

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання контрольних робіт з дисципліни  
«ОСНОВИ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА»**

для студентів спеціальності 151

«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

денної та заочної форм навчання

Затверджено  
на засіданні  
кафедри АВП  
Протокол № 3 від 03.01.2018

Краматорськ, 2018

УДК 669.18.621.3

Методичні вказівки до виконання контрольних робіт з дисципліни «Основи теорії електроприводу» для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання / Укл.: О.В. Разживін – Краматорськ: ДГМА, 2018– с. 48.

Використовуються методичні вказівки, а також вимоги до виконання, вмісту та оформлення контрольної роботи з дисципліни «Основи теорії електроприводу».

Укладач

О.В. Разживін, доцент каф. АВП

Відпов. за випуск

О.В. Суботін, к.т.н., зав. каф. АВП

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр
1 ЗАДАЧИ РГР	6
2 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РГР	6
3 СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ И ГРАФИЧЕСКОЙ РГР	7
4 КРАТКИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	9
4.1 Расчет электропривода механизма подъема мостового крана	9
4.2 Расчет электропривода привода главного движения токарного станка	18
4.3 Построение пусковой диаграммы и механических характеристик электропривода в рабочих и тормозных режимах	29
4.4 Синтез схем конечных автоматов системы автоматического управления пуском/торможением электродвигателя	38
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	45

## 1 ЗАДАЧИ РГР

Курсовая работа является этапом самостоятельного изучения и проектирования основных элементов электропривода. Задачами РГР являются:

1. Закрепление и углубление студентами знаний, полученных при изучении теоретического курса «Основы теории электропривода»;
2. Обучение студентов творческому и самостоятельному анализу существующих систем электроприводов с целью оптимального их выбора с учетом экономических показателей и технического прогресса в конкретных условиях эксплуатации;
3. Обучение студентов навыкам по использованию справочной литературы, ГОСТов, технической литературы, необходимой для дипломного проектирования и будущей инженерной деятельности.

## 2 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РГР

Расчетно-пояснительная записка выполняется в форме пояснительной записки на листах формата А4 (210×297). Порядок следования разделов должен соответствовать п. 3. Все расчеты должны выполняться с приведением расчетных формул и подстановкой в них цифровых данных, с указанием результатов, их единиц измерения в системе СИ. Текст пояснительной записки необходимо писать четко черными чернилами или выполнять в машинописном виде с помощью ПЭВМ. Схемы, рисунки, таблицы приводятся в тексте по ГОСТам. В конце записки приводятся перечень ссылок на литературу, которую студент использовал при выполнении работы.

Расчет, построение графиков и зависимостей рекомендуется осуществлять с помощью прикладного математического программного пакета MathCAD.

### 3 СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ И ГРАФИЧЕСКОЙ РГР

*Расчетно-пояснительная записка должна включать следующие разделы:*

#### ВВЕДЕНИЕ

#### 1 ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО МОЩНОСТИ

1.1 Статическая нагрузочная диаграмма

1.2 Предварительный выбор электродвигателя по мощности и скорости

1.3 Динамическая нагрузочная диаграмма электропривода

1.4 Проверка выбранного электродвигателя по нагреву

1.5 Проверка выбранного электродвигателя по условиям допустимой перегрузки

#### 2 МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

2.1 Расчет и построение естественной и рабочей механических характеристик электропривода в двигательном режиме работы при движении «Вперед» «Назад». Определение величины рабочего напряжения, статизма электропривода.

2.2 Определение максимально возможного диапазона регулирования скорости привода при изменении питающего напряжения

2.3 Определение диапазона регулирования для указанного в техническом задании статизма. Обоснованием способа снижения статизма и приведением необходимой структурной схемы привода (для двигателей постоянного тока)

2.4 Расчет и построение статической пусковой диаграммы электропривода

2.4.1 Определение количества пусковых ступеней и секций, величин их сопротивлений

2.4.2 Расчет и построение механических характеристик привода в тормозных режимах (противовключением, динамическое торможение). Определение величин сопротивлений тормозных секций

### 3 ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

3.1 Расчет и построение графиков переходных процессов  $\omega(t)$  и  $i(t)$  при разгоне электропривода от нулевой начальной скорости до рабочей  $\omega_p(t)$

3.2 Расчет и построение графиков переходных процессов  $\omega(t)$  и  $i(t)$  при переводе привода из положения «Вперед» с рабочей скоростью  $\omega_p(t)$  в положение «Назад» для получения скорости  $-\omega_{max}$

3.3 Расчет и построение графиков переходных процессов  $\omega(t)$  и  $i(t)$  при торможении электропривода с номинальной нагрузкой

### 4 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

#### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

*Графическая часть РГР должна содержать:*

Лист 1 (формат А4).

1. Совмещенные статическую и динамическую нагрузочную диаграмму;
2. Совмещенные графики статических и динамических пусковых диаграмм электропривода в прямом и реверсивном состоянии работы

Лист 2 (формат А4).

1. Функциональная электрическая схема автоматизированного электропривода
2. Совмещенные графики механических характеристик и электромеханических переходных процессов электропривода при пуске и торможении

## 4 КРАТКИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

### 4.1 Расчет электропривода механизма подъема мостового крана

Стандартизированная для предварительно принятого тяжелого режима (5М) нагрузочная диаграмма работы механизма подъема включает следующие операции (рис. 4.2):

- 1) Подъем груза массой  $Q_H$  на высоту  $H$  за время  $t_{p1}$ ;
  - 2) Остановка механизма на время  $t_{o1} = t_{p1}$  перемещение груза по цеху;
  - 3) Опускание груза массой:  $Q_H$  с высоты  $H$  за время  $t_{p2} = t_{p1}$ ;
  - 4) Остановка механизма на время  $t_{o2} = t_{p1}$  разгрузки;
  - 5) Подъем крюковой подвески массой  $Q_0 = 0,2Q_H$  за время  $t_{p3} = t_{p1}$ ;
  - 6) Остановка механизма подъема на время  $t_{o3} = t_{p1}$  перемещения груза к месту загрузки;
  - 7) Опускание крюковой подвески массой  $Q_0 = 0,2Q_H$  за время  $t_{p4} = t_{p1}$ ;
  - 8) Остановка механизма на время  $t_0 = t_{p1}$  загрузки;
- Далее последовательность операций 1...8 повторяются.

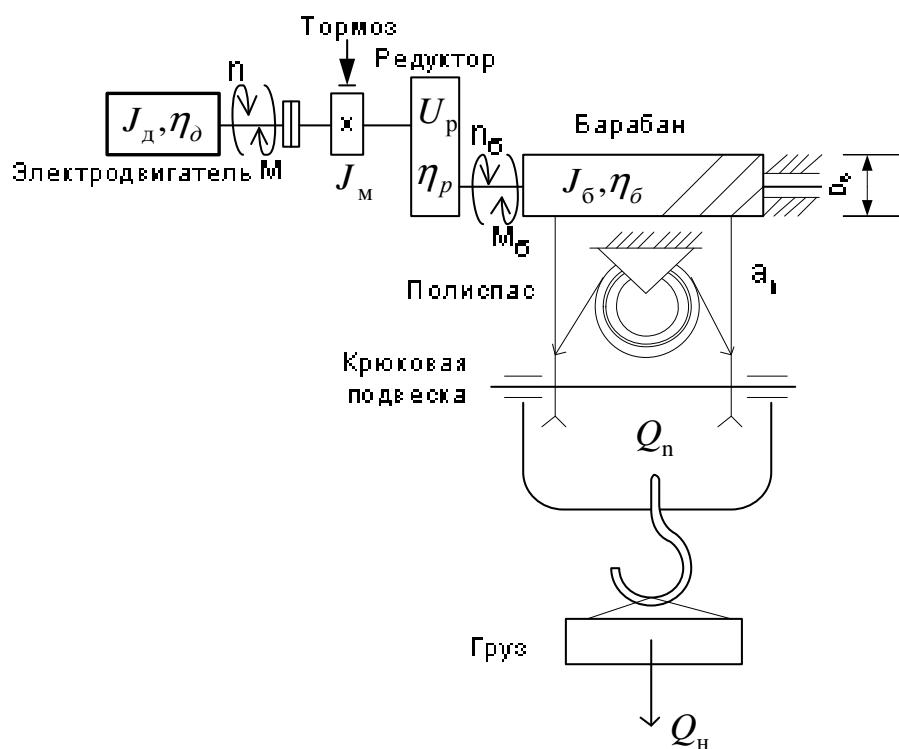


Рисунок 4.1 – Кинематическая схема механизма подъема мостового крана

Для упрощения скорость подъема и опускания принимается неизменной (электродвигатель имеет достаточно жесткую характеристику), поэтому время подъема и опускания в статике определяются так:

$$t_{p_1} = t_{p_2} = \dots t_{p_j} = \frac{H}{v_n} \quad (4.1)$$

Время  $t_0$  остановки механизма подъема для вариантов

$$t_0 = t_p \quad (4.2)$$

Продолжительность цикла, с,

$$t_4 = \sum_{j \in 4} t_{p_j} + \sum_{j \in 4} t_{0_j} = t_{p_1} + t_{p_2} + t_{p_3} + t_{p_4} + 4t_0 \quad (4.3)$$

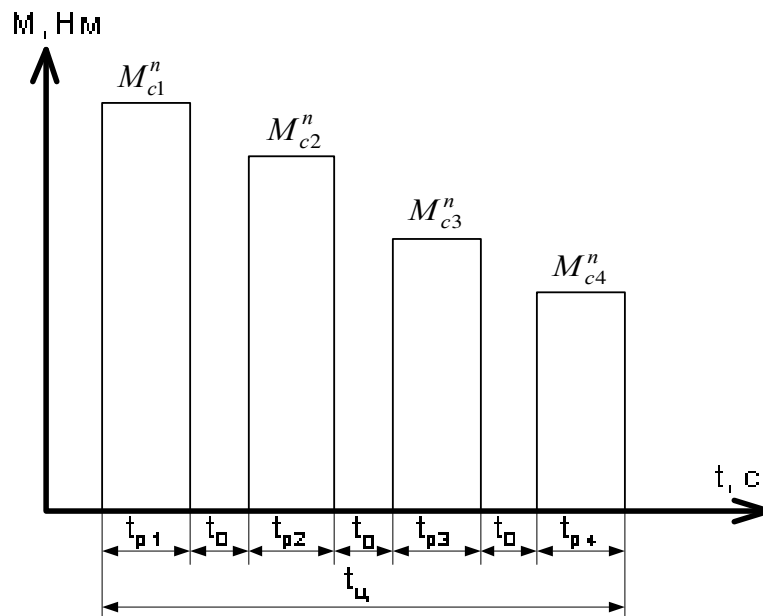


Рисунок 4.2 – Статическая нагрузочная диаграмма механизма подъема мостового крана

Продолжительность включения механизма в статике, т.е. без учета динамических режимов

$$ПВ = \frac{\sum t_{p_j}}{t_{ц}} 100\% . \quad (4.4)$$

Статический момент на валу электродвигателя при подъеме грузов, различных по массе определяются по формуле

$$M_{cj}^П = \frac{K_3 Q_H D_0^{9,8}}{2i_m \eta_m} , \quad (4.5)$$



где  $K_3$  - коэффициент загрузки,  $K_3 = \frac{Q}{Q_H}$ ;  $i_M$  - общее передаточное число механизма;

$$j = 1, 3, 5, 7 \dots 15$$

Статический момент на валу двигателя при различных по массе грузов

$$M_{cj}^C = \frac{K_3 Q_H D_0 9,8 \eta_M}{2 i_M} \quad (4.6)$$

где  $j = 2, 4, 6, 8, \dots, 16$ .

