



Федеральное агентство морского и речного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
имени адмирала С. О. МАКАРОВА**

**Институт ВОДНОГО ТРАНСПОРТА
ФАКУЛЬТЕТ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Кафедра электропривода и электрооборудования береговых установок

В. О. Тырва

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ БЕРЕГОВЫХ ОБЪЕКТОВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДЪЕМНО-ОПУСКНЫХ ВОРОТ ШЛЮЗА

Учебно-методическое пособие

*Рекомендовано к изданию Редакционно-издательской комиссией
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова*

Санкт-Петербург
Издательство ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
2019

УДК 621.31
ББК 39.46
Т85

Рецензент

Саушев А. В., доктор техн. наук, проф.

Т85 Тырва, В. О.

Электрооборудование береговых объектов водного транспорта. Электропривод подъемно-опускных ворот шлюза : учебно-методическое пособие / В. О. Тырва. — СПб. : Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. 2019. — 36 с.

Соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Изложена методика проектирования автоматизированного электропривода подъемно-опускных ворот судоходного шлюза для реализации технологического процесса шлюзования судов.

Предназначено для студентов 4-го и 5-го курсов по дисциплине «Электрооборудование береговых объектов водного транспорта» очной и заочной формы обучения.

Рекомендовано редакционно-издательской комиссией ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. Протокол № 6 от 25.03.2019.

УДК 621.31
ББК 39.46

СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения	4
Введение	6
1. ОБЩИЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	7
1.1. Однокамерный шлюз	7
1.2. Основное механическое оборудование шлюза	8
1.3. Светофорная сигнализация	10
1.4. Технологический процесс пропуска судов через шлюз	10
1.5. Управление механизмами и светофорами шлюза	12
2. ВЫБОР ТИПА И СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	13
2.1. Обзор электроприводов подъемно-опускных ворот шлюза	13
2.2. Обоснование выбора типа проектируемого электропривода подъемно-опускных ворот	13
2.3. Построение структурной схемы проектируемого электропривода	13
3. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И МОЩНОСТИ ПРИВОДА	14
3.1. Расчет статических нагрузок при перемещении ворот в положение «наполнение» ...	14
3.2. Расчет статических нагрузок при перемещении ворот без напора воды	19
3.3. Расчет статических нагрузок при перемещении ворот в аварийном режиме	19
3.4. Предварительный расчет мощности электродвигателей привода подъемно-опуск ных ворот	20
4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИВОДА	22
4.1. Построение расчетной модели кинематической цепи привода	22
4.2. Расчет передаточного отношения редуктора и открытой зубчатой передачи	22
4.3. Определение статического момента сопротивления на валу электродвигателя	23
5. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ, ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВОЙ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ЧАСТЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	24
5.1. Построение электрической схемы силовой части электропривода	24
5.2. Построение электрической схемы информационной части электропривода	24
5.3. Выбор и проверка электродвигателя	24
5.4. Выбор силовых элементов электропривода	26
5.5. Выбор аппаратов управления, защиты и коммутации электрических цепей	27
Библиографический список	31
Приложение 1.	32
Приложение 2.	33
Приложение 3.	34
Приложение 4.	34
Приложение 5.	35
Приложение 6.	36
Приложение 7.	36

Условные обозначения

- G — вес ворот, Н;
 $G_{\text{пр}}$ — вес противовеса, Н;
 H_1 — уровень воды на короле, м;
 H — напор, м;
 $B_{\text{в}}$ — ширина камеры (пролет подъемно-опускных ворот), м;
 $H_{\text{н}}$ — полная высота подъема подъемно-опускных ворот при наполнении, м;
 H_3 — полная высота подъема подъемно-опускных ворот при закрытии, м;
 $B_{\text{у}}$ — ширина уплотнений (с одной стороны подъемно-опускных ворот), м;
 B_{h} — ширина верхней части подъемно-опускных ворот, м;
 $B_{\text{р}}$ — ширина нижней кромки подъемно-опускных ворот, м;
 $t_{\text{в}}$ — время наполнения камеры подъемно-опускных ворот, мин;
 $V_{\text{н}}$ — скорость подъема подъемно-опускных ворот при наполнении, м/мин;
 V_3 — скорость подъема подъемно-опускных ворот при закрытии, м/мин;
 R_3 — радиус ведущей звездочки, м;
 F_G — сила тяжести ворот, Н;
 $F_{\text{пр}}$ — вес противовеса, Н;
 $F_{\text{ц}}$ — вес цепей, Н;
 $F_{\text{тн}}$ — сила трения в направляющих, Н;
 $F_{\text{ту}}$ — сила трения в уплотнениях, Н;
 $F_{\text{н}}$ — нагрузка на нижний ригель, Н;
 $F_{\text{сн}}$ — суммарная статическая нагрузка в тяговых органах, Н;
 F_{gp} — сила горизонтального давления воды на полотно подъемно-опускных ворот, Н;
 $F_{\text{г}}$ — гидростатическая нагрузка, Н;
 $F_{\text{со}}$ — нагрузка в тяговых органах при открытии подъемно-опускных ворот, Н;
 $F_{\text{сз}}$ — нагрузка в тяговых органах при закрытии подъемно-опускных ворот, Н;
 $F_{\text{са}}$ — суммарная нагрузка в тяговых органах для аварийного режима, Н;
 S — площадь полотна ПОВ, м²;
 K_G — коэффициент, учитывающий возможное отклонение веса ворот от заданного значения
 $K_{\text{т}}$ — коэффициент, учитывающий возможное отклонение сил трения от заданного значения
 $h_{\text{н}}$ — высота подъема ворот при перемещении ПОВ из рабочего положения в положение «наполнение» (переменная величина), м;
 $h_{\text{а}}$ — высота подъема ворот в аварийном режиме (переменная величина), м;
 y — величина разности уровня камеры и уровня порога, м;
 γ — удельный вес воды, Н·м⁻³;
 $\gamma_{\text{ст}}$ — удельный вес стали, Н·м⁻³;
 $p(h_{\text{н}})$ — среднее значение давления воды на боковые уплотнения (переменная величина), Н/м²;
 ψ_1 — коэффициент трения в опорах;
 ψ_2 — коэффициент трения в уплотнениях;
 $M_{\text{сх}}$ — момент статических сил $F_{\text{сх}}$, Нм;

$M_{\text{срх}}$ — среднее значение момента сил $F_{\text{сх}}$, Нм;
 $M_{\text{дmax}}$ — максимальный момент на валу двигателя, Нм;
 $M_{\text{дп}}$ — начальный пусковой момент, Нм;
 $M_{\text{рм}}$ — максимальный момент, создаваемый рабочим механизмом, Нм;
 $P_{\text{д}}$ — расчетная мощность двигателя, кВт;
 n_0 — синхронная частота вращения электродвигателя, об/мин;
 $\omega_{\text{д}}$ — скорость вращения двигателя;
 $\omega_{\text{ном}}$ — номинальная скорость вращения двигателя;
 $\omega_{\text{зх}}$ — угловая скорость вращения ведущей звездочки цепной передачи, 1/с;
 β — коэффициент ухудшения теплоотдачи при понижении скорости двигателя;
 η — КПД механической передачи;
 $\eta_{\text{з}}$ — КПД зубчатой передачи;
 $\eta_{\text{р}}$ — КПД редуктора;
 $\eta_{\text{озп}}$ — КПД открытой зубчатой передачи;
 D_1, D_2 — диаметры шестерен открытой зубчатой передачи, м;
 $i_{\text{р}}$ — передаточное отношение редуктора;
 $i_{\text{озп}}$ — передаточное отношение открытой зубчатой передачи;
 $K_{\text{з}}$ — коэффициент запаса тормоза;
 ПВ — продолжительность включения;
 I — обозначение электрического тока, А;
 U — обозначение электрического напряжения, В.

Введение

Курсовое проектирование электропривода *подъемно-опускных ворот* (ПОВ) шлюза относится к курсу «Электрооборудование береговых объектов водного транспорта». Оно предполагает выполнение следующих этапов работы:

- 1) изучение оборудования шлюза и технологии работы;
- 2) выбор типа и структуры электропривода ПОВ;
- 3) расчет статических нагрузок и мощности электродвигателей привода ПОВ;
- 4) расчет параметров кинематической цепи привода ПОВ;
- 5) разработку электрических схем и выбор элементов силовой и информационной частей электропривода ПОВ.

В разделе 1 приведены общие исходные данные, характеризующие шлюз и его оборудование, для которого выполняется проектирование электропривода ПОВ. Дополняющие их исходные данные для проекта выдаются каждому студенту в виде персонального задания на проектирование электропривода в соответствии с приложением 1.

Последовательность проектирования и содержание курсового проекта определены разделами 2, 3, 4, 5.

В приложениях 2–7 приведены сведения о электродвигателях, редукторах, тормозных устройствах электроприводов.

Выполненная работа должна быть оформлена в виде пояснительной записки с соблюдением требований, предъявляемых к выпускной квалификационной работе. Листы пояснительной записки должны быть пронумерованы. В начало записки должно быть помещено индивидуальное задание на проектирование, выданное преподавателем, а также оформленное автором проекта содержание с указанием разделов и подразделов курсового проекта и номеров страниц размещения этих разделов и подразделов в пояснительной записке.

Электрические схемы силовой части электропривода (одна) и информационной части электропривода (другая) выполняются на листах формата А3 или А4 со штампом в нижнем правом углу листа и спецификацией элементов, представленной в виде таблицы установленного образца. Схемы подшиваются в пояснительную записку. В записке приводятся тексты, поясняющие по схемам работу электропривода при ручном и автоматическом управлении во всех эксплуатационных режимах, а также в аварийном режиме.

Полностью оформленный курсовой проект предъявляется преподавателю на проверку к установленному в задании сроку.

Возвращенный после проверки курсовой проект с замечаниями, указанными на полях листов пояснительной записки, дорабатывается автором следующим образом. Из пояснительной записки не изымаются никакие листы и новые листы не помещаются в пояснительную записку. Все исправления выполняются автором проекта в пояснительной записке по месту расположения замечания *от руки* на тыльной (чистой) стороне предыдущего листа. Допускается вклеивать исправленные графики и схемы, построенные с помощью компьютера и напечатанные на принтере.

При наличии допуска к защите автор проекта после устранения недостатков, отмеченных преподавателем, защищает курсовой проект и получает оценку по результатам выполненной работы, учитывающую содержательность доклада (3–5 мин.) и ответов на вопросы по теме проекта.

1. ОБЩИЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1.1. Однокамерный шлюз

Однокамерный шлюз (рис. 1.1) — гидротехническое сооружение, предназначенное для вертикального подъема и спуска транспортных судов на разные уровни бьефов водного пути.

