U$  для повторно-кратковременного режима работы, ПВ-40 %

$$\Delta U = \frac{P \cdot l}{\gamma S U_H^2} \cdot 100 \quad (58)$$

$$\Delta U = \frac{44 \cdot 10^3 \cdot 30}{48 \cdot 25 \cdot 380^2} \cdot 100 = 0,76\% \leq 6\%$$

где  $\gamma = 48$  м/(Ом·мм<sup>2</sup>) – удельная проводимость меди. Выбранный кабель удовлетворяет требованиям Правил Регистра.