Статическая нагрузочная диаграмма, рассчитанная по исходным данным и формулам (4.1), (4.2), (4.5), (4.6), строится в соответствующем масштабе.

Мощность электродвигателя с ближайшей стандартной продолжительностью включения  $ПВ_{ст}$  выбирается из условия подъема номинального груза по расчетам мощности:

$$P_{расч} = \frac{Q_H v_H 10^3}{102 \eta_M}, \quad (4.7)$$

где  $Q_H$  - номинальная грузоподъемность, т;  $v_H$  - скорость подъема, м/с;  $\eta_M$  - КПД механизма;  $\eta_M = \eta_p \eta_0 \eta$ ;  $\eta_p$  - КПД редуктора;  $\eta_0$  - КПД барабана;  $\eta_{II}$  - КПД полиспаста.

Если расчетная ПВ по формуле (4.4) отличается от стандартных, а  $t_y < 10 \text{ мин}$ , то расчетная мощность приводится к стандартной  $ПВ_{ст}$ :

$$P'_{расч} = P_{расч} \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}}}. \quad (4.9)$$

Условие предварительного выбора двигателя по мощности соответствующей  $ПВ_{ст}$ :

$$P_H = P'_{расч}. \quad (4.10)$$

Если  $t_y < 10 \text{ мин}$ , то выбирается двигатель со стандартной  $ПВ=100\%$  по условию  $P_{H(100\%)} \geq P'_{расч}$ .

Здесь предварительно проверяется двигатель по перегрузочной способности:

$$M_{\max} \geq M_{c\max}, \quad (4.11)$$

где  $M_{\max}$  - максимальный момент выбранного двигателя, Н·м;  $M_{c\max}$  - максимальный статический момент из статической нагрузочной диаграммы Н·м.

Номинальная частота вращения вала двигателя выбирается из условия

$$n_n = n_p = \frac{60v_{iM}}{\pi D_6}. \quad (4.12)$$

Паспортные данные двигателя, выбранные по [2] приводятся в табличном виде.

При построении динамической нагрузочной диаграммы учитываются динамические моменты  $M_d$  на валу двигателя во время  $t_{II}$  пуска и  $t_T$  торможения.

При многоступенчатом запуске электродвигателя динамический момент

$$M_d = M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.13)$$

изменяется от максимального  $M_1$  до минимального  $M_2$  по сложному закону [3]. Поэтому в инженерных расчетах динамический момент при пуске принимают равным среднему:

$$M_{II} = \frac{M_1 - M_2}{2} \quad (4.14)$$

где  $M_1 = \psi_1 M_n$  - максимальный пусковой момент, Н·м;  $\psi_1$  - кратность максимального пускового момента;  $M_n$  - номинальный (максимальный) статический момент нагрузки, Н·м;  $M_2 = \psi_2 M_n$  - минимальный пусковой момент (момент переключения), Н·м;  $\psi_2$  - кратность минимального пускового момента:  $\psi_2 = 1.1 - 1.4$ .

Кратность  $\psi_1$  максимального пускового момента принимается в зависимости от режимов работы (табл. 4.1) [7, 13].

Значение кратности пускового момента

Режим работы	(Л) 1М, 2М	(С) 3М, 4М	(Т) 5М	(ВТ) 6М	(Н) М5
$\psi_1$	1,25	1,6	2,0	2,5	3,2

Режимы работы электрооборудования и механизма подъема крана определяется по таблице 4.1 [2].

Время  $t_{II}$  пуска привода при подъеме и опускании груза

$$t_{IIj} = \frac{J_{\Sigma} \omega_p}{M_{IIj} \mp M_{Cj}}, \quad (4.15)$$

где  $J_{\Sigma}$  - суммарный момент инерции движущихся и вращающихся масс, приведенный к валу двигателя, при подъеме или опускании груза,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $\omega_p$  - угловая скорость вращения вала двигателя,  $\text{рад/с}$ ;  $M_{Cj}$  - статический момент на валу двигателя при подъеме или опускании груза  $M_{Cj} = M_{Cj}^{II}$ , (4.5) или  $M_{Cj} = M_{Cj}^C$  (4.6).

Знак «минус» соответствует пуску при подъеме груза, знак «плюс» - опускании груза.

Суммарный приведенный момент инерции

$$J_{\Sigma} = K_J (J_d + J_M) + \frac{Q_{\sigma} \cdot D_{\sigma}^2}{4v_p^2 \eta_M} + \frac{91mv_n^2}{n_p^2 \eta_M}, \quad (4.16)$$

где  $K_J$  - коэффициент, учитывающий моменты инерции масс деталей, вращающихся медленнее, чем вал двигателя (шестерен редуктора, соединительных муфт, валов и др.),  $K_J = 1,2 - 1,3$  [7, 8];  $m$  - масса поступательно движущихся масс (масса груза),  $\text{кг}$ ;  $n_p$  - рабочая частота вращения вала двигателя,  $\text{об/мин}$ ;

$$n_p = \frac{60v_n i_M}{\pi D_{\sigma}}; \quad (4.17)$$

$J_d$  - момент инерции ротора двигателя,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $J_d = \frac{G_M D_{\sigma}^2}{4}$ ;  $G_M D_{\sigma}^2$  - маховый мо-

мент ротора двигателя по паспортным данным, кг·м<sup>2</sup>;  $J_m$  - момент инерции муфты с тормозным шкивом, кг·м<sup>2</sup>,  $J_m = \frac{G_m D_m^2}{4}$ ;  $G_m D_m^2$  - маховый момент инерции муфты с тормозным шкивом, кг·м<sup>2</sup>.

Время электрического торможения механизма подъема, с.

$$t_{Tj} = \frac{J_{T\Sigma} \omega_p}{M_{Tj} \mp M_{Cj}}, \quad (4.18)$$

где  $J_{T\Sigma}$  - суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции при торможении, кг·м<sup>2</sup>.

$$J_{T\Sigma} = K_J (J_d + J_M) + \frac{Q_{\bar{\sigma}} \cdot D_{\bar{\sigma}}^2}{4v_p^2} \eta_M + \frac{91mv_H^2}{n_p^2} \eta \quad (4.19)$$

Тормозной момент, Н·м,

$$M_{Tj} = K_T M_H, \quad (4.20)$$

где  $K_T$  - коэффициент запаса торможения, принимаемый в зависимости от режима работы (табл. 4.2 [7]).

Знак «плюс» в формуле (4.18) соответствует торможению при подъеме груза, «минус» - опусканию.

Таблица 4.2

Значение коэффициента  $K_T$

Режим работы	(Л) 1М, 2М	(С) 3М, 4М	(Т) 5М	(ВТ) 6М
$\psi_1$	1,25	1,6	2,0	2,5

Рассчитанная по формулам (4.14)-(4.20), исходным данным, статической диаграмме (см. рис. 4.2) строится динамическая диаграмма, примерный вид которой (совмещенной с диаграммой скоростей) приведен на рис.4.3. На этой диаграмме для удобства масштаб времени по сравнению с рис. 4.2 увеличен вдвое. Из диаграммы на рис. 4.3 видно, что время работы электропривода при каждом включении увеличилось на время  $t_{Pj} + t_{Tj}$  а время  $t_0$  отключения на эту величину уменьшилось.

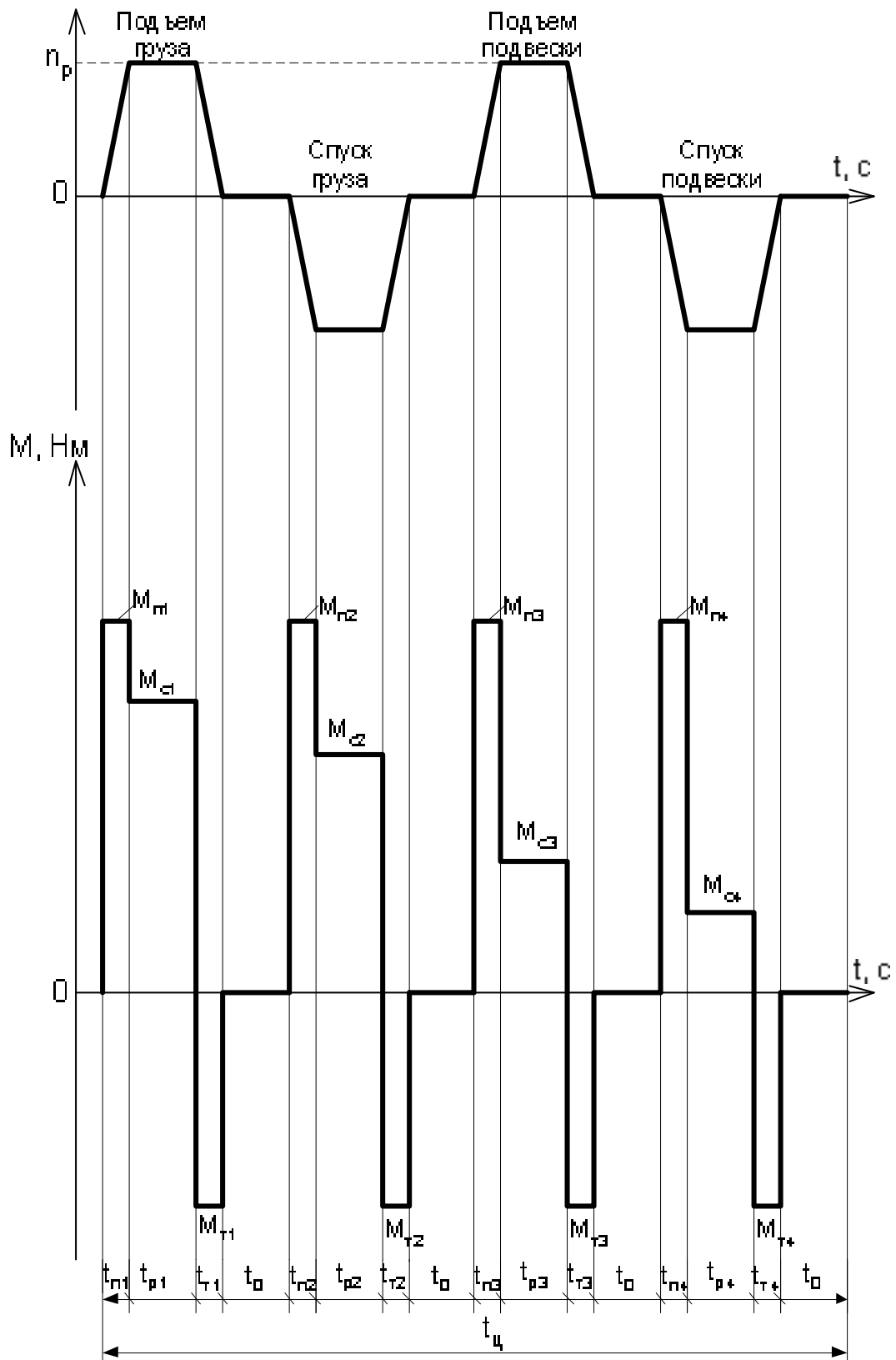


Рисунок 4.3 – Динамическая нагрузочная диаграмма электродвигателя механизма подъема мостового крана, совмещенная с диаграммой скоростей

Уточненное значение продолжительности включения:

$$ПВ_y = \frac{\sum (t_{P_j} + t_{П_j} + t_{T_j})}{t_{ц}} 100\% \quad (4.21)$$

Число циклов в час:

$$N = \frac{3600}{t_{ц}} \quad (4.22)$$

С учетом формул, (4.21) и (4.22) уточняется режим работы.