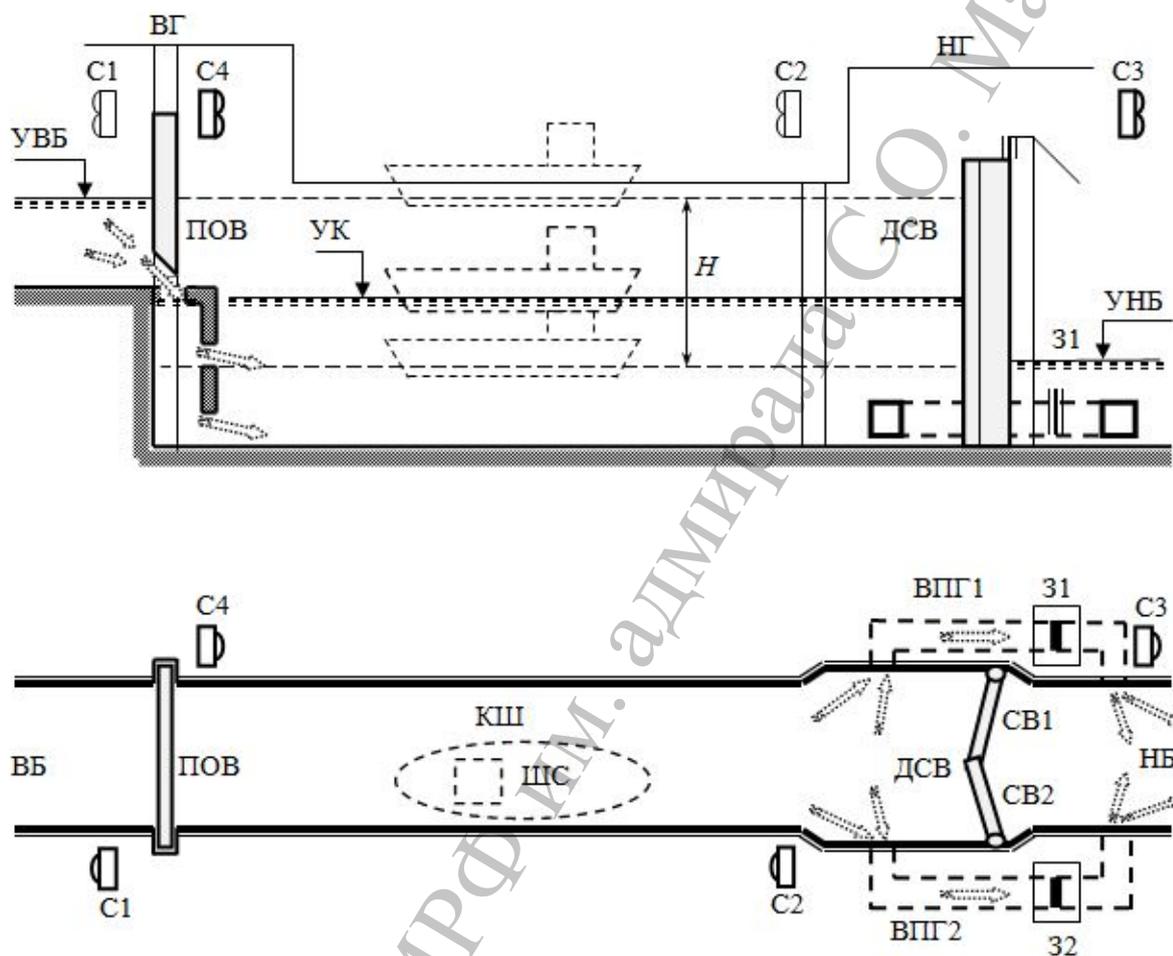


Рис. 1.1. Изобразительная модель однокамерного шлюза с элементами технологического процесса шлюзования судна:

ВГ — верхняя голова шлюза; НГ — нижняя голова шлюза; КШ — камера шлюза; ВБ — верхний бьеф, НБ — нижний бьеф; ШС — шлюзующееся судно; ПОВ — подъемно-опускные ворота; ДСВ — двустворчатые ворота; СВ1, СВ2 — створки двустворчатых ворот; ВПГ1, ВПГ2 — водопроводные галереи; 31, 32 — затворы водопроводных галерей; С1...С4 — светофоры; УВБ — уровень верхнего бьефа; УНБ — уровень нижнего бьефа; УК — уровень воды в камере шлюза; H — напор (перепад уровней верхнего и нижнего бьефа)

Шлюз действует по принципу сообщающихся сосудов, используя для подъема и опускания судов энергию гидростатического напора. Главным рабочим органом шлюза, выполняющим собственно транспортировку судов, является *камера* (КШ), которая ограничивается по длине воротами (ПОВ и ДСВ), перекрывающими *судоходное отверстие* шлюза.

Со стороны верхнего бьефа (ВБ) и нижнего бьефа (НБ) камера сопрягается с массивными «головами» (соответственно с верхней ВГ и с нижней НГ), которые служат для восприятия напора, размещения ворот и механизмов. Относительно створа плотины шлюз (в рассматриваемом случае) вынесен в нижний бьеф. Поэтому верхняя голова шлюза конструктивно приспособлена к длительному удержанию напора. В теле нижней головы предусмотрены *водопроводные галереи* (ВПП1 и ВПП2), сообщающие камеру с нижним бьефом. Для установления этого сообщения (разобщения) служат *затворы* (31 и 32) водопроводных галерей.

Примем для определенности, что глубины судового хода в верхнем бьефе и в нижнем бьефе (по уровням УВБ и УНБ) составляют 4 м, длина камеры (расстояние между воротами) 160 м. Ширина камеры задается по исходным данным на курсовое проектирование в пределах от 14 до 22 м.

1.2. Основное механическое оборудование шлюза

Верхние ворота однополотные подъемно-опускные (ПОВ), приводимые в движение с помощью цепных передач (рис. 1.2);

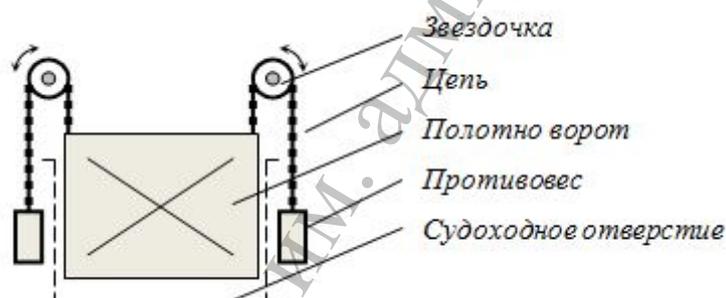


Рис. 1.2. Изобразительная модель подъемно-опускных ворот с цепными передачами

Эксплуатационные положения ворот: «открыты» (судоходное), «закрыты» (рабочее), «наполнение». Перемещение ворот в каждое эксплуатационное положение производится с помощью *электрического привода* ПОВ, который приводит во вращение звездочки цепных передач. Допустимый перекос ворот (рассогласование положений по вертикали левой и правой кромок ворот) составляет 40 мм. Перемещение ворот прекращается при перекусе не более 60 мм.

Управление движением ворот в положение «наполнение» с целью наполнения камеры водой до уровня верхнего бьефа осуществляется по определенной программе обычно на пониженной скорости. Программа выбирается по условиям безопасности отстоя судов в камере шлюза.

Кроме штатных режимов перемещения ворот в эксплуатационные положения в соответствии с технологическим процессом шлюзования, для ПОВ должен быть предусмотрен аварийный режим перемещения в рабочее положение с целью перекрытия судоходного отверстия шлюза. Аварийное перемещение ПОВ должно выполняться из любого начального положения ворот по соответствующей команде.

Нижние ворота двустворчатые (ДСВ), приводимые в движение с помощью кривошипно-штанговых механизмов (КШМ) створок ворот. В состав кривошипно-штангового механизма каждой створки ворот входит приводное колесо и штанга (рис. 1.3, а). Штанга с помощью механических пальцев прикрепляется к приводному колесу одним концом и к створке ворот другим концом.

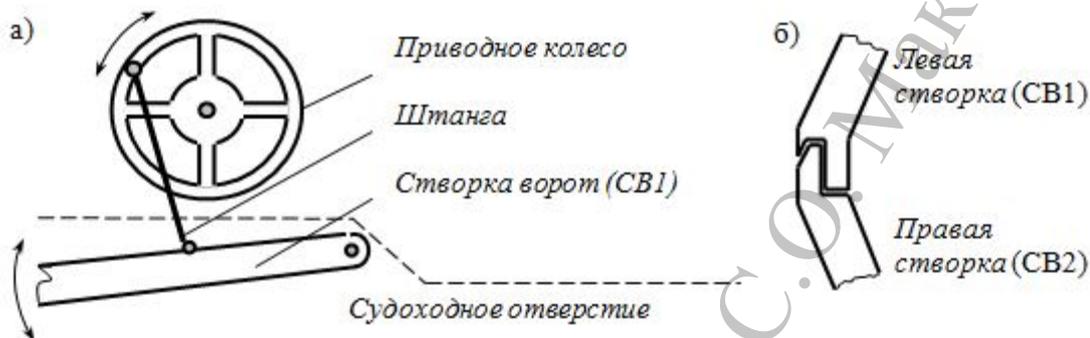


Рис. 1.3. Изобразительные модели кривошипно-штангового механизма (а) и створок ворот в рабочем положении (б)

Приводное колесо приводится во вращение электроприводом. Движение от приводного колеса передается створке ворот с помощью штанги (оси вращения приводного колеса и створки показаны на рис. 1.3, а затемненными кружками). Кривошипно-штанговый механизм характеризуется передаточным отношением, которое зависит от угла поворота створки ворот (и от угла поворота приводного колеса КШМ).

ДСВ имеют два эксплуатационных положения: «судоходное» — ворота открыты и «рабочее» — ворота закрыты.

Кромки створок (створные столбы) ворот профилированы (профили створок в упрощенном виде показаны на рис. 3 б при положении ДСВ «рабочее»). Створение при закрытии ворот должно проходить так, чтобы правая створка (СВ2) дожимала левую створку (СВ1) до конечного положения.

Затвор водопроводной галереи однополотный вертикального перемещения с помощью цепных передач по аналогии с ПОВ на рис. 1.2. Вращение звездочкам цепных передач затвора передается от электродвигателя привода затворов водопроводных галерей через редуктор с одним входным валом, соединенным с двигателем, и двумя выходными валами, на которых закреплены звездочки. Перемещения затворов двух водопроводных галерей синхронизируются при опорожнении камеры. Эксплуатационные положения каждого затвора: «открыт», «закрыт», «первый приспуск», «второй приспуск».

Операции первого приспуска системы опорожнения или определенный график подъема затворов обеспечивают безопасный отстой судов в камере шлюза при опорожнении камеры. Второй приспуск вводится для сокращения времени выполнения закрытия затворов, при совмещении операций ввода в шлюз и выхода судов из шлюза с частичным спуском затворов.

1.3. Светофорная сигнализация

На шлюзе предусматривается светофорная сигнализация в каждом направлении шлюзования судов («вниз» и «вверх»):

– *дальний (подходной) светофор* разрешает подход судов к причалу ожидания (на рис. 1.1 не показан);

– *промежуточный светофор* ограничивает зону причала ожидания и регулирует судоходство непосредственно на подходе к шлюзу (на рис. 1.1 не показан);

– *входной светофор* разрешает вход судна в камеру в соответствующем направлении движения (светофоры С1 и С3 на рис. 1.1);

– *выходной светофор* разрешает выход судна из камеры в соответствующем направлении (светофоры С2 и С4 на рис. 1.1).

Все светофоры бинарные: зеленый свет разрешает движение судов, красный – запрещает движение за светофор.

Работа входного и выходного светофоров должна быть согласована с положением входных и выходных ворот соответствующего направления. Должна быть предусмотрена подача команды на смену сигнала светофора в ручном и в автоматическом режимах.

1.4. Технологический процесс пропуска судов через шлюз

На шлюзе в технологическом процессе пропуска судов реализуются:

- 1) рабочее шлюзование вниз (РШН);
- 2) рабочее шлюзование вверх (РШВ);
- 3) холостое шлюзование вниз (ХШН);
- 4) холостое шлюзование вверх (ХШВ).

Технологические циклы:

- цикл № 1: «РШН — РШВ» (при встречных потоках судов из верхнего и из нижнего бьефов);
- цикл № 2: «РШН — ХШВ» (при одностороннем потоке судов из верхнего бьефа);
- цикл № 3: «ХШН — РШВ» (при одностороннем потоке судов из нижнего бьефа).
- затворы 31 и 32 перемещаются синхронно;
- пунктирными линиями со стрелками показаны переходы от технологической операции к последующей операции в соответствии с требованиями к технологическому процессу;
- продолжительности отдельных операций отображены условно без единого масштаба их изображения на диаграммах.