Проверочный расчет электродвигателя по мощности сводится к расчету его нагрева. Для каждого типа электродвигателя существует допустимая температура нагрева, зависящая от класса изоляции его обмоток и других токоведущих частей [2]. Однако точный тепловой расчет электрических машин, работающих в нестационарных режимах с изменяющимися условиями охлаждения, чрезвычайно сложен. Поэтому в инженерной практике используются более простые методы расчета, например, метод эквивалентного (среднеквадратичного) тока (момента), метод эквивалентной мощности и др. [3, 4, 6, 8]. При наличии динамической нагрузочной диаграммы и незначительном изменении скорости вращения вала двигателя в статических режимах удобнее использовать метод эквивалентного момента. По данным динамической нагрузочной диаграммы определяется эквивалентный момент за цикл работы, Н·м.

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum M_{П_j}^2 \cdot t_{П_j} + \sum M_{C_j}^2 \cdot t_{C_j} + \sum M_{T_j}^2 \cdot t_{T_j}}{\beta_{П} \sum t_{n_j} + \sum t_{P_j} + \beta_{T} \sum t_{T_j}}}, \quad (4.23)$$

где  $M_{П}$  - средний пусковой момент, Н·м;  $M_{C_j}$  - момент сопротивления на валу двигателя в  $j$ -м включении, Н·м;  $M_{T}$  - тормозной момент, Н·м;  $t_{П_j}$  - время пуска при  $j$ -м включении, с;  $t_{P_j}$  - время работы при  $j$ -м включении, с;  $t_{T_j}$  - время торможения при  $j$ -м включении, с;  $\beta_{П}, \beta_{T}$  - коэффициенты, учитывающие ухудшение условий охлаждения двигателя при пусках и торможениях,  $\beta_{П} = \beta_{T} \approx 0,5$ .

Эквивалентная мощность, соответствующая  $M_{\text{э}}$  и расчетной  $ПВ$ , кВт

(4.21),

$$P_{\text{э}} = \frac{M_{\text{э}} n_p}{9550} \quad (4.24)$$

Выбранный двигатель не будет нагреваться выше допустимой температуры, если

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{э}} \sqrt{\frac{ПВ_{\text{у}}}{ПВ_{\text{см}}}} \quad (4.25)$$

Выбранный по мощности двигатель проверяется по перегрузочной способности с учетом максимально возможных динамических моментов. Условие проверки по перегрузочной способности:

$$K_V M_{\text{max}} \geq M_{\text{сmax}} + M_d \quad (4.26)$$

здесь  $K_V$  - коэффициент, учитывающий снижение напряжения питающей сети.

При снижении напряжения  $V$  на 10% от  $V_{\text{н}}$  - номинального для двигателей постоянного тока (ДПТ)  $K_V = 0,9$ ; для асинхронных двигателей (АД)

$K_V = \left(\frac{V}{V_{\text{н}}}\right)^2 = 0,81$ ;  $M_{\text{max}}$  - максимально допустимый момент (критический) по

условиям коммутации ДПТ и устойчивости «АД» определяется по справочным данным (см. табл.А.2), Н·м;  $M_{\text{сmax}}$  - максимальный статический момент сопротивления на валу двигателя, Н·м;  $M_d$  - динамический момент, Н·м,

$M_d = \frac{J_Z a_{bp}}{9,55}$ ,  $a_{bp}$  - ускорение вращения, об/мин,  $a_{bp} = \frac{np}{V} a$ ,  $a$  - допустимое ли-

нейное ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Условие успешного запуска двигателя при подъеме наибольшего груза:

$$K_V M_{\text{max}} > M_1 \geq M_{\text{сmax}} + M_d \quad (4.27)$$

В зависимости от варианта принимаем двигатель постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения или асинхронный двигатель (АД) с фазным ротором. Паспортные данные окончательно выбранного двигателя с учетом степени защиты у, конструкции сводятся в таблицу.

## 4.2 Расчет электропривода привода главного движения токарного станка

Упрощенная кинематическая схема привода главного движения токарного станка приведена на рис. 4.4, эскиз обрабатываемой детали показан на рис. 4.5

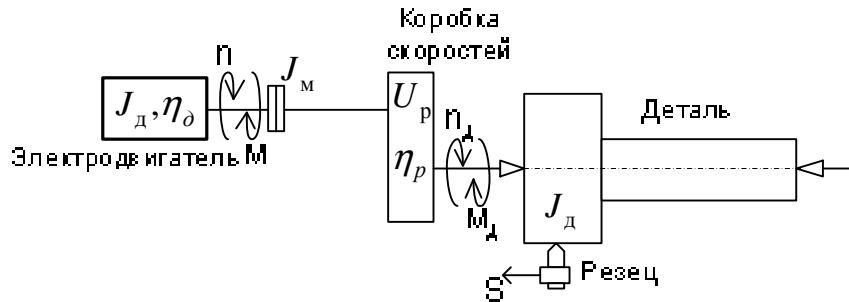


Рисунок 4.4 – Упрощенная кинематическая схема привода главного движения токарного станка

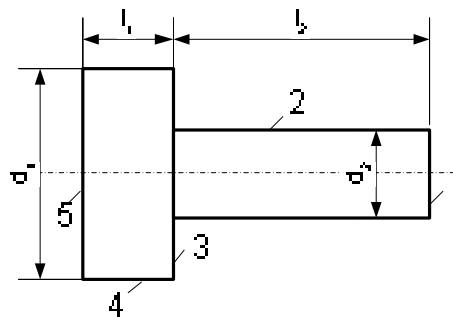


Рисунок 4.5 – Эскиз обрабатываемой детали

В зависимости от группы обрабатываемого материала выбирается режим резания и марка инструментального материала [16]. Поддачи рекомендуются в зависимости от сечения применяемой державки и диаметра обрабатываемой поверхности.

Скорость резания для каждого перехода, м/мин:

$$v = \frac{C_v}{T^m t^{x_v} S^{y_v}}, \quad (4.48)$$

где  $S$  – подача, представляющая перемещение резца за один оборот изделия, мм/об;  $t$  – глубина резания, равная расстоянию между обрабатываемой и обра-



ботанной поверхностями, мм;  $T$  – стойкость резца (время работы между двумя соседними заточками), мин;  $C_v$  – коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал и материал резца, а также вид токарной обработки (наружное точение, отрезка и т.п.);  $m, x_v, y_v$  – показатели степени, зависящие от свойств обрабатываемого металла, материала резца и вида обработки.

Значения коэффициентов и показателей степени по формуле (4.48) принимаются по справочнику [16] при условии, что резец имеет углы в плане: главный –  $45^0$ , вспомогательный –  $10^0$ . При отступлении от этого условия вводятся поправочные коэффициенты [16].

Усилие резания для каждого перехода, Н:

$$F_z = 9,81 C_F t^{x_F} S^{y_F} v^n, \quad (4.49)$$

где  $C_F$  – коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал, материал резца и вид токарной обработки.

Значения коэффициентов и показателей степени в формуле (4.49) на ходится по [16].

Мощность резания для каждого перехода, кВт:

$$P_z = \frac{F_z \cdot v}{60 \cdot 1000}. \quad (4.50)$$

Для принятого типа резца, глубины резания  $t$  и подачи  $S$  значения  $v, F_z, P_z$  могут быть взяты из таблиц справочника по режимам резания без расчетов.

Для нахождения мощности  $P_c$  на валу главного привода при установившемся режиме необходимо к мощности резания прибавить еще мощность потерь  $\Delta P$  в механизме подачи станка:

$$\Delta P = a P_{zh} + v P_z, \quad (4.51)$$

где  $a, v$  – коэффициенты постоянных и переменных потерь соответственно.

Коэффициент полезного действия станка

$$\eta = \frac{P_c - P}{P_c} \quad (4.52)$$

зависит от скорости  $v$  и коэффициента загрузки  $K$ ,

$$K_3 = \frac{P_z}{P_{zH}}, \quad (4.53)$$

где  $P_{zH}$  – наибольшая (номинальная) мощность, которая соответствует наибольшему (номинальному) КПД.

КПД каждого перехода

$$\eta_i = \left( 1 + \frac{a}{K_3} + v \right)^{-1}. \quad (4.54)$$

Для практических расчетов принимают:  $a=0,12$ ;  $v=0,8$  [17].

Мощность на валу двигателя для каждого перехода, кВт:

$$P_c = \frac{P_z}{\eta}. \quad (4.55)$$

Мощность потерь в станке при холостом ходе, кВт:

$$P_0 = aP_{zH}. \quad (4.56)$$

Частота вращения шпинделя для каждого перехода,  $\text{мин}^{-1}$ :

$$n = \frac{1000v}{\pi d}, \quad (4.57)$$

где  $d$  – диаметр обрабатываемой детали (при отрезке, подрезке принимается наибольшим), мм.

Машинное (рабочее) время для каждого перехода, мин:

$$t_m = \frac{l}{S \cdot n}, \quad (4.58)$$

где  $l$  – длина перехода, мм.

Время  $t_{no}$  паузы в работе станка, мин:

$$t_{no} = t_y + t_{np} + t_{ch} + t_{\theta}, \quad (4.59)$$

где  $t_y$  – время на установку детали;  $t_{np}$  – время на промер при точении;  $t_{ch}$  – время на снятие детали;  $t_{\theta}$  – время на управление станком.

Можно принять  $t_{no} = 0,3 - 0,6$  мин.

Время паузы равномерно распределяется между рабочими операциями:

$$t_0 = \frac{t_{no}}{6}. \quad (4.60)$$

По результатам расчетов (4.48) – (4.60) строится статическая нагрузочная диаграмма, общий вид которой приведен на рис. 4.6.

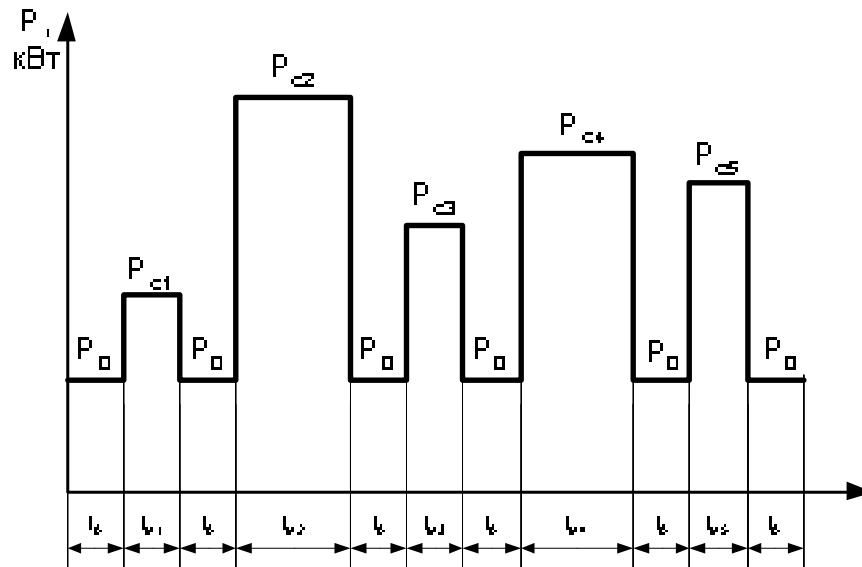


Рисунок 4.6 – Статическая нагрузочная диаграмма главного механизма токарного станка

При перемежающемся режиме  $S6$  работы и неизменной частоте вращения вала двигателя по статической нагрузочной диаграмме определяется средне-квадратичная мощность  $P_{cp}$ , кВт:

$$P_{cp} = \sqrt{\frac{P_{c1}^2 t_{m1} + P_{c2}^2 t_{m2} + \dots + P_m^2 t_{mm} + P_0^2 t_{no}}{t_{m1} + t_{m2} + \dots + t_{mm} + t_{no}}}. \quad (4.61)$$

Условие предварительного выбора двигателя по мощности

$$P_n \geq P_{cp}, \quad (4.62)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность выбранного двигателя, кВт.

При перемещающемся режиме  $S8$  работы и неизменной частоте вращения вала двигателя  $n$  мощность  $P_n$  двигателя выбирается из условия [17]

$$P_n \geq \sqrt{\frac{\sum_{i \in n} \left( \frac{P_{ci} n_n}{n_i} \right)^2 t_{mi} + P_0^2 t_{no}}{\sum_{i \in n} \beta_i t_{mi} + t_{no}}}, \quad (4.63)$$

где  $n_n$  – номинальная частота вращения вала двигателя,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $n_i$  – частота вращения вала двигателя на  $i$  – переходе,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $i$  – номер перехода;  $\beta_i$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи на  $i$  – переходе.

Приближенно зависимость коэффициента ухудшения теплоотдачи от частоты можно считать линейной:

$$\beta_i = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{n_i}{n_n} \quad (4.64)$$

где  $\beta_0$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном якоре (роторе).

Номинальная частота вращения вала двигателя при механическом способе регулирования скорости выбирается из условия  $n_1 \geq u_p n_{max}$ , а при электрическом –  $n_I \leq n_n \leq n_{II}$ , где  $n_I, n_{II}$  – частоты вращения детали в первой и второй зонах, соответственно;  $u_p$  – стандартный минимальный коэффициент передачи коробки скоростей;  $n_{max}$  – максимальная частота вращения шпинделя.

Система электропривода, тип электродвигателя выбирается в зависимости от технологических условий. Для приводов с продолжительным режимом работы, у которых не требуется регулирование скорости, целесообразно выбирать общепромышленный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии 4А, 4АМ, АИ [18, 19].

Для приводов малой мощности с частыми, но легкими пусками и остановками без регулирования скорости применяются специальные крановые и металлургические электродвигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора серии 4МТКР, 4МТН [19].

Для приводов средней и большой мощности с частыми и тяжелыми пусками и остановками без регулирования или со ступенчатым регулированием скорости в первой зоне (ниже номинальной) применяются крановые и металлургические асинхронные двигатели с фазным ротором серии МТФ, 4МТН, МТНФ [19].

Для приводов, работающих в длительном режиме, со ступенчатым регулированием скорости (кратным числу пар полюсов) применяют многоскорост-

ные асинхронные двигатели с короткозамкнутой обмоткой серии 4А [19], а с меньшей кратностью – асинхронные двигатели с фазным ротором и пускорегулирующими сопротивлениями в цепи ротора серии 4АФ [19].

Для приводов с частыми, но легкими пусками и остановами и плавным двухзонным регулированием (до и выше номинальной скорости) применяются общепромышленные двигатели постоянного тока серии 4П [20] в комплекте с тиристорными преобразователями (система ТП-Д) или асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором в комплекте с частотными преобразователями.

Для приводов с частыми тяжелыми пусками и остановами и плавным двухзонным регулированием скорости применяют краново-металлургические двигатели постоянного тока серии Д [20] в комплекте с тиристорными преобразователями или асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором в комплекте с частотными преобразователями.

Для высокомоментных приводов токарных станков, работающих в длительном перемежающемся режиме  $S_6$ , с плавным двухзонным регулированием скорости применяется двигатель постоянного тока серии 2П [20] в комплекте с тиристорными преобразователем.

Наибольшее применение в современных приводах подач находят высокомоментные электродвигатели постоянного тока серии 2ПВ, ДК-1 [20]. Для приводов главного движения выпускают специальные электродвигатели постоянного тока серии 4ПФ, которые имеют электромагнитное возбуждение для регулирования скорости в 2-х зонах. За счет ослабления магнитного потока эти двигатели могут иметь частоты до  $900 \text{ мин}^{-1}$  при номинальной –  $4500 \text{ мин}^{-1}$ . Минимальная частота этого двигателя в комплекте с тиристорным преобразователем составляет  $1 \text{ мин}^{-1}$ .

При глубоком плавном регулировании скорости после технико-экономического обоснования может применяться асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором в комплекте с тиристорным частотным преобразователем частоты (электропривод системы ТПЧ-Д).

При построении динамической нагрузочной диаграммы необходимо учи-

тывать, что вращающий момент и скорость на валу двигателя мгновенно измениться не могут. Время переходного процесса изменения скорости от  $\omega_{нач}$  до  $\omega_{кон}$  в начале и конце каждого перехода, с:

$$t_{mn} = \frac{J(\omega_{кон} - \omega_{нач})}{M_{нач} - M_{кон}}, \quad (4.65)$$

где  $\omega_{нач}$  – угловая скорость вращения вала двигателя в начале переходного процесса,  $c^{-1}$ .

В начале перехода эта скорость равна скорости холостого хода

$$\omega_{нач} = \omega'_{кон} = \omega_0 + \frac{P_0}{P_n} (\omega_n + \omega_0), \quad (4.66)$$

где  $\omega_0$  – скорость идеального холостого хода вращения вала двигателя,  $c^{-1}$ .

Для двигателя постоянного тока

$$\omega_0 = \omega_n \left( \frac{U_n}{U_n - I_n r_{я}} \right), \quad (4.67)$$

где  $\omega_n$  – номинальная скорость двигателя,  $c^{-1}$ ;  $U_n$  – номинальное напряжение, В;  $I_n$  – номинальный ток, А.

Сопротивление якоря

$$r_{я} = 0,5 \left( 1 - \frac{P_n \cdot 10^3}{U_n I_n} \right) \frac{U_n}{I_n}. \quad (4.68)$$

Для асинхронных двигателей частота вращения  $n_0$  идеального холостого хода равна частоте вращения магнитного поля статора:

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (4.69)$$

где  $f_1$  – частота тока в сети, Гц;  $p$  – число пар полюсов.

В конце каждого перехода

$$\omega_{кон} = \omega'_{нач} = \omega_0 + \frac{P_{сi}}{P_n} (\omega_n - \omega_0). \quad (4.70)$$

В момент вывода резца из работы начальная скорость  $\omega_{кон} = \omega'_{нач}$ , а конечная  $\omega_{нач} = \omega'_{кон}$ ; в приводе с электрическим способом регулирования скорости

изменение частоты вращения вала двигателя происходит в последовательности:

$$\omega_1 \rightarrow \omega_2 \rightarrow \omega_3 \rightarrow \omega_4 \rightarrow \omega_{\Gamma},$$

переход от частоты вращения  $n$  к угловой скорости  $\omega$  осуществляется по формуле  $\omega = \frac{\pi n}{30}$ .

Вращающий момент двигателя в начале каждого перехода

$$M_{нач} = M'_{кон} = \frac{P_0 \cdot 10^3}{\omega'_{нач}}.$$

В вращающий момент двигателя в конце каждого перехода

$$M_{кон} = M'_{нач} = \frac{P_{ci} \cdot 10^3}{\omega'_{кон}}.$$

В конце каждого перехода  $M_{кон} = M'_{нач}$ , а  $M_{нач} = M'_{кон}$ .

Приведенный к валу двигателя момент инерции,  $J$ , кг·м<sup>2</sup>:

$$J = J_{дв} + J_m + J_p + J_{дет} \frac{1}{u_p^2}, \quad (4.71)$$

где  $J_{дв}$ ,  $J_m$  – момент инерции двигателя и соединительной муфты, кг·м<sup>2</sup>;  $J_p$  – приведенный к валу двигателя момент инерции шестерней редуктора (коробки скоростей), кг·м<sup>2</sup>;  $J_{дет}$  – момент инерции детали, кг·м<sup>2</sup>;  $u_p$  – передаточное число редуктора (коробки скоростей), для упрощения расчетов можно принять

$$J = K_j (J_{дв} + J_m),$$

где  $K_j$  – коэффициент, учитывающий момент инерции масс деталей, вращающихся медленнее, чем вал двигателя (шестерен редуктора, валов, обрабатываемой детали и др.), для приводов с механическим способом регулирования скорости можно принять  $K_j = 1,3$ , для привода с электрическим способом регулирования скорости  $K_j = 1,2$ .

Момент инерции двигателя  $J_{дв} = \frac{GD_{дв}^2}{4}$  где  $GD_{дв}^2$  – маховый момент ротора двигателя по паспортным данным, кг·м<sup>2</sup>.

$$J_m = (0,3 \div 0,5) J_{дв}$$

Изменение кинетической энергии  $\Delta A_k$  вращающихся масс привода за время переходного процесса равно изменению энергии потерь  $\Delta A_d$  в двигателе, Дж:

$$\Delta A_{ki} = \Delta A_{di} = J \frac{\Delta \omega_i}{2},$$

где  $\Delta \omega_i$  – перепад скоростей, обусловленный изменением статического момента сопротивления  $M_c$  на валу двигателя,  $\text{с}^{-1}$ :  $\Delta \omega_i = \left| \omega_{нач_i} - \omega_{кон_i} \right|$ .

Средняя мощность потерь в электродвигателе за время переходного процесса для каждого перехода, Вт:

$$\Delta P_{mi} = \frac{2 A_{di}}{t_{mi}}. \quad (4.72)$$

Рассчитанная по формулам (4.65) – (4.72), статической диаграмме (рис. 4.6) строится динамическая нагрузочная диаграмма, примерный вид которой (совмещенной с идеализированными диаграммами скоростей и моментов) приведен на рис. 4.7. На рис. 4.7 пунктирными линиями показаны диаграммы  $M(t)$ ,  $\omega(t)$ ,  $P(t)$  привода с электрическим способом регулирования скорости, которые фиксируются регуляторами системы электропривода ТП-Д или ТПЧ-Д.

Из диаграммы видно, что из-за электромеханической инерционности привода в динамике электродвигатель будет потреблять из сети больше электроэнергии, что обусловит больший его нагрев.

Проверочный расчет электродвигателя сводится к расчету его нагрева. Для каждого типа электродвигателя существует определенная допустимая температура нагрева, зависящая от класса изоляции его обмоток и токоведущих частей [17]. Однако точный тепловой расчет электрических машин, работающих в нестационарных режимах с изменяющимися условиями охлаждения, чрезвычайно сложен. Поэтому в инженерной практике используются более простые методы расчета, например: метод эквивалентных потерь, метод среднеквадратичного (эквивалентного) тока (момента), метод эквивалентной мощности и др.