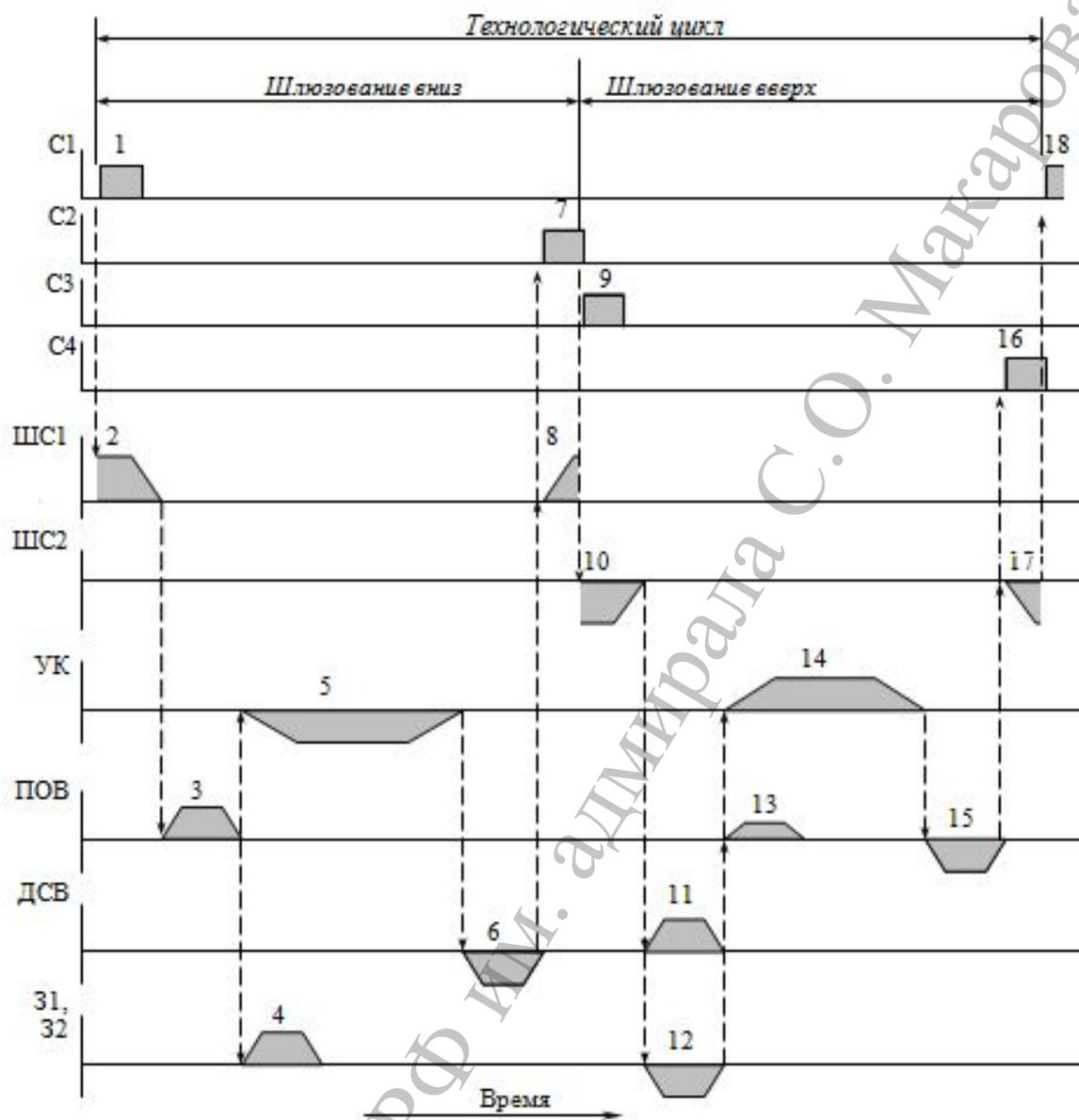


Рис. 1.4. Технологический цикл

На рис. 1.4 с помощью упрощенных диаграмм представлен цикл № 1 технологического процесса пропуска судов через шлюз. При построении диаграмм принято:

- отображаются во времени только разрешающие (зеленые) сигналы светофоров (С1, С2, С3, С4); запрещающие сигналы не отображаются (светофоры бинарные);

- состояния шлюзующихся судов (ШС1, ШС2), ворот (ПОВ, ДСВ), затворов (31, 32) характеризуются во времени с помощью графиков скоростей их движения в линейном приближении;

- скорость движения судна (ШС1) принимается положительной при шлюзовании вниз и отрицательной (для ШС2) при шлюзовании вверх;

- скорость перемещения подъемно-опускных ворот (ПОВ) и затворов (31 и 32) принимается положительной, когда они перемещаются вверх, и отрицательной, когда они перемещаются вниз;

- скорость, с которой изменяется уровень воды в камере (УК), принимается положительной при наполнении камеры, отрицательной при опорожнении камеры;

1.5. Управление механизмами и светофорами шлюза

На шлюзе применяется автоматизированная система управления технологическим процессом пропуска судов через шлюз. В ней реализуются три вида управления: местное, раздельное и цикловое.

В системе автоматизированного управления предусматриваются три уровня, на которых вырабатываются управляющие воздействия:

- первый (нижний) уровень занимают системы управления электроприводов и система управления светофорами;

- на втором уровне находится система управления, с помощью которой реализуется раздельное и цикловое управление механизмами и светофорами. Она может работать в автоматическом режиме без участия вахтенного начальника шлюза и в полуавтоматическом режиме по командам от вахтенного начальника;

- вахтенный начальник шлюза занимает третий уровень управления. В каждом конкретном случае он выбирает вид управления — местное, раздельное или цикловое.

В системах управления электроприводов и в системе управления светофорами первого уровня предусматриваются входы для приема команд (в виде двухуровневых электрических сигналов или (и) кодов на выполнение определенных действий) от систем второго и третьего уровней. В каждой системе управления первого уровня должны быть предусмотрены соответствующие органы ручного управления, для реализации местного и раздельного управления.

В системах управления должны быть предусмотрены следующие технологические блокировки:

- блокировка уровней воды, исключающая открытие ворот при разных уровнях воды камеры шлюза и бьефа;

- взаимная блокировка электроприводов ворот нижнего и верхнего бьефа, исключающая одновременную их работу и открывание, если открыты противоположные ворота;

- блокировка ворот нижней головы шлюза с затворами опорожнения камеры, допускающая открытие ворот лишь при открытых затворах;

- блокировка входного (выходного) светофора с воротами, исключающая подачу разрешающего сигнала светофора на вход в камеру (выход из камеры) судна, если ворота не занимают положение «судоходное».

Порядок выполнения технологических операций механизмами шлюза и светофорами строго определен. Поэтому алгоритмическое обеспечение систем управления обоих уровней необходимо предусмотреть в классе автоматных моделей конечных автоматов. Предпочтительна реализация систем управления на основе элементов программируемой логики с применением логических контроллеров.

2. ВЫБОР ТИПА И СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Выбор типа электропривода должен быть согласован с общими исходными данными, приведенными в разделе 1 данного пособия, и с индивидуальными исходными данными, указанными в выданном преподавателем задании на курсовое проектирование.

Выбору типа электропривода предшествуют формулировка требований к электроприводу, включая требования к защитам и к технологическим блокировкам, а также обзор существующих и перспективных приводов ПОВ.

2.1. Обзор электроприводов подъемно-опускных ворот шлюза

Выбор типа и структуры электропривода должны быть обоснованы на основе анализа достоинств и недостатков электроприводов подъемно-опускных ворот, применяемых на шлюзах в настоящее время. Должны быть учтены и, возможно, расширены требования к электроприводу, предусмотрены необходимые технологические блокировки, защиты от ненормальных режимов работы, учтены возможности применения современных средств автоматизации управления и повышения качества и удобства управления в ручном режиме.

2.2. Обоснование выбора типа проектируемого электропривода подъемно-опускных ворот

Анализ достоинств и недостатков электроприводов, применяемых в настоящее время для ПОВ шлюзов, должен быть положен в основу обоснования выбора типа электропривода, который будет разрабатываться и будет представлен электрическими схемами в курсовом проекте.

При выборе типа электропривода необходимо ориентироваться на современный элементный базис и новые разработки в области автоматизированного электропривода.

2.3. Построение структурной схемы проектируемого электропривода

Через построение структурной схемы электропривода ПОВ необходимо представить электропривод в целом, состоящим из нескольких функциональных частей, которые должны входить в состав электропривода согласно определению электропривода.

Рекомендуется использовать следующее исходное представление: *автоматизированный электропривод* (АЭП) — это электромеханическая система, содержащая электродвигательное устройство, передаточное устройство и систему управления; электропривод предназначен для приведения в движение исполнительных органов машины и управления этим движением.

На структурной схеме проектируемого электропривода должны быть конкретизированы:

- функциональные части передаточного устройства, входящие в состав кинематической цепи привода (см. п. 4.1);
- функциональные элементы силовой электрической части электропривода, включая электродвигатели;
- компоненты системы управления с обратными связями и пультом управления, на котором размещаются органы управления двустворчатыми воротами и средства отображения информации о реализуемом технологическом процессе.

3. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В электроприводе подъемно-опускных ворот (ПОВ) предусматриваются две одинаковые кинематические цепи, в состав каждой из которых входят вал рабочего электродвигателя, редуктор, открытая зубчатая передача, звездочка цепной передачи. К рабочему органу кинематической цепи отнесем подвешенное на цепи с противовесом полотно ворот. Таким образом, в состав кинематической цепи входит цепь, конец которой закреплен на верхнем углу полотна ворот.

Расчеты выполняются для одной кинематической цепи, и их результаты распространяются и на вторую кинематическую цепь.

К эксплуатационным режимам относятся:

- подъем ворот по определенной программе в положение «наполнение»;
- опускание ворот в судходное положение (открытие ворот);
- подъем ворот в рабочее положение (закрытие ворот).

Предусматривается также аварийный режим закрытия ПОВ под напором воды (при использовании ПОВ в качестве аварийных ворот).

3.1. Расчет статических нагрузок при перемещении ворот в положение «наполнение»

ПОВ перемещаются из положения «рабочее» в положение «наполнение», поднимаясь с некоторой средней скоростью V_H . При этом полотно ворот испытывает боковое давление от перепада уровней H воды в верхнем бьефе и в камере шлюза. Суммарная нагрузка $F_{СН}$ на цепную передачу привода ПОВ обусловлена силами тяжести ворот F_G , противовеса $F_{Пр}$ и цепей $F_{Ц}$, силами трения в направляющих $F_{ТН}$ и уплотнениях $F_{ТУ}$, а также нагрузкой на нижний ригель F_H . Согласно РТМ 212.0106-81 суммарная статическая нагрузка $F_{СН}$ в тяговых органах может быть определена по формуле

$$F_{СН} = K_G F_G - F_{Пр} + F_{Ц} + K_T (F_{ТН} + F_{ТУ}) \pm F_H, \quad (3.1)$$

где нагрузки F_G , $F_{Пр}$, $F_{Ц}$, $F_{ТН}$, $F_{ТУ}$, F_H (Н) обусловлены соответственно силами тяжести полотна ворот, противовесов, цепей (см. рис. 1.2), силами трения в направляющих и уплотнениях ворот и воздействием потока воды на нижний ригель ворот. Коэффициенты K_G , K_T учитывают возможные отклонения веса ворот и сил трения от расчетных (заданных) значений.

Расчет нагрузок, обусловленных весом ворот, весом противовесов и весом цепей

Принимаем в соответствии с исходными данными: $F_G = G$; $F_{Пр} = G_{Пр}$, где G — вес ПОВ; $G_{Пр}$ — вес противовесов (Н).

Если собственный вес конструкции ПОВ не задан, то он приближенно может быть определен по эмпирической формуле А. Р. Березинского

$$G = 500 \cdot S^{3/2}, \quad (3.2)$$

где S — площадь полотна ПОВ.

В приближенных расчетах можно принять: $K_G = 1,1$; $K_T = 1,2$ и $F_{Пр} = (0,6 \dots 0,8) G$.

Принимаем также $F_{Ц} = (0,03 \dots 0,05) G$.

Численные значения F_G , $F_{Гр}$ и $F_{Ц}$ согласно РТМ 212.0106-81 являются постоянными величинами. Они не зависят от высоты подъема ПОВ при перемещении ворот в положение «наполнение» и не зависят от уровня воды в камере шлюза.

Расчет нагрузок, обусловленных силами трения в направляющих и уплотнениях ворот

Нагрузка $F_{Тн}$, создаваемая силами трения в опорно-ходовых частях ПОВ, и нагрузка $F_{Ту}$, создаваемая силами трения в уплотнениях зависят от силы F_{gp} горизонтального давления воды на полотно ПОВ. В свою очередь сила F_{gp} зависит от высоты подъема ПОВ, которая изменяется от нуля до величины H_H при перемещении ПОВ из положения «рабочее» в положение «наполнение». При определенных условиях, которые будут рассмотрены ниже, на величину F_{gp} может оказывать влияние уровень воды в камере шлюза.