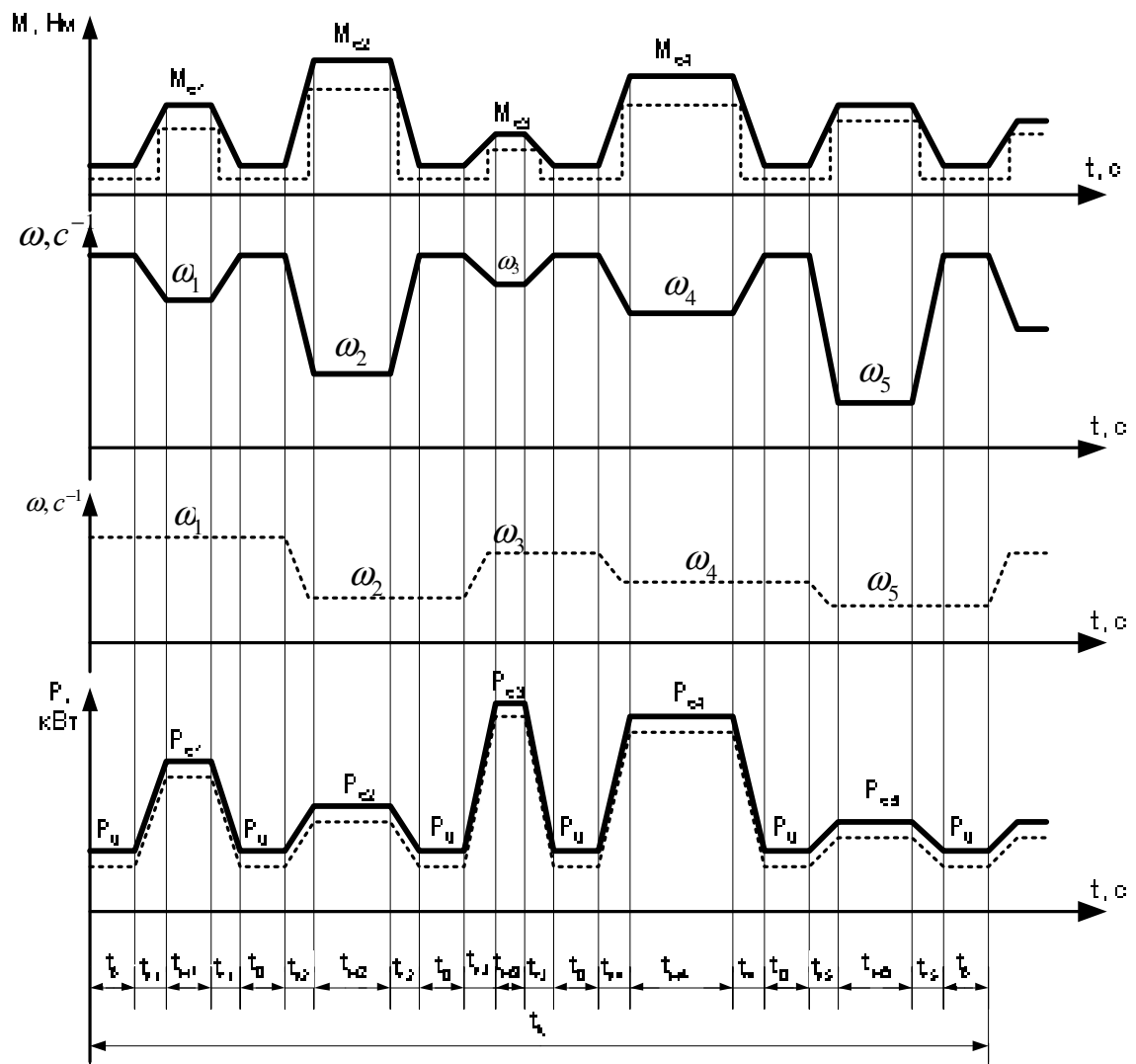


Рисунок 4.7 – Динамическая нагрузочная диаграмма электродвигателя привода главного движения токарного станка, совмещенная с диаграммами скоростей и моментов

При наличии динамической диаграммы удобнее использовать метод эквивалентной мощности. При механическом способе регулирования скорости по данным динамической диаграммы (см. рис. 4.7) определяется эквивалентная мощность, кВт:

$$P_э = \sqrt{\frac{\sum_{i \in n} (P_{ci}^2 t_{mi} + P_0^2 t'_n) + \sum_{i \in n} \Delta P_{mi}^2 t_{mi}}{t_y}}, \quad (4.73)$$

где  $t'_n = t_n - \sum_{i \in n} t_{mi}$ .

При электрическом способе регулирования скорости эквивалентная мощность, кВт

$$P_{\vartheta} = \sqrt{\frac{\sum_{i \in n} \left( \left( P_{ci} \frac{n_n}{n_i} \right)^2 t_{mi} + P_0^2 t'_n \right) + \sum_{i \in n} \Delta P_{nn}^2 t_{nni}}{\sum_{i \in n} t_{nn} + \sum_{i \in n} \beta_i t_{mi} + t'_n}}}. \quad (4.74)$$

выбранный двигатель не будет перегреваться выше допустимой температуры при условии

$$P_n \geq P_{\vartheta}.$$

Выбранный по мощности двигатель проверяется по перегрузочной способности с учетом максимально возможных динамических моментов. Условие проверки по перегрузочной способности

$$K_v M_{\max} \geq M_{c \max} + M_{\delta},$$

где  $K_v$  – коэффициент, учитывающий снижение напряжения питающей сети: при допустимом снижении напряжения на 10% от номинального напряжения  $U_n$ . Для двигателя постоянного тока (ДПТ)  $K_v = 0,9$ , для асинхронных двигателей (АД)  $K_v = \left( \frac{U}{U_n} \right)^2$ ;

максимально допустимый момент по условиям коммутации ДПТ и устойчивости АД, Нм, определяется по справочным данным [18,19];

$M_{\delta}$  – динамический момент, Нм:  $M_{\delta} = \frac{J \Delta \omega_{\max}}{t_n}$ ;  $\Delta \omega_{\max}$  – максимальный перепад

скоростей,  $c^{-1}$ , при пуске  $\Delta \omega_{\max} = \omega_{\max}$ .

Время переходного процесса при максимальном перепаде скоростей, с:

$$t_n = \frac{J \omega_{\max}}{M_n - M_0},$$

где  $M_n$  – пусковой момент, Нм,  $M_n = 1,5 M_n$ ;

$$M_0 = \frac{P_0}{\omega_{\max}}.$$

Условие успешного запуска двигателя

$$K_v M_{\max} \geq M_n \geq M_0 + M_{\delta}$$

Паспортные данные окончательно выбранного электродвигателя представляются в табличной форме.

#### 4.3 Построение пусковой диаграммы и механических характеристик электропривода в рабочих и тормозных режимах

Естественная механическая характеристика  $\omega = f(M)$  ДПГ с учетом её линейности строится по двум точкам, координаты которых

$$\omega = \omega_0, M = 0, \quad \omega = \omega_n, M = M_n.$$

Скорость холостого хода, рад/с,

$$\omega_0 = \frac{\pi n_n}{30} \left( \frac{V_n}{V_n - I_n \cdot r_y} \right), \quad (4.75)$$

$$r_y = 0,5 \left( 1 - \frac{P_n \cdot 10^3}{V_n I_n} \right) \frac{V_n}{I_n} \quad (4.76)$$

где  $P_n$  - номинальная мощность электродвигателя (на валу), кВт.

$$M_n = 9550 \frac{P_n}{n_n} \quad (4.77)$$

Рабочая механическая характеристика при рабочей скорости  $\omega_p = \omega_n$  строится по точкам с координатами:  $\omega = \omega_0, M = 0, \quad \omega = \omega_p, M = M_{C_1}$ .

Естественная механическая характеристика  $\omega = f(M)$  асинхронного двигателя при замкнутой накоротко обмотке ротора может быть построена с учетом паспортных данных по координатам:  $\omega = \omega_0, M = 0, \quad \omega = \omega_n, M = M_n; \quad \omega = \omega_0(1 - S_k), M = M_{\max}, \quad \omega = 0, M = M_{ПЕ}$ .

Синхронная скорость вращения магнитного поля статора, рад/с,

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} \quad (4.78)$$

где  $n_0$  - синхронная частота, об/мин,  $n_0 = \frac{60f_1}{P}$ ,  $f_1 = 50$  - частота тока в сети, Гц;  $P$  - число пар полюсов статора.

Синхронная частота  $n_0$  принимается ближайшей большей  $n_1$  из стандартного ряда частот [3].

Критическое скольжение

$$S_k = S_n (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}), \quad (4.79)$$

где  $S_n$  - номинальное скольжение,  $\lambda_m$  - кратность максимального момента,

$$\lambda_m = \frac{M_{\max}}{M_n}.$$

$$S_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0}; \quad (4.80)$$

Начальный пусковой момент на естественной характеристике, Н.м,

$$M_{ne} = \frac{2M_{\max} S_k}{1 + S_k^2}. \quad (4.81)$$

Рабочая механическая характеристика при рабочей скорости  $\omega_p = \omega_n$  строится по координатам  $\omega = \omega_0, M = 0, \omega = \omega_p, M = M_{C1}; \omega = \omega_0(1 - S_{kp}), M = M_{\max}, \omega = 0, M = M_{IP}$ .

Критическое скольжение рабочей характеристики

$$S_{kp} = \frac{S_p S_k}{S_n}, \quad S_p = \frac{n_0 - n_p}{n_0} \quad (4.82)$$

$$M_{np} = \frac{2M_{\max} S_{kp}}{1 + S_{kp}^2} \quad (4.36)$$

Более точно механические характеристики АД строятся с помощью формулы Клосса [3, 4, 5, 6]. Общий вид естественных и рабочих характеристик ДПГ и АД, их схемы включения приведены на рис. 4.11.

Пусковая диаграмма представляет функциональную зависимость  $\omega = f(M)$  электродвигателя при его пуске (графики 1-8, см. рис. 4.9, и 1-6, см.

рис. 4.11 ).

Число ступеней  $m$  пускового реостата (см. рис. 4.8) двигателя постоянного тока и  $z$  асинхронного двигателя (см. рис. 4.10) определяется требованиями плавности пуска, т.е. величиной допустимого ускорения  $a$  подъема (спуска) груза.

Среднее ускорение при пуске:

$$a_{cp} = \frac{V_n}{t_{II}}, \quad (4.83)$$

где  $t_{II}$  - время разгона привода от скорости  $V = 0$  до  $V = \omega_n$  при последовательном выключении всех пусковых ступеней.

$$t_{II} = t_{II_1} + t_{II_2} + \dots + t_{II_i}, \quad (4.84)$$

где  $t_{II_1}, t_{II_2}, \dots, t_{II_i}$  - время разгона при включенной  $i$ -й ступени,  $i$  - номер ступени.

Для упрощения считаем, что закон изменения скорости во времени линейный, поэтому время разгона  $t_{II_i}$  при включенной  $i$ -й ступени пускового сопротивления определяется по формуле

$$t_{II_i} \cong \frac{J_{\Sigma} \omega_0 (\lambda - 1)}{\lambda^i (M_1 - M_2)}, \quad (4.85)$$

здесь  $\lambda = \frac{I_1}{I_2}$  - для двигателей постоянного тока.

$$I_1 = \psi_1 I_{cm}$$

где  $\psi_1$  - кратность пускового тока (момента), см. табл. 4.1;  $I_{cm}$  - номинальный ток двигателя, А.

$$I_2 = \psi_2 I_{c \max}$$

где  $\psi_2$  - кратность пускового тока (момента),  $\psi_2 = 1,1 - 1,4$ .