Расчет силы F_{gp} горизонтального давления воды на ПОВ

Обозначим через h_H высоту подъема ворот (м) при перемещении ПОВ из рабочего положения в положение «наполнение». Переменная h_H может рассматриваться как функция $h_H(t)$ времени t , иначе говоря, как некоторая заданная программа перемещения ворот (рис. 3.1).

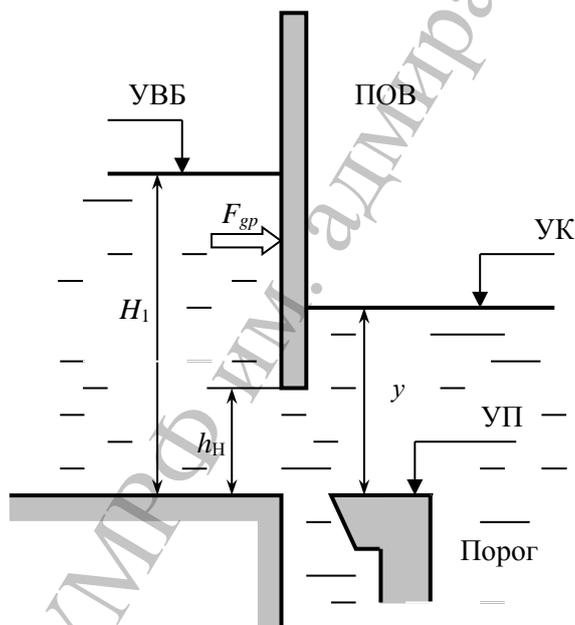


Рис. 3.1. Наполнение камеры водой

Переменная h_H определяет величину «просвета» между нижней кромкой ворот (нижним ригелем ПОВ) и порогом (королем) камеры шлюза. Максимальная величина h_H , т. е. допустимая высота подъема ПОВ при наполнении камеры, обозначена через H_H . Таким образом, переменная h_H может изменяться в пределах $0 \leq h_H \leq H_H$, причем $H_H < H_1$, где H_1 — уровень воды на пороге (задан в исходных данных).

Другой переменной величиной является уровень воды (УК) в камере шлюза. Обозначим через y величину разности уровня камеры УК и уровня порога УП. Переменная y может рассматриваться как функция $y(t)$ времени t , причем она зависит от реализации программы $h_H(t)$ и от ряда других факторов (см. рис. 1.1): уровня верхнего бьефа УВБ, напора H , длины камеры

L шлюза и др. (в курсовом проекте принимаем, что $h_H(t)$ увеличивается от нуля до H_H с постоянной скоростью V_H , заданной в исходных данных для рабочего шлюзования).

Горизонтальная сила F_{gp} давления воды на ПОВ определяется следующим образом:

$$F_{gp} = 0,5 \gamma B_B (H_1 - h_H)^2 \quad \text{при } y \leq h_H, \quad (3.3)$$

$$F_{gp} = 0,5 \gamma B_B [(H_1 - h_H)^2 - (y - h_H)^2] \quad \text{при } y > h_H, \quad (3.4)$$

где $\gamma (= 9,81 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-3})$ — удельный вес воды;

$H_1 = \text{УВБ-УП}$ — уровень воды на пороге (м) (задан по исходным условиям);

B_B — длина полотна ворот (м), принимаемая равной ширине камеры.

Выражениям (3.3) и (3.4) соответствуют два этапа наполнения водой камеры шлюза.

Этап 1. Продолжается с момента $t = 0$ начала подъема ПОВ, при котором $h_H(0) = 0$ и $y(0) = -H_2$, до момента времени t_n , при котором УК сравняется с нижней кромкой ворот: $y(t_n) = h_H(t_n) > 0$. Величина $H_2 = \text{УП-УНБ}$ есть высота порога относительно УНБ (м). При известном гидростатическом напоре H на шлюз величину H_2 можно определить следующим образом: $H_2 = H - H_1$.

Горизонтальная сила F_{gp} давления воды на ПОВ определяется на интервале времени $T_1 = [0, t_n]$ при $-H_2 \leq y \leq h_H$ по формуле (3.3).

Этап 2. Продолжается с момента времени t_n , когда УК сравнялся с нижней кромкой ПОВ ($y(t_n) = h_H(t_n)$), до момента t_H , при котором ПОВ достигают максимальной высоты подъема $h_H(t_H) = H_H$ и останавливаются в этом положении. Этот этап состоится только в том случае, если $t_H > t_n$. Тогда для всех значений h_H из диапазона $h_H(t_n) < h_H \leq H_1$ на интервале времени $T_2 = (t_n, t_H]$ горизонтальная сила F_{gp} давления воды на ПОВ должна быть рассчитана по формуле (3.4).

Выделение этапов 1 и 2 осложнено тем, что изменение во времени уровня $y(t)$ воды в камере зависит от реализуемой на шлюзе программы $h_H(t)$ подъема ПОВ, зависит также от длины L камеры шлюза, от величины напора H , от наличия и расположения в камере шлюзующегося судна и от других факторов. Поэтому аналитический расчет зависимости силы F_{gp} от h_H по формулам (3.3) и (3.4) становится возможным только при определенных допущениях.

Упрощенный расчет силы F_{gp}

Используем следующие допущения:

- ПОВ поднимаются в положение «наполнение» с постоянной скоростью $dh_H(t)/dt = V_H$;
- известно время t_V , за которое камера наполняется водой при перемещении ПОВ в положение «наполнение»;
- уровень воды в камере УК увеличивается с постоянной скоростью $dy(t)/dt = V_{УК} = H/t_V$.

Строим графики зависимости h_H и y от времени t (рис. 3.2). Возможны два варианта: 1 — быстрое наполнение камеры, 2 — медленное наполнение камеры.

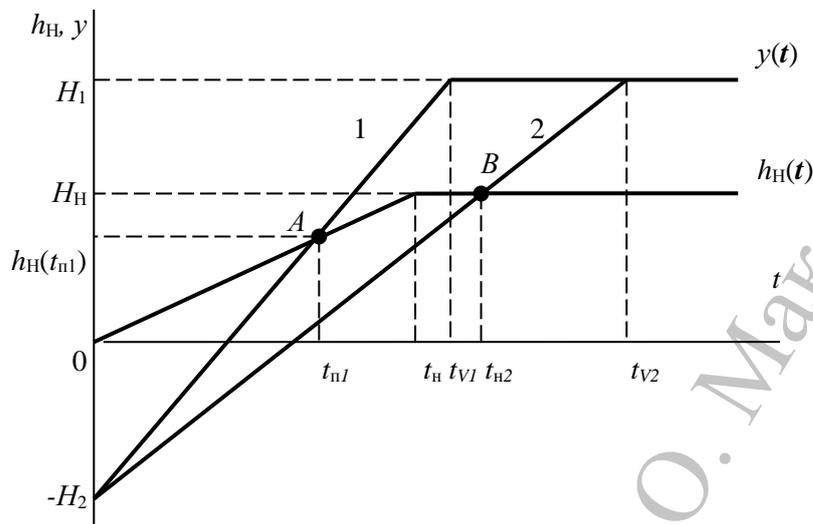


Рис. 3.2. Графики изменения положения ПОВ (h_H) и УК (y) в зависимости от времени (t) в линейном приближении:

1 — при быстром наполнении камеры; 2 — при медленном наполнении камеры

При быстром наполнении камеры водой (1) имеем: $t_V = t_{V1}$, $t_H = t_{n1} < t_H$. Графики $y(t)$, $h_H(t)$ пересекаются в точке А. Реализуются два этапа наполнения камеры, учитываемые при расчете силы F_{gp} . На интервале $0 < h_H \leq h_H(t_{n1})$ расчет F_{gp} выполняется по формуле (3.3), на интервале $h_H(t_{n1}) < h_H \leq H_H$ — расчет F_{gp} по формуле (3.4).

При медленном наполнении камеры (2) имеем: $t_V = t_{V2}$, $t_H = t_{n2} > t_H$. Графики $y(t)$, $h_H(t)$ пересекаются в точке В. Реализуется только один этап наполнения камеры — этап 1. Расчет F_{gp} выполняется на интервале $0 < h_H \leq H_H$ по формуле (3.3).

Расчет нагрузки от силы трения в опорно-ходовых частях ПОВ

Нагрузка F_{TH} от силы трения в направляющих может быть рассчитана по формуле

$$F_{TH} = \psi_1 F_{gp}, \quad (3.5)$$

где ψ_1 — коэффициент, определяемый следующим образом:

- для колесных опор $\psi_1 = 0,02 \dots 0,04$ — приведенный коэффициент сопротивления качения;
- для опор скольжения $\psi_1 = 0,2 \dots 0,3$ — коэффициент трения скольжения.

Уточнение значений ψ можно выполнить по соответствующим справочникам, располагая сведениями о конструкции колесных опор, материалах элементов опорно-ходовых частей у ПОВ, условиях работы ПОВ.

Необходимо учитывать, что сила F_{gp} зависит от переменной h_H .

Расчет нагрузки от сил трения в уплотнениях между торцами ПОВ и веревальным и створным столбами сводится к определению силы трения в уплотнениях ПОВ по формуле

$$F_{TV} = 2p(h_H) (H_1 - h_H) B_V \psi_2, \quad (3.6)$$

где B_V — ширина уплотнения, м;

ψ_2 — коэффициент трения, величина которого зависит от материала трущихся пар (для пары сталь-резина он составляет $0,3 \dots 0,5$);

$p(h_H) = 0,5\gamma (H_1 - h_H)$ — среднее значение давления воды на боковые уплотнения ПОВ (Н/м^2);

Таким образом, для расчета нагрузки от сил трения в уплотнениях можно использовать формулу, полученную из (3.6):

$$F_{\text{ТУ}} = \gamma (H_1 - h_{\text{Н}})^2 B_{\text{У}} \psi_2 \quad (3.7)$$

на интервале $0 < h_{\text{Н}} \leq H_{\text{Н}}$.

Расчет нагрузки на нижний ригель

Нагрузка на нижний ригель ПОВ зависит от конструкции нижней кромки ворот (ригеля). Эта нагрузка, создаваемая потоком воды через щель между порогом (королем) и нижней кромкой ворот, может быть положительной, называемой «подсосом», препятствующим подъему ПОВ, или отрицательной, называемой «выпором», способствующим подъему ворот. Полный расчет нагрузки на нижний ригель приводится в специальной литературе. Приближенно эту нагрузку $F_{\text{Н}}$ можно считать положительной и определить по формуле

$$F_{\text{Н}} = \gamma (H_1 - h_{\text{Н}}) B_{\text{Р}} B_{\text{В}}, \quad (3.8)$$

где $B_{\text{Р}}$ — ширина нижней кромки ПОВ ($B_{\text{Р}} = 0,2 \dots 0,3$ м);

$B_{\text{В}}$ — пролет ворот, принимаемый равным ширине камеры (м).

Расчет суммарной статической нагрузки $F_{\text{СН}}$ в тяговых органах ПОВ осуществляется по формуле (3.1) путем подстановки в нее составляющих, заданных по исходным условиям и определенных выше в виде функций от высоты подъема ПОВ в операции «наполнение».

По результатам расчетов нагрузок на тяговые органы ПОВ необходимо привести в единой системе координат графики зависимостей сил $F_{\text{ТН}}$, $F_{\text{ТУ}}$, $F_{\text{Н}}$ от высоты $h_{\text{Н}}$ подъема ПОВ и график суммарной силы $F_{\text{СН}}$, определенной по формуле (3.1). Примерный вид графиков показан на рис. 3.3.