Для асинхронных двигателей

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2}.$$

Число ступеней пускового реостата двигателей постоянного тока при

аналитическом методе расчета [9].

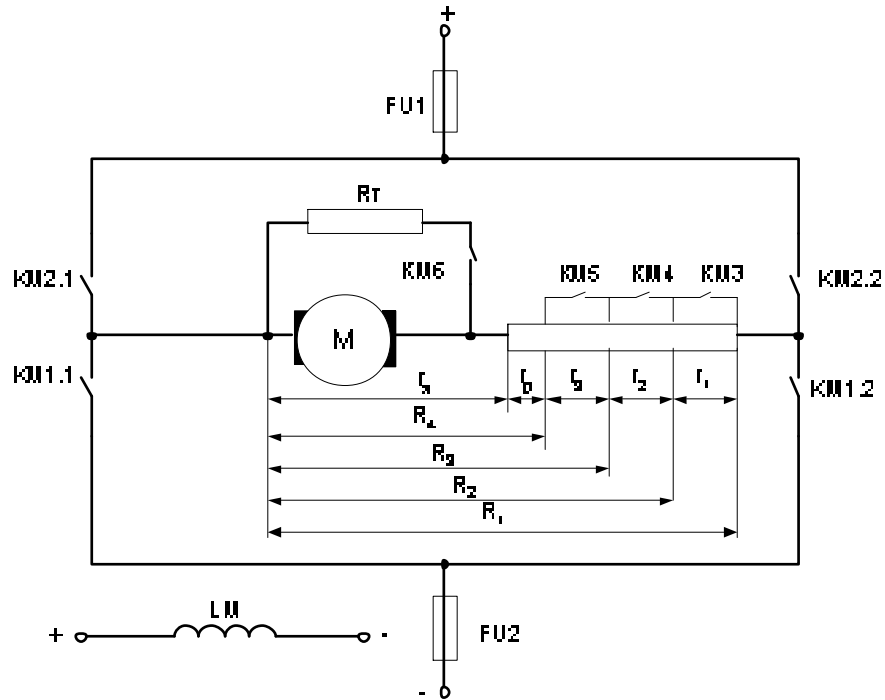


Рисунок 4.8 – Схема включения пускорегулирующих сопротивлений и сопротивлений динамического торможения ДПТ

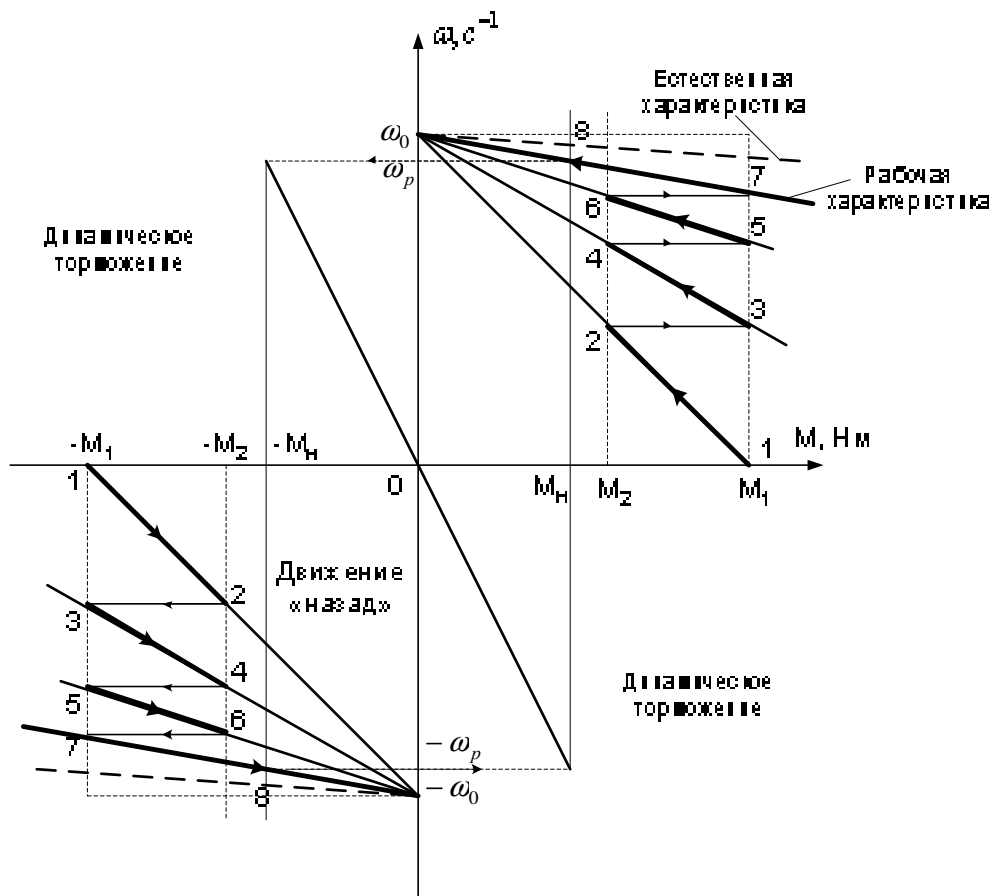


Рисунок 4.9 – Пусковая диаграмма и механическая характеристика ДПТ

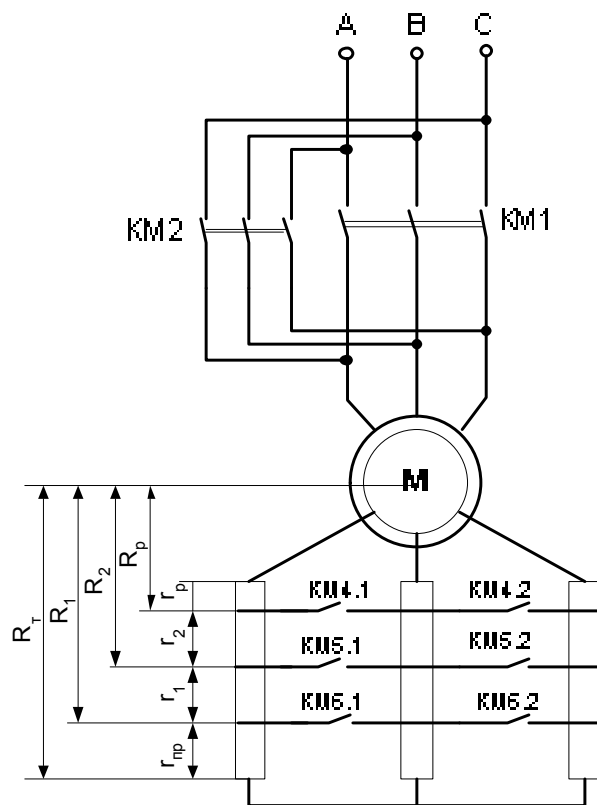


Рисунок 4.10 – Схема включения пускорегулирующих сопротивлений и сопротивлений динамического торможения АД

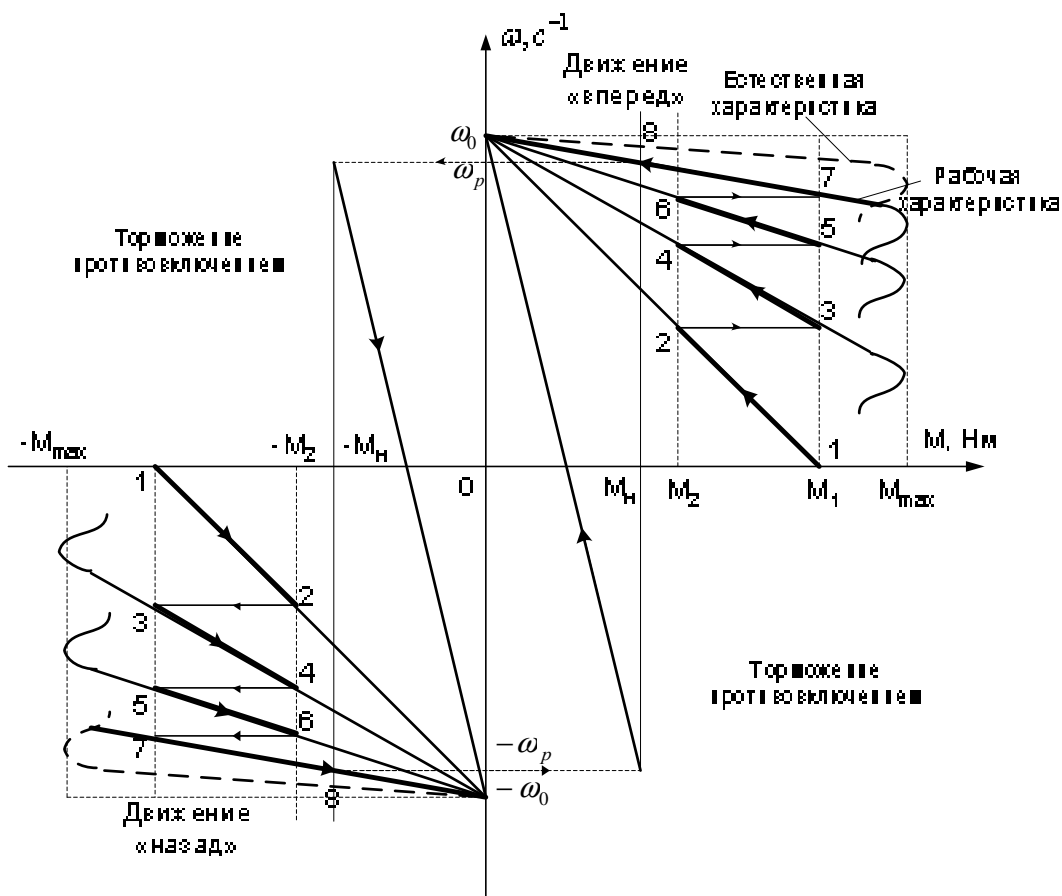


Рисунок 4.11 – Пусковая диаграмма и механическая характеристика ДПТ

$$m = \frac{\lg \frac{U_n}{I_1(r_j + r_p)}}{\lg \pi} \quad (4.86)$$

На рабочем участке механической характеристики АД зависимость  $\omega = f(M)$  можно приближенно считать линейной, поэтому число ступеней пускового сопротивления [9] определится по формуле

$$z = \frac{\lg \frac{S_p M_1}{M_{c \max}}}{\lg \pi} \quad (4.87)$$

Задаваясь значениями максимального тока (момента)  $I_1(M_1)$ , изменяя ток (момент) переключения  $I_2(M_2)$  добиваются равенства числа ступеней целому числу (до 3-го знака).

При контакторном управлении пуском число ступеней для двигателей малой мощности (0,7...10 кВт) принимают 1...2, средней мощности (10-50 кВт) - 2...3, большой мощности (50-200 кВт) - 3...5 [9].

Условием правильности выбора числа пусковых ступеней является

$$a_{cp} \leq a \quad (4.88)$$

После расчета  $m$  и  $z$  в масштабе строится пусковая диаграмма, общий вид которой для ДПП при  $m = 3$  приведен на рис. 4.9, а, для АД при  $z = 2$  - на рис. 4.11.

Моменты ДПП, соответствующие токам якоря  $I_1$  и  $I_2$ , Н·м:

$$\begin{aligned} M_1 &= C \phi I_1; \\ M_2 &= C \phi I_2; \\ C \phi &= \frac{V_n}{\omega_0} \end{aligned} \quad (4.89)$$

Величина сопротивления  $R_1$  первой ступени ДПП рассчитывается из условия ограничения начального пускового тока якоря  $I_1$ , Ом:



$$R_1 = \frac{U_n}{I_1} \quad (4.90)$$

Величины сопротивлений последующих ступеней, Ом, (см. рис. 4.10) определяются по формулам

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{R_1}{\lambda} \\ R_3 &= \frac{R_2}{\lambda} \\ R_4 &= \frac{R_3}{\lambda} \\ R_m &= \frac{R_{m-1}}{\lambda} \end{aligned} \quad (4.91)$$

Сопротивления секций пускового сопротивления (см. рис. 4.10), Ом:

$$\begin{aligned} r_1 &= R_1 - R_2, \\ r_2 &= R_2 - R_3, \\ r_3 &= R_3 - R_4, \\ r_m &= R_m - R_{m+1}, \end{aligned} \quad (4.92)$$

Величины сопротивлений пусковых ступеней АД, Ом:

$$\begin{aligned} r_z &= R_{z+1} \lambda \\ &\dots\dots\dots \\ r_3 &= (r_a + r_p) \lambda \\ r_2 &= R_3 \lambda \\ r_1 &= R_2 \lambda \end{aligned} \quad (4.93)$$

В формулах (4.92), (4.93) сопротивление одной фазы обмотки ротора, Ом,

$$r_a = \frac{S_n r_{2n}}{100} \quad (4.94)$$

Номинальное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$r_{2n} = \frac{E_{2n}}{\sqrt{3}I_{2n}}, \quad (4.95)$$

где  $E_{2n}$ ,  $I_{2n}$  - соответственно номинальное напряжение между кольцами ротора, В, и номинальный ток ротора, А.

Сопротивление невыводимой ступени, Ом,

$$r_p = \frac{S_p r_{2n}}{100} \quad (4.96)$$

Сопротивления секций пускового сопротивления (см.рис. 4.10), Ом;

$$\begin{aligned} r_z &= R_z - r_{z+1}, \\ & \dots\dots\dots \\ r_2 &= R_2 - r_a - r_p \\ r_1 &= R_1 - R_2 \end{aligned} \quad (4.97)$$

Торможение механизма подъема крана с использованием электродвигателя в режимах динамического торможения или противовключением позволяет уменьшить износ тормозных колодок механических тормозов, а следовательно повысить надежность крана в целом.

Схему динамического торможения двигателя постоянного тока см. на рис. 4.8., В тормозном режиме обмотка якоря контактором  $KM$  отключается от сети, а контактором  $KMЧ$  подключается к сопротивлению динамического торможения. Его величина определяется по формуле

$$R_{dT} = \frac{\omega_T U_n}{\omega_0 I_n (K_T - 1)}, \quad (4.98)$$

где  $\omega_T$  - начальная скорость торможения, с;  $K_T$  - коэффициент запаса торможения.

Торможение противовключением асинхронного двигателя осуществляется изменением порядка чередования фаз, например, выключением контактора КМ4 и включением КМ5 (см. рис. 4.10). Для ограничения тока в момент переключения двух фаз обмотки статора, а также для получения заданной скорости торможения в цепь обмотки ротора вводится сопротивление  $R_T$ , состоящее из

пускового сопротивления  $R_1$  и ступени противовключения  $r_{np}$ :

$$R_T = r_a \frac{2(1 - S_p)}{S_n} \quad (4.99)$$

Сопротивление ступени противовключения, Ом,

$$r_{np} = R_T - R_1. \quad (4.100)$$

Величина начального момента  $M_T$ , создаваемого электродвигателем, Н·м, принимается

$$M_T = M_C (K_T - 1). \quad (4.101)$$

Типовая схема электропривода выбирается в полном соответствии с вариантом задания и результатами расчетов. При этом учитываются:

- тип электродвигателя;
- число ступеней пускового сопротивления;
- способ электрического торможения;
- мощность электродвигателя.

Тип контролера выбирается в зависимости от мощности двигателя и режима работы крана [2, 10]. При выборе схемы управления электроприводом необходимо ориентироваться на современные типовые крановые панели. Элементы электрической принципиальной схемы электропривода приводятся в соответствии с требованиями [12]. Описание работы схемы излагается в такой последовательности:

- 1 Исходное состояние.
- 2 Пуск при подъеме груза.
- 3 Торможение из положения "подъем".
- 4 Пуск при спуске груза.
- 5 Торможение из положения "спуск".
- 6 Регулирование скорости подъема и спуска.

При этом в описании следует указать действия машиниста крана и к каким изменениям в схеме приводят его действия. Можно отметить функциональное назначение главных элементов схемы управления.

#### 4.4 Синтез схем конечных автоматов системы автоматического управления пуском/торможением электродвигателя

Словесное описание алгоритма работы конечных автоматов (КА) выполняется в произвольной форме. При этом желательно выделить в схеме исполнительные органы, например магнитные контакторы “вперед” и “назад”, а затем дать словесное описание условий, при которых они могут быть включены. Идентификацию логических переменных следует начинать с разделения входных и выходных логических переменных. Задачей синтеза систем автоматического управления является разработка их принципиальных схем. Схемы с использованием бесконтактных логических элементов, как правило, реализуют алгоритмы. В настоящее время в подавляющем числе случаев применяют дискретные устройства, в которых функциональные элементы являются двухпозиционными (включен, отключен; сработал, не сработал). В общем случае структура КА с входами и выходами представляется “черным ящиком”, содержание которого еще не известно, но указываются входные и выходные логические сигналы (рис. 4.12).



Рисунок 4.12 – Структуры КА с  $n$  входами и  $m$  выходами

Для создания модели функционирования КА необходимо абстрагироваться. При этом каждое физическое воздействие на систему управления электроприводом, которое оказывает влияние на работу исполнительного органа, обозначается символом с соответствующим номером. Состояние соответствующего исполнительного органа схемы по заданию идентифицируется выходными логическими переменными, т.е. символами с соответствующими номерами.

Например, в простейшей схеме управления электроприводом, имеющей кнопку “Пуск”, кнопку “Стоп” и магнитный контактор, включающий и выключающий электродвигатель, входных переменных – две, а выходных – одна.

$$\begin{array}{l}
 \text{Входные} \\
 \text{переменные:} \\
 x_1 \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ если нажата кнопка “Пуск”}; \\ 0, \text{ если не нажата кнопка “Пуск”}. \end{array} \right. \\
 x_2 \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ если нажата кнопка “Стоп”}; \\ 0, \text{ если не нажата кнопка “Стоп”}. \end{array} \right. \\
 \text{Выходная} \\
 \text{переменная:} \\
 y_1 \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ если включен контактор}; \\ 0, \text{ если не включен контактор}. \end{array} \right.
 \end{array}$$

Логические формулы алгоритма работы КА представляют такие суперпозиции логических переменных в уравнениях, которые обеспечивают равенство левой и правой частей логической “1”. Уравнение удобнее записывать в дизъюнктивной совершенной нормальной форме (ДСНФ), при которой перебираются все варианты, когда выходная функция равна “1”, а входные логические переменные связаны элементарными логическими операциями “И”, “ИЛИ”, “НЕ”. При этом сначала определяют суперпозиции, связанные логической операцией “И”, затем полученные суперпозиции связывают логической операцией “ИЛИ”.

Минимизацию логических формул производят с учетом законов алгебры логики.

Целью минимизации является упрощение, получение более компактных формул, замена многовходных операций “И” на операции “ИЛИ-НЕ”.

Структурная функциональная схема КА на логических элементах составляется на основании минимизированных логических формул. Для этого, используя ассоциативные законы, необходимо в формулах выделить суперпозиции, связанные элементарными логическими функциями конъюнкции “И”, дизъюнкции “ИЛИ”, и для каждой суперпозиции на схеме начертить функциональные блоки, реализующие соответствующие логические операции. На входы каждого функционального блока подаются соответствующие логические пере-

менные, а выходы блоков соединяют с входами последующего блока, который реализует логическую операцию между отдельными суперпозициями, и т.д. до получения на выходе последнего блока выходной переменной.

Принципиальная электрическая схема КА составляется на основе функциональной схемы с использованием серийных интегральных микросхем. Серийные интегральные микросхемы (ИМС) выбираются по их функциональному значению, числу входов-выходов, уровня, знаку сигналов, соответствующих логическим “0” и “1”, и другим параметрам. Данные об элементах схемы приводятся в спецификации.

Структурная функциональная схема КА на базе МП представляет собственно блок МП, блок входных регистров, число которых равно числу входных переменных, и блок выходных регистров, число которых равно числу выходных логических переменных.

### Пример синтеза КА на бесконтактных логических элементах

Исходным данным является схема управления электроприводом (рис. 4.13)

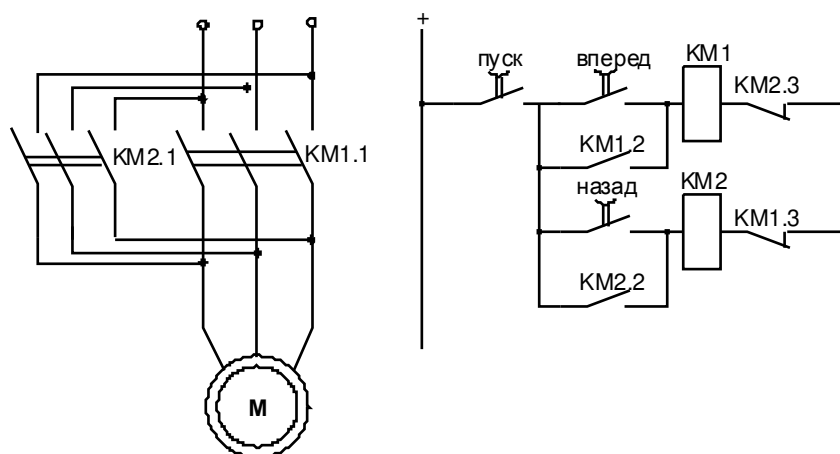


Рисунок 4.13 – Электрическая принципиальная релейно-контакторная схема управления электроприводом

Контактные электрические аппараты в схеме имеют назначение:

*QF1* – автоматический выключатель, для ручной коммутации силовых цепей без тока и автоматического отключения двигателя при срабатывании встроенных защит (максимальной токовой или тепловой);

*SF1* – то же самое, только для цепей управления;

*KM1* – магнитный контактор, для коммутации силовых цепей (исполнительный орган схемы) двигателя *M* под нагрузкой и без;

*SB1* – кнопка ручного управления “Стоп”, для отключения двигателя *M*;

*SB2* – кнопка ручного управления “Пуск”, для включения контактора *KM1* и соответственно двигателя *M*;

*KA1, KA2* – реле максимального тока, для контроля за уровнем тока в силовой цепи двигателя *M*;

*KT1* – реле времени, для задержки по времени отключения двигателя *M* при перегрузках.

Реле *KA1, KA2, KA3* обеспечивают максимальную токовую защиту (МТЗ) двигателя *M*.

Блок – контакт контактора *KM1.2*, обеспечивает блокировку кнопки *SB2*.

#### *Словесное описание алгоритма работы схемы управления*

Контактор *KM1* будет включен, если нажата кнопка *SB2* или сработал блок-контакт *KM1.2* и не нажата кнопка *SB1* и не сработала МТЗ.

Питание силовых цепей и управления обеспечивается, т.е. считаем, что *QF1* и *SF1* уже включены.