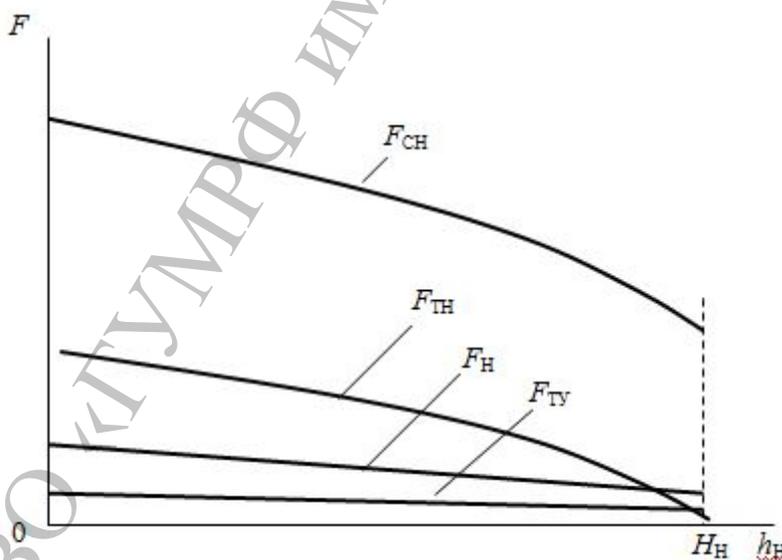


Рис. 3.3. Графики нагрузок ПОВ в режиме «наполнение»

3.2. Расчет статических нагрузок при перемещении ворот без напора воды

В эксплуатационных режимах опускания ПОВ в положение «судоходное» (открытие ПОВ из положения «наполнение») и подъема в положение «рабочее» (закрытие ПОВ из положения «судоходное») ворота перемещаются при отсутствии напора воды, поскольку уровни УВБ и УК выровнены. В первом режиме нагрузка для двигателя электропривода ПОВ будет создавать движущий момент силы, во втором — тормозной.

Нагрузка в тяговых органах при открытии (F_{CO}) и при закрытии (F_{C3}) ПОВ определяется в соответствии с выражением (3.1), в правой части которого учитываются только первые три нагрузки, и принимается вес ПОВ с учетом веса вытесненной воротами воды. Расчетная формула принимает вид:

$$F_{CO} = F_{C3} = K_G F_{GC} - F_{Пр} + F_{Ц}, \quad (3.9)$$

$$F_{GC} = (1 - \gamma / \gamma_{ст})G, \quad (3.10)$$

где $\gamma_{ст} = 75 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-3}$ — удельный вес стали.

ПОВ при открытии опускаются по вертикали на расстояние $H_H + H_3$, при закрытии поднимаются на высоту H_3 (H_3 — полная высота (м) подъема ПОВ, заданная по исходным условиям). Ворота перемещаются со средней скоростью, значительно превышающей среднее значение скорости подъема ПОВ в операции «наполнение» (примерно в десять раз).

3.3. Расчет статических нагрузок при перемещении ворот в аварийном режиме

Наиболее энергоемким аварийным режимом перемещения ПОВ является подъем ворот под напором воды из положения «судоходное» в положение «рабочее», т. е. закрытие ворот под напором. Суммарная нагрузка F_{CA} в тяговых органах ПОВ определяется для аварийного режима в соответствии с выражением (3.1) как для режима «наполнение» с той лишь разницей, что

- вместо силы F_{CH} рассматривается сила F_{CA} ;
- вместо переменной h_H при расчете сил используется переменная h_A , которая изменяется в диапазоне от 0 до H_3 , т. е. $0 \leq h_A \leq H_3$ (полная высота H_3 подъема ПОВ при закрытии ворот задана по исходным условиям);
- нагрузки F_{TH} и F_{TY} , обусловленные силами трения в направляющих и уплотнениях ПОВ, на интервале $0 \leq h_A \leq H_1$ определяются по формулам

$$F_{TH} = 0,5 \gamma (2 H_1 - h_A) h_A B_B \psi_1; \quad (3.11)$$

$$F_{TY} = \gamma (2 H_1 - h_A) h_A B_B \psi_2; \quad (3.12)$$

- нагрузка от давления воды на нижний ригель (F_H) заменяется на гидростатическую нагрузку F_{Γ} , определяемую на интервале $0 \leq h_A \leq H_1$ по формуле

$$F_{\Gamma} = \gamma (H_1 - h_A) B_h B_B, \quad (3.13)$$

где B_h — ширина верхней части ворот (м) (известна из исходных данных);

- на интервале $H_1 \leq h_A \leq H_3$ все нагрузки сохраняют постоянное значение, принятое ими при $h_A = H_1$, в частности, $F_{\Gamma} = 0$.

По результатам расчетов нагрузок на тяговые органы ПОВ необходимо привести в единой системе координат графики зависимостей сил $F_{ТН}$, $F_{ТУ}$, $F_{Г}$ от высоты h_A подъема ПОВ и график суммарной силы $F_{СА}$, определенной для аварийного режима по формуле, аналогичной формуле (3.1). Примерный вид графиков показан на рис. 3.4.

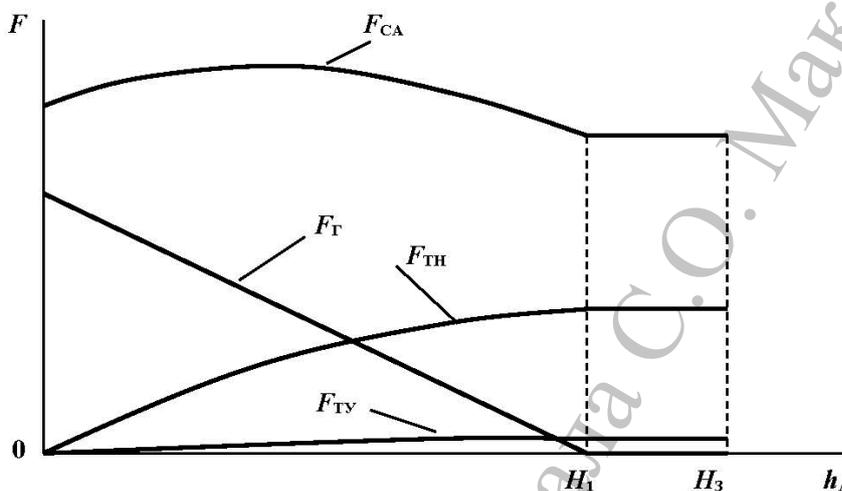


Рис. 3.4. Графики зависимостей нагрузок от высоты подъема ворот в аварийном режиме

3.4. Предварительный расчет мощности электродвигателей привода подъемно-опускных ворот

Выбору электродвигателей предшествует оценка их мощностей, необходимых для перемещения ПОВ при выполнении эксплуатационных и аварийных операций. Сравнение мощностей осуществляется по их средним значениям в каждой операции.

Предварительно определим для рассмотренных операций моменты $M_{СХ}$ статических сил $F_{СХ}$ на каждой из двух ведущих звездочек цепных передач ПОВ. Индекс «Х» может принимать значения «Н», «З», «О», «А» соответственно для операций наполнения камеры, закрытия ПОВ, открытия ПОВ и аварийного закрытия ПОВ.

В операции «наполнение» и при аварийном закрытии ворот моменты $M_{СН}$ и $M_{СА}$ зависят от величины перемещения ПОВ, соответственно, от h_N и от h_A , так как $F_{СН}$ и $F_{СА}$ являются переменными величинами. Поэтому при известной величине радиуса R_3 (м) ведущей звездочки цепной передачи

$$M_{СХ}(h_X) = 0,5 R_3 F_{СХ}(h_X) \quad (3.14)$$

и среднее значение момента

$$M_{СрХ} = \frac{1}{H_X} \int_0^{H_X} M_{СХ}(h_X) dh_X \quad (3.15)$$

где $H_X = H_N$ для операции «наполнение» и $H_X = H_A = H_3$ для аварийного закрытия ПОВ.

В операциях открытия и закрытия ПОВ моменты $M_{СО}$ и $M_{СЗ}$ не зависят от перемещения ворот и определяются в соответствии с (3.9) при постоянных значениях сил $F_{СО}$ и $F_{СЗ}$. Очевидно, что средние значения моментов $M_{СрО}$, $M_{СрЗ}$ совпадают со значениями $M_{СО}$, $M_{СЗ}$ соответственно.

Мощность (кВт), которой должен обладать электродвигатель привода ПОВ для перемещения ворот в рассматриваемых операциях, оценивается по формуле

$$P_X = \frac{M_{срX} \omega_{3X}}{1000\eta}, \quad (3.16)$$

где угловая скорость ω_{3X} (1/с) вращения ведущей звездочки цепной передачи определяется из условия

$$\omega_{3X} = \frac{V_X}{R_3} \quad (3.17)$$

Линейные скорости перемещения ПОВ принимаются: $V_X = V_H$ для операции «наполнение», $V_X = V_O = V_A = V_3$ для остальных операций (V_H и V_3 (м/с) заданы по исходным условиям); η — КПД механической передачи (принимается равным 0,9).

В табл. 3.1 приведены результаты расчетов моментов сил и мощности двигателя для операций перемещения ПОВ, выполненные для одного из вариантов исходных данных (в курсовом проекте необходимо привести аналогичную таблицу, обобщающую результаты расчета нагрузок, и использовать ее для выбора типа электропривода ПОВ и электродвигателей в составе привода).

Таблица 3.1.

Итоговые данные расчета нагрузок

Операции	Перемещение ПОВ в положение «наполнение»	Закрытие ПОВ в эксплуатационном режиме	Закрытие ПОВ в аварийном режиме
Среднее значение момента силы сопротивления, Нм	$9,35 \cdot 10^4$	$3,26 \cdot 10^4$	$11,52 \cdot 10^4$
Максимальное значение момента силы сопротивления, Нм	$11,83 \cdot 10^4$	$3,26 \cdot 10^4$	$12,43 \cdot 10^4$
Необходимая мощность двигателя, кВт	6,06	21,13	74,66

Основным типом двигателей, рекомендуемых для приводов технологических механизмов шлюза, являются крановые электродвигатели МТФ и МТКФ и металлургические двигатели МТН и МТКН переменного тока. По каталожным данным двигателей для режима ПВ = 25 % намечается к применению двигатель ближайшей меньшей мощности. При наличии каталожных данных электродвигателей только для основного номинального режима при ПВ = 40 % (приложения 2 и 3) двигатель может быть выбран по этому режиму, но расчетная мощность P_D двигателя в этом случае должна быть пересчитана на ПВ = 25 %. Можно воспользоваться приближенной формулой

$$P_D = P \sqrt{\frac{\varepsilon_{25}}{\varepsilon_{40}}}, \quad (3.18)$$

где P — мощность, определяемая по формуле (3.16), ε_{25} , ε_{40} — продолжительности включения двигателя в относительных единицах при ПВ = 25 % и ПВ = 40! %. В этом случае получим $P_D = 0,79 P$.

Для предварительно выбранного двигателя записываем синхронную частоту вращения n_0 (об/мин), максимальный момент $M_{дmax}$ (Нм), начальный пусковой момент $M_{дп}$ (Нм).

4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

4.1. Построение расчетной модели кинематической цепи привода

В состав кинематической цепи (рис. 4.1) привода входят редуктор (Р), открытая зубчатая передача (ОЗП) и цепная передача (ЦП).

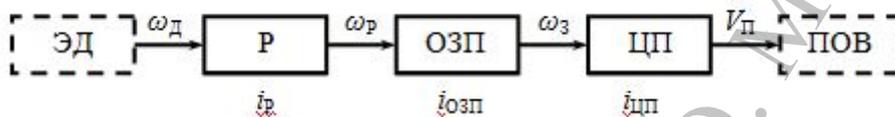


Рис. 4.1. Структурная схема кинематической цепи привода

По кинематической цепи передается механическая энергия от электродвигателя (ЭД) до полотна подъемно-опускных ворот (ПОВ). Движение элементов кинематической цепи характеризуется угловыми скоростями ω (с соответствующими индексами, как на рис. 4.1) и линейной скоростью $V_{\text{п}}$ движения полотна ПОВ. Элементы кинематической цепи имеют передаточные отношения: редуктор — $i_{\text{р}}$, открытая зубчатая передача — $i_{\text{озп}}$. Цепная передача преобразует угловую скорость вращения звездочки ω_3 в линейную скорость $V_{\text{п}}$ перемещения полотна ПОВ. Передаточное отношение цепной передачи

$$i_{\text{цп}} = \frac{\omega_3 R_3}{V_{\text{п}}} = 1, \quad (4.1)$$

где R_3 — радиус звездочки цепной передачи (известен по исходным условиям).

4.2. Расчет передаточного отношения редуктора и открытой зубчатой передачи

На данном этапе проектирования представим кинематическую цепь «редуктор – звездочка цепной передачи» следующей кинематической схемой (рис. 4.2).

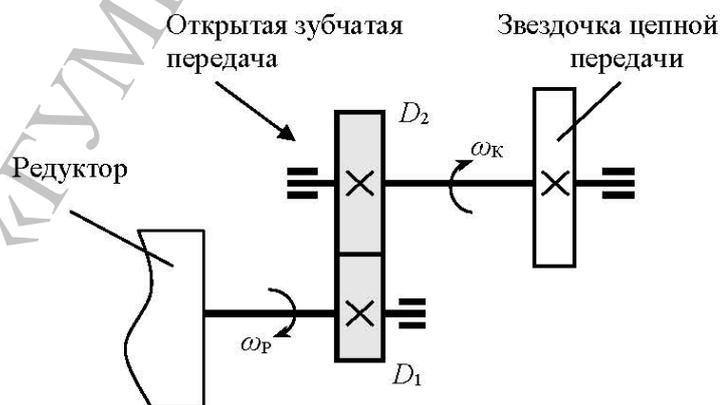


Рис. 4.2. Кинематическая схема открытой зубчатой передачи

Согласно исходным данным эксплуатационная скорость перемещения полотна ПОВ в операции наполнения ($V_{\text{п}} = V_{\text{н}}$) на порядок меньше скорости перемещения полотна ПОВ в других операциях ($V_{\text{п}} = V_3$). Поэтому, если в выбранном типе электропривода используются нерегулируемые редуктор и открытая зубчатая передача, т. е. $i_{\text{р}}$ и $i_{\text{озп}}$ являются постоянными

величинами, то тогда передаточные отношения i_p и $i_{03п}$ можно определить по наибольшей из указанных скоростей (V_3) и синхронной частоте вращения n_0 электродвигателя (см. п. 3,4) из условия

$$i_p i_{03п} = \frac{\omega_d}{\omega_3} = 0,8 \frac{\pi n_0 R_3}{30 V_3}. \quad (4.2)$$

Если вместо синхронной частоты вращения электродвигателя учитывается его номинальная скорость, то в выражение (4.2) нужно подставить ее вместо n_0 и не учитывать сомножитель 0,8.

Выражение (4.2) показывает, что передаточное отношение редуктора i_p и передаточное отношение открытой зубчатой передачи $i_{03п}$ находятся в прямой зависимости от синхронной частоты вращения n_0 двигателя, предварительно намеченного для применения в электроприводе в п. 3.4. Поэтому с целью снижения массогабаритных характеристик механической части электропривода желательно выбрать электродвигатель с малой синхронной частотой вращения n_0 поскольку $\omega_d \gg \omega_3$.

Таким образом, на данном этапе проектирования может быть выбран редуктор (по мощности) с необходимым передаточным отношением i_p и определены диаметры D_1, D_2 шестерен открытой зубчатой передачи по условию (4.2), которое представим в следующем виде:

$$i_{03п} = \frac{D_2}{D_1} \approx 0,8 \frac{\pi n_0 R_3}{30 V_3 i_p}. \quad (4.3)$$

Произведение $i_p i_{03п}$ не должно отличаться от вычисленного значения правой части выражения (4.2) более, чем на 10 %.

4.3. Определение статического момента сопротивления на валу электродвигателя

Предварительный выбор двигателя (в п. 3.4) был осуществлен по расчетной мощности (3.16) для усредненных условий работы (см. табл. 3.1). При этом не учитывались в полной мере неизбежные в реальных условиях отклонения от этих условий. Расчеты показывают (см. рис. 3.3, рис. 3.5), что величина статической силы сопротивления F и статического момента M_c этой силы существенно зависят от того, на какой высоте h_x (координата h_H или h_A) при выполнении данной операции в данный текущий момент времени находится полотно ПОВ. Для каждой расчетной операции X перемещения ПОВ статический момент $M_{cX}(h_x)$ может быть приведен к валу электродвигателя на основе формулы (3.14):

$$M_{dX}(h_x) = \frac{M_{cX}(h_x)}{\eta_3 i_p i_{03п}}, \quad (4.4)$$

где $\eta_3 = \eta_p \cdot \eta_{03п}$ представляет собой КПД зубчатых передач, равный произведению коэффициентов полезного действия редуктора (η_p) и открытой зубчатой передачи ($\eta_{03п}$). Значение КПД η_p нужно взять для выбранного редуктора. Значение $\eta_{03п}$ можно принять равным 0,92.

Формула (4.4) дает возможность привести максимальные значения моментов, приведенных в табл. 3.1), к валу электродвигателя.

5. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ, ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВОЙ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ЧАСТЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

5.1. Построение электрической схемы силовой части электропривода

Силовая электрическая часть электропривода должна быть представлена электрической принципиальной схемой, выполненной с соблюдением требований ГОСТ РФ к электрическим схемам, в частности, с использованием правильных условных обозначений элементов схемы и правильных буквенно-цифровых обозначений. При оформлении схемы необходимо руководствоваться требованиями, предъявляемыми к выпускным квалификационным в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. На лист со схемой помещается спецификация элементов с указанием типов выбранных в курсовом проекте элементов схемы.

5.2. Построение электрической схемы информационной части электропривода

Информационная часть электропривода должна быть представлена электрической функциональной схемой, в которой отражены алгоритмы управления перемещением ПОВ в положение «наполнение», положение «судходное», положение «рабочее», а также алгоритм аварийного закрытия ворот. Должны быть предусмотрены аппараты ручного управления и необходимые узлы защит и технологических блокировок.

В системе управления электропривода могут быть использованы компоненты с жесткой и с программируемой логикой. Аппаратная часть информационной системы электропривода должна быть увязана с элементами силовой части электропривода.

На лист со схемой помещается спецификация элементов с указанием типов выбранных в курсовом проекте элементов схемы.

5.3. Выбор и проверка электродвигателя

Уточнение предварительной мощности двигателя

Рассчитанную для усредненных условий работы (по нагрузкам, скоростям, временным режимам) предварительную мощность двигателя целесообразно уточнить, если при проектировании электропривода выявлены отклонения условий работы от усредненных условий.

Уточнение мощности двигателя выполняют при отклонении КПД механической передачи привода от принятого в расчетах значения и для условий работы двигателя на пониженных скоростях. В последнем случае при выборе двигателя должен быть предусмотрен определенный запас по мощности из-за ухудшения теплоотдачи.

Уточненную мощность двигателя при работе на пониженной скорости (для операции «наполнение») можно определить по приближенной формуле

$$\hat{P} = \frac{P}{\sqrt{\beta + (1 - \beta) \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}}}},$$

где P — предварительная мощность двигателя (кВт);

β — коэффициент ухудшения теплоотдачи при понижении скорости, который принимают равным 0,25...0,50 для состояния покоя открытых двигателей и 0,7 — для закрытых двигателей;

$\omega, \omega_{\text{ном}}$ — пониженная и номинальная скорости двигателя.

Выбор электродвигателя привода

Электродвигатель привода ворот шлюза выбирают по наибольшей рассчитанной мощности (табл. 3.1) для режима ПВ = 25 % с учетом принятой структуры электропривода, рода тока, скоростей движения механизмов. Выбирают по каталогу двигатель ближайшей меньшей мощности ($P_{\text{ПВ40}}$). Если каталожные данные электродвигателей приведены для основного номинального режима при ПВ = 40 %, то электродвигатель может быть выбран по этому режиму, но расчетная мощность двигателя может быть пересчитана на ПВ = 25 % по приближенной формуле

$$P_{\text{ПВ25}} = P_{\text{ПВ40}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{25}}{\text{ПВ}_{40}}},$$

где ПВ_{25} и ПВ_{40} — продолжительности включения двигателей соответственно при ПВ = 25 % и ПВ = 40 %.

Основным типом двигателей, рекомендуемых для транспортных гидротехнических сооружений, являются крановые электродвигатели переменного тока типа *МТФ*, *МТКФ* и металлургические двигатели *МТН*, *МТКН* или постоянного тока типа Д. Основной режим работы этих двигателей повторно-кратковременный при ПВ = 40 %. Предельная температура перегрева двигателей составляет 100 °С при классе изоляции *F* и 125 °С при классе изоляции *H*. Перегрузочная способность этих двигателей составляет 2,3...3,0.

Проверка выбранного электродвигателя

Пуск электродвигателя привода при любом положении по высоте полотна ворот состоит в том случае, если начальный пусковой момент $M_{\text{Дп}}$ удовлетворяет неравенству $M_{\text{Дп}} > M_{\text{Дх}}$ (см. п. 4.3) при условии допустимого снижения напряжения в сети до величины $0,9U_{\text{ном}}$ относительно номинального значения $U_{\text{ном}}$. Проверка на перегрузочную способность в этом случае выполняется по условию

$$0,8M_{\text{п}} < M_{\text{Дх}} \leq 0,8M_{\text{Дп}}, \quad (5.1)$$

где $M_{\text{п}}$ — начальный пусковой момент (Н·м) электродвигателя, ближайшего меньшей мощности по отношению к намеченному к установке двигателю;

$M_{\text{Дх}}$ — максимальный по величине статический момент сопротивления (Н·м) на валу электродвигателя, определенный по формуле (4.4) как рекомендовано в п. 4.3.

Если условие (5.1) не выполняется, следует выбрать двигатель с большим пусковым моментом $M_{\text{Дп}}$ или (и) предусмотреть меры, обеспечивающие снижение приведенного к валу электродвигателя максимального момента сопротивления $M_{\text{Дх}}$.

5.4. Выбор силовых элементов электропривода

Выбор электромеханических тормозных устройств

Электромеханические тормозные устройства применяются для удержания в неподвижном состоянии механизмов в период их бездействия и для замедления движения перед остановкой. Они представляют собой комплектные устройства, состоящие из механического тормоза и электропривода, обеспечивающего дистанционное управление тормозом.

Выбор тормозного устройства производится по тормозному моменту M_T силы, которая должна быть создана тормозом:

$$M_T \geq K_3 M_{PM}, \quad (5.2)$$

где M_{PM} — максимальный момент (Нм), создаваемый рабочим механизмом, приведенный к валу электродвигателя;

K_3 — коэффициент запаса тормоза, со значением из диапазона $1,5 \leq K_3 \leq 2,0$.

Выбор силовых резисторов

Выбор резисторов (пусковых, пускорегулирующих, регулировочных, тормозных, добавочных) для электропривода производят по эквивалентному среднему квадратическому току I_3 с соблюдением условия

$$I_3 \leq I_{ном}, \quad (5.3)$$

где $I_{ном}$ — номинальный ток резистора, т. е. допустимый ток при продолжительном режиме работы.

Для работы в кратковременном режиме эквивалентный ток

$$I_3 = I_{ЭК} = I_K \sqrt{1 - e^{-\frac{t_k}{T}}}, \quad (5.4)$$

где I_K — ток кратковременного режима; t_k , T — продолжительность включения и постоянная времени нагрева резистора.

Для работы в повторно-кратковременном режиме

$$I_3 = I_{ЭК} = I_{ПК} \sqrt{PB}, \quad (5.5)$$

где $I_{ПК}$ — ток повторно-кратковременного режима, PB — относительная продолжительность включения.

Конструктивно элементы резисторов выполняют в виде пластин, лент, спиралей. Собирают элементы в металлических конструкциях, так называемых ящиках, изолированных один от другого. На каждом ящике резисторов указывают сопротивление элементов ящика, допустимый ток при продолжительном режиме (номинальный ток) и предельно допустимую рабочую температуру.

Подбор ступеней резистора проводится таким образом, чтобы их сопротивления не отличались от расчетных не более, чем на 10 процентов.

5.5. Выбор аппаратов управления, защиты и коммутации электрических цепей

Выбор кнопок и ключей управления производят по роду и уровню напряжения, величине коммутируемого тока, количеству коммутируемых цепей, степени защиты и климатическому исполнению, механической и электрической (коммутационной) износостойкости.

Кнопки управления различаются по размерам — нормальные и малогабаритные, по числу замыкающих и размыкающих контактов, по форме толкателя, по величине и роду тока и напряжения, по степени защиты от воздействия окружающей среды. Две, три или более кнопок, смонтированных в одном корпусе, образуют кнопочную станцию.

Ключи управления имеют два или более фиксированных положений рукоятки управления и несколько замыкающих и размыкающих контактов.

Выбор рубильников, переключателей и пакетных выключателей производят по роду и величине напряжения, току нагрузки, количеству переключений, которое они допускают по условиям механической и электрической (коммутационной) износостойкости, а также конструктивному исполнению.

Рубильники типа Р и переключатели типа П изготавливаются без дугогасительных камер и могут работать только в качестве разъединителей, т. е. размыкать обесточенные электрические цепи. Рубильники и переключатели прочих типов изготавливаются с дугогасительными камерами и могут коммутировать электрические цепи под нагрузкой. Рубильники выпускаются двухполюсные для цепей постоянного тока и трехполюсные для цепей переменного тока.

Пакетные выключатели типа ПВМ рассчитаны на номинальное напряжение = 220 или ≈ 380 В, токи от 4 до 250 А, имеют количество полюсов 2 (для постоянного тока) или 3 (для переменного тока).

Выбор конечных выключателей и путевых переключателей производят с учетом напряжения, тока и конструктивного исполнения.

Конечные выключатели применяют для прямого отключения электродвигателя от сети или для отключения контактора, включающего двигатель в сеть, при достижении исполнительным механизмом предельного положения. Наибольшее распространение получили рычажные и шпindelные конечные выключатели.

Путевые переключатели предназначаются как для отключений двигателей, так и для осуществления определенных переключений в схемах по аналогии с действием командоконтроллеров. Для этого они имеют регулируемые (или сменные) кулачки. Срабатывание контактов происходит при повороте кулачкового вала, связанного с подвижными частями механизма.

Выбор контакторов и магнитных пускателей производят с учетом следующих показателей:

- характер и величина напряжений главной цепи и цепи управления (включающих катушек);
- коммутационная способность контактов и их количество;
- допустимая частота включений;
- режим работы и др.

Контакторы постоянного тока рассчитаны на номинальные токи главных контактов от 4 до 2500 А и способны отключать токи перегрузки до 7–10-кратных от номинального тока;

могут быть однополюсными или двухполюсными. Катушки этих контакторов обладают большой индуктивностью (большое количество витков), что затрудняет размыкание цепей катушек.

Контакторы переменного тока обладают особенностью — при срабатывании ток в катушке имеет повышенное значение. По этой причине ограничивается число их включений в час (обычно не более 600). Кроме того, возможны вибрация и повышенный нагрев магнитопровода из-за пульсаций магнитного потока при переменном токе.

Магнитные пускатели различаются между собой по назначению (неревверсивные и реверсивные), наличию или отсутствию тепловых реле и кнопок управления, степенью защиты от воздействий окружающей среды, уровням коммутируемых токов, рабочему напряжению главной цепи.

Бесконтактные пускатели (обычно тиристорные) и гибридные пускатели предназначены для управления двигателями (чаще всего асинхронными и синхронными). Они позволяют ограничивать пусковые токи двигателей или их моменты при пуске (называют их «мягкие пускатели» или «мягкие стартеры»).

Для коммутации силовых цепей приводов механизмов гидротехнических сооружений применяют в основном электромагнитные контакторы серии КП на постоянном токе (допускают до 1200 включений в час), а на переменном токе — контакторы серий КТ, КТД (допускают до 600 включений в час).

Выбор промежуточных реле производят по напряжению, количеству и мощности контактов, по исполнению.

Промежуточные реле используются для подготовки цепей управления к заданным операциям и для размножения контактов. Распространение получили реле серий РП и МКУ.

Выбор реле времени производят по напряжению с учетом замедления срабатывания при включении или при отключении реле.

Реле времени применяют для управления контакторами ускорения, а также в других случаях, когда требуется, чтобы между двумя операциями был определенный промежуток времени. Применяются электромеханические реле переменного тока типа ЭТ и электромагнитные и электронные реле постоянного тока типа РЭВ, ЭВ и ВЛ.

Для большинства типов реле выдержка времени может регулироваться и составлять от долей секунды до 20 секунд и более.

Выбор тепловых реле производят так, чтобы максимальный ток продолжительного режима работы реле с данным тепловым элементом был не менее номинального тока защищаемого двигателя, запас регулировки тока уставки на шкале реле должен быть небольшим в сторону увеличения, т. к. при большом запасе регулировки возможно загроуление защиты. Уставку теплового реле выбирают из диапазона от 1,2 до пятикратного значения номинального тока электродвигателя в зависимости от режима работы.

Распространение получили тепловые реле следующих типов: ТРН на номинальные токи от 3,2 до 40 А, ТРП на 25...600 А, ТРТ на 1,75...550 А. Чувствительным элементом у реле служит термобиметалл, по которому проходит ток. У реле на большие токи имеется нихромовый нагреватель для дополнительного нагрева биметалла.

Выбор реле максимального тока для защиты электродвигателей производится на основе расчета сверхтока в цепи при заклинивании двигателя и при потере фазы во время работы.

Уставка реле максимального тока при защите асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором выбирается из соотношения

$$I_{\text{УТ}} = (1,2 \dots 1,5) I_{\text{пуск}}, \quad (5.6)$$

а для асинхронных двигателей с фазным ротором и двигателей постоянного тока – по условию

$$I_{\text{УТ}} = (2,0 \dots 2,5) I_{\text{пуск}}, \quad (5.7)$$

где $I_{\text{пуск}}$ — пусковой ток двигателя.

В качестве реле максимального тока (максимального реле) применяются электромагнитные реле с последовательным присоединением обмоток в цепь двигателя. Максимальные реле типа РТ имеют пределы уставок от 0,05 до 200 А. Используются также электромагнитные или индукционные реле максимального тока серий РЭ и ИТ.

Выбор реле напряжения для контроля наличия или отсутствия напряжений и токов в электрических цепях производится с учетом допустимого отклонения напряжения в цепи от номинального значения.

Применяются реле напряжения типа РН, рассчитанные на номинальные напряжения 12...400 В, имеют пределы уставки 0,5...2,0 от номинала. Реле типа РЭВ на 12...220 В, имеют пределы уставки 0,25...0,65 от номинала.

Выбор предохранителей производят по номинальному напряжению, номинальному току (плавкой вставки и предохранителя), по отключающей способности и конструктивному исполнению, учитывая условия эксплуатации электроустановки.

Номинальный ток плавкой вставки предохранителя $I_{\text{в. ном}}$ в цепях без двигателей рекомендуется выбирать, исходя из номинального тока $I_{\text{ном}}$ защищаемого электрооборудования, т.е.

$$I_{\text{в. ном}} \geq I_{\text{ном}}. \quad (5.8)$$

При наличии двигателя в цепи плавкую вставку выбирают по условиям

$$I_{\text{в}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{a} \text{ и } I_{\text{в. ном}} \geq I_{\text{в}}, \quad (5.9)$$

где $I_{\text{пуск}}$ — пусковой ток двигателя (берется из каталога); a — коэффициент (при нормальных условиях пуска принимают $a = 2,5$; при пуске, длящемся более 10 с, берут $a = 1,6 \dots 2$).

Номинальный ток предохранителя $I_{\text{пр. ном}}$ выбирают так, чтобы $I_{\text{пр. ном}} \geq I_{\text{в. ном}}$.

Отключающая способность предохранителя определяется предельным током $I_{\text{отк}}$, который предохранитель способен разорвать без выброса пламени и дыма, без механического повреждения патрона, контактной системы и других частей, что может воспрепятствовать дальнейшей исправной работе предохранителя после замены плавкой вставки.

При выборе предохранителя по отключающей способности (отключаемому току) $I_{\text{отк}}$ должно выполняться условие

$$I_{\text{КЗ}} \geq I_{\text{отк}},$$

где $I_{\text{КЗ}}$ — действующее значение тока короткого замыкания за первый период с учетом тока двигателя (определяется аналитически).

Промышленностью выпускаются различные типы предохранителей: НПН имеет корпус из фарфора или стекла в виде полый трубки; ПН имеет корпус в форме полого параллелепипеда, заполняемого, как правило, кварцевым песком и др. Предохранители выпускаются также в виде совмещенных рубильников-предохранителей для неавтоматического отключения цепей напряжением до 500 В и защиты от токов короткого замыкания и перегрузки (аппараты

типа РПП на номинальный ток 80...250 А). Быстродействующие предохранители типа ПП, ППД используются для защиты полупроводниковых установок от коротких замыканий.

Выбор автоматических выключателей производят прежде всего по номинальным значениям напряжения и тока. Затем определяют токи уставок теплового и электромагнитного расцепителей. Автоматический выключатель не должен отключать установку при нормальных перегрузках.

Номинальный ток расцепителя $I_{р.ном}$ выключателя не должен быть меньше расчетного тока цепи:

$$I_{р.ном} \geq I_{раб}, \quad (5.10)$$

где $I_{раб}$ — рабочий (расчетный) ток цепи в длительном режиме работы электроустановки.

Ток уставки регулируемого теплового расцепителя принимается больше рабочего тока на 15...25 %, т.е. $I_{р.теп} = (1,15...1,25) I_{раб}$.

Ток уставки $I_{р.эл-м}$ регулируемого электромагнитного расцепителя определяется из следующих соображений:

– ток срабатывания электромагнитного расцепителя должен превышать ток срабатывания теплового расцепителя, т.е. $I_{р.эл-м} = (4,5...10) I_{р.теп}$;

– автомат не должен срабатывать от пускового тока двигателя электроустановки ($I_{р.эл-м} \geq (1,5...1,8) I_{пуск}$);

– автомат не должен срабатывать при максимально возможном токе в цепи $I_{макс}$, когда двигателей несколько.

Включающая способность выключателя определяется наибольшим мгновенным током включения $I_{доп}$, *отключающая способность* — действующим значением периодического тока $I_{отк}$, который выключатель может отключить, оставаясь пригодным к дальнейшей работе.

На термическую устойчивость проверяют только селективные автоматические выключатели.

На электродинамическую устойчивость проверяют только те выключатели, для которых в справочных данных специально оговорены токи электродинамической устойчивости. Остальные выключатели проверять на электродинамическую устойчивость нет необходимости.

Автоматические выключатели выпускаются на переменные напряжения от 220 до 660 В и постоянные напряжения от 110 до 440 В с ручным и электродвигательным приводом. Наибольшее применение получили автоматы серии А-3000 — наиболее распространенная сери. Напряжения: переменные 220, 380, 660 В, постоянные — 110, 220 В. Отключаемые токи от 1,6 до 110 кА.

Применяются также автоматические выключатели серий АК, АЕ, АС, АП и др.

Заключение к курсовому проекту является завершающей частью. В нем должен быть подведен итог проделанной работы, перечислены полученные результаты.

Библиографический список

1. Бакишев Р. Ф. Электропривод: Учебное пособие для академического бакалавриата / Р. Ф. Бакишев, Ю. Н. Дементьев. — Изд-во: Юрайт, 2016. — 301 с.
2. Шорин В. П. Электрооборудование гидротехнических сооружений: Учебник для вузов. / В. П. Шорин. — СПб.: СПГУВК, 2000. — 320 с.
3. Белов Б. А. Электрооборудование и электроснабжение береговых установок речного транспорта: Учебник для вузов водного транспорта / Б. А. Белов, В. С. Орлов. — М.: Транспорт: 1991. — 352 с.
4. Руководящий технический материал. Расчет и выбор электрооборудования гидротехнических сооружений. РТМ 212.0106-81. — М.: Транспорт, 1983. — 64 с.
5. Терехов В. М. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов. Под ред. В. М. Терехова. — М.: Издательский центр «Академия», 2005. — 304 с.
6. Розанов Ю. К. Электронные устройства электромеханических систем: Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / Ю. К. Розанов, Е. М. Соколова. — М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 272 с.
7. Тырва В. О. Электрические и электронные аппараты электроприводов и систем автоматики: Учеб. пособие / В. О. Тырва. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 336 с.
8. Выполнение выпускной квалификационной работы по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электропривод и автоматика»: метод. указания / сост. Н. В. Белоусова, В. Ф. Самосейко, А. В. Саушев, В. А. Шошмин; под общ. ред. А. В. Саушева. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 53 с.

Исходные данные для расчета нагрузок электропривода подъемно-опускных ворот (ПОВ)

Пара-метр	Номер варианта	1/11	2/12	3/13	4/14	5/15	6/16	7/17	8/18	9/19	10/20
G	– вес ворот, Н	6·10 ⁵	7·10 ⁵	8·10 ⁵	9·10 ⁵	9·10 ⁵	10·10 ⁵	10·10 ⁵	11·10 ⁵	11·10 ⁵	11·10 ⁵
G_p	– вес противовесов, Н	410 ⁵	510 ⁵	6·10 ⁵	7·10 ⁵	7·10 ⁵	8·10 ⁵	8·10 ⁵	9·10 ⁵	9·10 ⁵	9·10 ⁵
H_1	– уровень воды на пороге (на короле), м	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	5,5	6,0	6,0	6,5
H	– напор (гидростатический напор на шлюз), м	9,0	9,5	10,5	11,0	11,5	12,5	12,0	12,5	13,0	13,5
$B_{вв}$	– ширина камеры (пролет ПОВ), м	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,5	20,0	21,0	21,5	22,0
$H_{н}$	– полная высота подъема ПОВ при наполнении, м	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,6	2,8	2,8	2,8
H_3	– полная высота подъема ПОВ при закрытии, м	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	6,5	7,0	7,0	7,5
B_y	– ширина уплотнений (с одной стороны ПОВ), м	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,30
B_h	– ширина верхней части ПОВ, м	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2
t_v	– время наполнения камеры ПОВ, мин	9,5	10,0	10,5	11,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0
$V_{н}$	– скорость подъема ПОВ при наполнении, м/мин	0,40	0,5	0,45	0,35	0,45	0,55	0,30	0,4	0,5	0,45
V_3	– скорость подъема ПОВ при закрытии, м/мин	4,0	5,0	4,5	3,5	4,5	5,5	3,0	4,0	5,0	4,5
R_3	– радиус ведущей звездочки, м	0,20	0,25	0,30	0,20	0,25	0,30	0,25	0,30	0,35	0,30

Для вариантов с номером в знаменателе вес ворот и противовесов увеличить на 10 %, ширину камеры увеличить на 10 %.
 Для нечетного номера варианта использовать опоры скольжения, для четного номера варианта – опоры качения.

Краново-металлургические двигатели переменного тока с фазным ротором: 380 В, 50 Гц, ПВ = 40 %

№ п/п	Тип двигателя	P, кВт	N, об/мин	I ₁ , А	cosφ	I ₂ , А	I _{кх} , А	M _{max} , Н·м	r ₁ , Ом	X ₁ , Ом	r ₂ , Ом	X ₂ , Ом	E _{2к} , В	J, кг·м ²
1	4MTF(H) 112L6	2,2	830	7,2	0,76	11,0	5,51	55	2,97	3,11	0,565	0,113	144	0,035
2	4MTF(H) 112LB6	3,7	900	11,2	0,79	13,8	7,7	88	1,55	1,92	0,462	0,217	190	0,045
3	4MTF(H) 132L6	5,5	915	14,2	0,74	18,3	8,96	135	1,07	1,30	0,306	0,264	213	0,09
4	4MTF(H) 112LB6	7,5	935	18,2	0,77	20,7	11,1	190	0,68	0,98	0,300	0,292	242	0,11
5	4MTF(H) 160L6	11,0	910	32,0	0,76	41,0	23,5	325	0,35	0,59	0,072	0,054	179	0,23
6	4MTF(H) 160LB6	15,0	930	39,0	0,77	48,0	25,6	460	0,236	0,42	0,073	0,080	213	0,28
7	4MTF(H) 200L6	22,0	935	55,0	0,79	60,0	39,7	638	0,235	0,27	0,054	0,098	235	0,57
8	4MTF(H) 200LB6	30,0	935	75,0	0,78	73,0	37,3	932	0,132	0,33	0,040	0,089	235	0,68
9	4MTF(H) 225M6	37,0	965	78,0	0,818	77,0	37,2	1000	0,100	0,217	0,048	0,147	293	0,90
10	4MT(H) 222L6	56,0	970	115,0	0,90	115,0	55,9	1530	0,053	0,142	0,036	0,136	290	1,02
11	4MT(H) 280S6	75,0	970	142,0	0,89	178,0	51,1	2160	0,041	0,13	0,019	0,066	270	3,30
12	4MT(H) 280M6	110,0	975	205,0	0,89	160,0	70,0	3490	0,025	0,08	0,024	0,130	420	4,10
13	4MTF(H) 160L8	7,5	695	25,0	0,73	22,0	19,2	248	0,48	1,08	0,095	0,272	227	0,23
14	4MTF(H) 160LB8	11,0	705	38,0	0,74	39,0	29,2	400	0,265	0,67	0,096	0,083	185	0,29
15	4MT(H) 200L8	15,0	710	42,0	0,71	49,0	29,8	569	0,235	0,51	0,082	0,083	206	0,62
16	4MTH 200LB8	22,0	715	57,0	0,70	59,0	37,3	800	0,14	0,31	0,08	0,114	241	0,74
17	4MTH 225M8	30,0	720	74,6	0,72	71,0	46,7	1030	0,14	0,267	0,051	0,154	252	1,07
18	4MTH 225L8	37,0	725	87,4	0,74	79,0	52,3	1390	0,10	0,20	0,049	0,154	302	1,43
19	4MTH 280S8	55,0	720	112,0	0,84	170,0	70,1	2160	0,049	0,19	0,017	0,064	196	4,30
20	4MTH 280M8	75,0	725	154,0	0,82	165,0	92,3	2940	0,03	0,12	0,017	0,072	277	5,20
21	4MTH 280L8	90,0	730	179,0	0,84	162,0	130,1	3470	0,043	0,11	0,021	0,094	355	6,30
22	4MTH 280S10	45,0	576	103,0	0,76	146,0	57,8	1940	0,061	0,23	0,017	0,017	181	4,30
23	4MTH 280M10	60,0	580	124,0	0,76	135,0	70,6	2670	0,047	0,165	0,020	0,043	239	5,20
24	4MTH 280L10	75,0	582	166,0	0,77	142,0	89,5	3480	0,031	0,117	0,024	0,092	308	6,30
25	4MTH 335S10	110,0	584	266,0	0,70	250,0	155,0	4560	0,019	0,078	0,012	0,044	272	10,2
26	4MTH 335M10	132,0	585	315,0	0,68	250,0	183,0	5690	0,014	0,064	0,014	0,114	327	12,8
27	4MTH 335SL10	160,0	586	392,0	0,61	245,0	247,0	7310	0,012	0,048	0,015	0,154	408	15,0

**Краново-металлургические двигатели постоянного тока параллельного возбуждения:
220 В (п. 1-20) и 440 В (п. 21-29) при ПВ = 40 %**

№ п/п	Тип двигателя	P , кВт	n , об/мин	I_1 , А	R , Ом	J , кг·м ²
1	Д12	2,4	1230	14	1,13	0,06
2	Д21	3,6	1080	21	0,66	0,12
3	Д22	4,8	1150	26	0,37	0,15
4	Д31	6,8	880	37	0,332	0,30
5	Д32	9,6	800	57	0,189	0,42
6	Д41	13,0	720	70	0,106	0,80
7	Д806	17,0	710	84	0,067	1,00
8	Д808	24,0	630	112	0,034	2,00
9	Д810	35,0	600	148	0,023	3,60
10	Д812	47,0	565	192	0,014	7,00
11	Д814	70,0	560	230	0,008	10,26
12	Д816	85,0	535	350	0,007	16,20
13	Д818	106,0	470	415	0,004	22,50
14	Д21	4,4	1500	25	0,360	0,12
15	Д22	6,5	1570	34	0,200	0,15
16	Д31	9,5	1420	51	0,137	0,30
17	Д32	13,5	1240	68	0,086	0,42
18	Д41	18,0	1160	91	0,043	0,80
19	Д806	23,0	1060	110	0,031	1,00
20	Д808	30,0	825	134	0,018	2,00
21	Д21	3,1	1300	10	2,400	0,12
22	Д31	5,2	910	15	1,750	0,30
23	Д41	12,5	720	34	0,470	0,80
24	Д808	24,0	630	56	0,140	2,00
25	Д810	35,0	600	74	0,094	3,60
26	Д812	45,0	570	92	0,066	7,00
27	Д814	66,0	560	138	0,032	10,25
28	Д816	85,0	540	175	0,022	16,25
29	Д818	100,0	470	205	0,026	22,50

Ориентировочные значения момента инерции муфт

Мощность электродвигателя, кВт	J , кг·м ²	Мощность электродвигателя, кВт	J , кг·м ²
1,4 – 7,5	0,03 – 0,10	30 – 80	0,52 – 1,12
7,5 – 30	0,10 – 0,52	80 – 160	1,12 – 7,65

Цилиндрические трехступенчатые редукторы

№ п/п	Тип редуктора	n , об/мин	P , кВт	i	η
1	ВК-350	1500	4	13,20	0,90
2	ВК-350	1500	8	43,50	0,91
3	Ц2-300	1500	10	9,80	0,91
4	Ц2-500	1500	15	19,88	0,92
5	Ц2-350	1500	20	16,80	0,92
6	ВК-400	1500	30	21,50	0,92
7	ВК-400	1500	30	40,00	0,92
8	ВК-420	1500	40	38,00	0,93
9	ВКП-420	1500	40	59,00	0,93
10	ВК-350	1000	4	10,00	0,90
11	Ц2-350	1000	10	7,00	0,91
12	ВК-400	1000	10	15,98	0,91
13	ВК-350	1000	18	14,00	0,92
14	Ц2-450	1000	22	23,00	0,93
15	Ц2-350	1000	20	50,94	0,92
16	Ц2-300	1000	30	19,88	0,92
17	ВК-800	1000	28	31,80	0,92
18	ВК-350	1000	40	14,67	0,93
19	Ц2-400	1000	48	32,80	0,93
20	Ц2-400	1000	60	30,00	0,94
21	Ц2-450	1000	75	32,30	0,94
22	Ц2-300	750	10	12,00	0,91
23	ВКН-560	750	10	21,00	0,91
24	ВК-450	750	20	29,60	0,92
25	ВК-400	750	25	75,00	0,92
26	ВКН-420	750	40	25,94	0,93
27	Ц2-350	750	50	32,00	0,93
28	ВКН-420	600	160	20,00	0,94
29	Ц2-750	600	60	33,00	0,93
30	Ц2-500	600	155	24,20	0,95
31	Ц2-550	600	200	23,00	0,95

Приложение 6

Тормозы типа ТКП с короткоходовыми электромагнитами типаМП

№ п/п	Тип тормоза	Максимальный ход якоря, мм	Тяговое усилие, Н (ПВ = 40 %)	Тормозной момент, Нм (ПВ = 40 %)
1	ТКП-100	3,0	230	16
2	ТКП-200/100	3,0	230	32
3	ТКП-200	4,0	780	125
4	ТКП-200/300	4,0	780	190
5	ТКП-300	4,5	1650	420
6	ТКП-400	3,0	7800	1200
7	ТКП-500	3,5	9800	1800
8	ТКП-600	4,0	15200	5000
9	ТКП-700	4,5	21100	5750
10	ТКП-800	5,0	29400	9100

Приложение 7

Тормозы типа ТКГ с гидравлическими толкателями типа ТЭ (ТГМ)

№ п/п	Тип тормоза	Ход штока, мм	Тяговое усилие, Н	Тормозной момент, Нм
1	ТКГ-160	25	160	100
2	ТКГ-200М	32	250	300
3	ТКГ-300М	50	500	800
4	ТКГ-400М	50	800	1500
5	ТКГ-500М	50	800	2500
6	ТКГ-600	60	1600	5000
7	ТКГ-700	90	1600	8000
8	ТКГ-800	140	1600	12500