#### *Идентификация логических переменных*

Поскольку исполнительный орган один (*KM1*), то входная переменная тоже одна. Электрических аппаратов, которые оказывают влияние на работу контактора *KM1*, пять (*SB1, SB2, KA1, KA2, KT1*), следовательно, входных переменных тоже пять.

Примем следующие обозначения логических переменных:

где  $i_A, i_C$  – текущие значения токов в фазах *A* и *C*;

$i_{доп}$  – максимально допустимый ток двигателя М;

$t$  – текущее значение времени с момента срабатывания реле КА1 или КА2;

$T_{порог}$  – пороговое время, т.е. время, на которое задерживается срабатывание МТЗ (10–20 с).

### Логическая формула алгоритма работы КА

$$\begin{aligned}
 y_1 & \begin{cases} 1, \text{ если включен КМ 1;} \\ 0, \text{ если не включен КМ 1.} \end{cases} \\
 x_1 & \begin{cases} 1, \text{ если нажата кнопка;} \\ 0, \text{ если не нажата кнопка.} \end{cases} \\
 x_2 & \begin{cases} 1, \text{ если нажата кнопка;} \\ 0, \text{ если не нажата кнопка.} \end{cases} \\
 x_3 & \begin{cases} 1, \text{ если } i_A \geq i_{доп}; \\ 0, \text{ если } i_A < i_{доп}. \end{cases} \\
 x_4 & \begin{cases} 1, \text{ если } i_C \geq i_{доп}; \\ 0, \text{ если } i_C < i_{доп}. \end{cases} \\
 t_4 & \begin{cases} 1, \text{ если } t \geq T_{порог}; \\ 0, \text{ если } t < T_{порог}. \end{cases}
 \end{aligned}$$

Уравнение записывается в виде ДСНФ с учетом словесного описания работы КА:

$$y_1 = (x_2 + y_1) \cdot \overline{x_1} \cdot [(x_3 + x_4) \cdot t_1 + (\overline{x_3} + \overline{x_4}) \cdot \overline{t_1}] \quad (4.102)$$

В формуле черточка над переменной означает ее отрицание, т.е. если ее значение равно “0” то отрицание – “1”.

### Минимизация логической формулы

С учетом закона тождества для выражения в квадратных скобках формула (4.102) примет вид:



$$y_1 = (x_2 + y_1) \cdot \overline{x_1} \cdot [(x_3 + x_4) \cdot \overline{t_1}] \quad (4.103)$$

т.к.

$$[(x_3 + x_4) \cdot \overline{t_1} + (\overline{x_3} + \overline{x_4}) \cdot \overline{t_1}] = \overline{t_1} [(x_3 + x_4) + (\overline{x_3} + \overline{x_4})],$$

а с учетом сочетательного и переместительного законов:

$$x_3 + \overline{x_3} + x_4 + \overline{x_4} = (x_3 + x_4).$$

В формуле (4.103) имеется две операции “ИЛИ” и при операции “И”. Необходимо уменьшить число операций “И”, т.к. в импульсных схемах логика “И” работает менее надежно, чем “ИЛИ”. Применим закон двойного отрицания и закон Де Моргана:

$$y_1 = \overline{\overline{(x_2 + y_1) \cdot \overline{x_1} \cdot (x_3 + x_4) \cdot \overline{t_1}}} = \overline{(x_2 + y_1) + x_1 + [(x_3 + x_4) + t_1]} \quad (4.104)$$

Формула (4.104) наиболее компактна, уменьшенное число операций “И”, поэтому дальнейшие преобразования нецелесообразны.

#### Структурная функциональная схема КА на логических элементах

В формуле (4.104) выделяем вначале суперпозиции в скобках :  $\overline{(x_2 + y_1)}$  и  $\overline{(x_3 + x_4) + t_1}$ . Для реализации этих логических операций необходимо два логических элемента “ИЛИ-НЕ”, а для реализации оставшейся операции необходим еще один элемент “ИЛИ-НЕ”. Функциональная схема КА приведена на рис. 4.14.

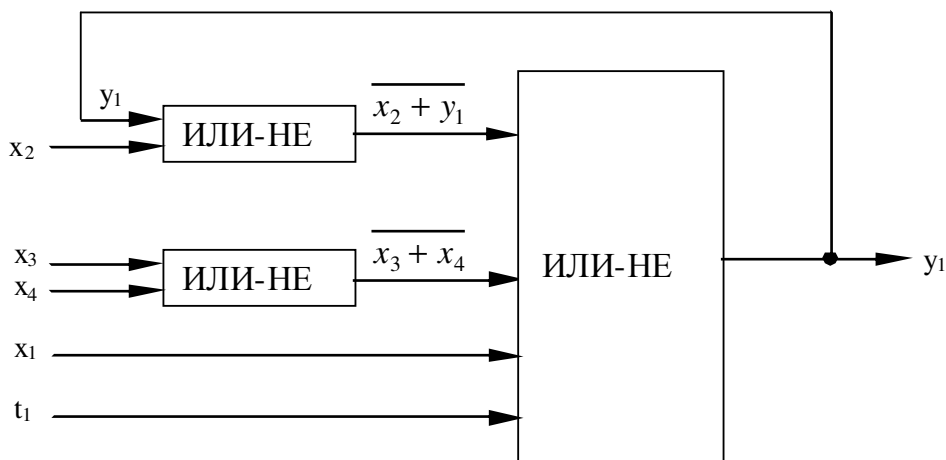


Рисунок 4.14 – Структурная функциональная схема КА

Принципиальная электрическая схема КА на интегральных логических элементах

Схема КА включает нереверсивный симметричный пускатель СП в силовой цепи, датчики тока – трансформаторы тока  $TA1$ ,  $TA2$ , диоды  $VD1$ ,  $VD2$ , выпрямляющие переменный ток, компараторы  $DA1$ ,  $DA2$ , формирующие логические переменные  $x_3$ ,  $x_4$ , бесконтактные кнопки управления  $EK1$  и  $EK2$  (например, оптоэлектронные и электромагнитные), а также три логических элемента “ИЛИ-НЕ”  $DA3$ - $DA5$  (два на 2 входа) и один на три ИМС серии 115ЛЕ3 (2 шт.) и К173ЛЕ3 (1 шт.), усилитель мощности  $DA5$ , элемент задержки по времени (RC цепочка).

Принципиальная схема КА приведена на рис. 4.15.

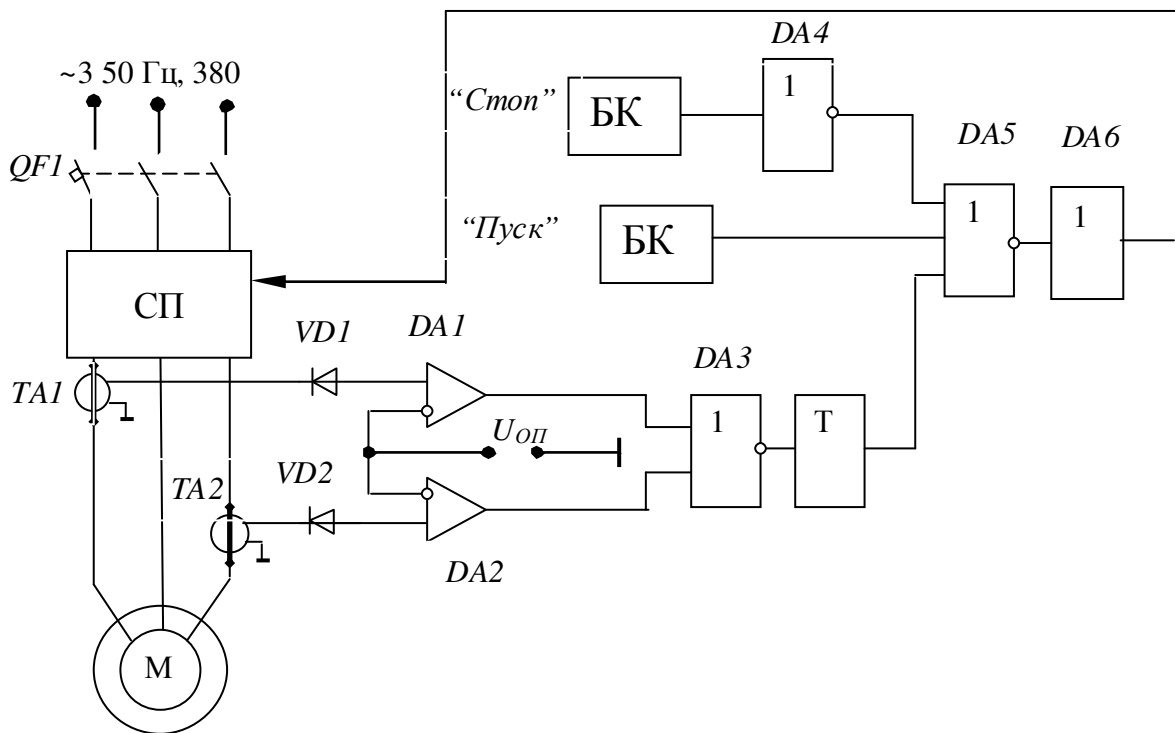


Рисунок 4.15 – Принципиальная электрическая схема КА на бесконтактных логических элементах

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Энергоиздат, 1991.- 452 с.
- 2 Электрооборудование кранов: /А.П.Боголюбовский, Е.М.Певзнер, Н.Ф. Семерная и др. - М.: Машиностроение, 1983. - 310 с.
- 3 Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. - М.: Энергоиздат, 1981. - 560 с.
- 4 Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. - М.: Энергия, 1960. - 360 с.
- 5 Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 415 с.
- 6 Фотиев М.М. Электрооборудование предприятий черной металлургии. - М.: Металлургия, 1980. - 312 с.
- 7 Иванченко Ф.К. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин. - Киев: Вища шк., 1978. - 576 с.
- 8 Ключев В.И. Выбор электродвигателей для производственных механизмов. - М.: Энергия, 1974. - 96 с.
- 9 Хализев Г.Л., Серов В.И. Расчет пусковых, тормозных и регулировочных устройств для электродвигателей. - М.: Высш. шк., 1966. - 280 с.
- 10 Рапутов Б.М., Электрооборудование металлургических кранов. - М.: Металлургия, 1968. - 223 с.
- 11 Кравчик Э.А., Стрельбицкий, Э.К., Шлаф М. М. Выбор и применение асинхронных двигателей. - М.: Энергоатомиздат, 1967. - 93 с.
- 12 Методические указания к курсовому и дипломному проектированию для всех специальностей вуза "Условные обозначения в электрических схемах" /Соот.: Л.А. Удовик, И.П. Шеломов. - Краматорск.: КИИ, 1983. - 60 с.
- 13 Отраслевой стандарт. Краны грузоподъемные. Нормы расчета электроприводов: ОСТ 24. - Введ. 12.02.85. - М., 1986. - 34 с.
- 14 Брусникин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины, ч.1,2. – М.: Энергоиздат, 1987.

- 15 Бессонов П.А. Теоретические основы электротехники. – М. Высш. Школа, 1993.- 752 с.
- 16 Режимы резания: Справочник / Под ред. Ю.Б. Барановского. – М.: Машиностроение, 1972. – 560 с.
- 17 Сандлер А.Г. Электропривод и автоматизация металлорежущих станков: Учебное пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1987. – 440 с.
- 18 Кравчик А.Э., Стрельбицкий Э.К. Шлаф М.М. Выбор и применение асинхронных двигателей. – М.: Энергоатом издат, 1987. – 95 с.
- 19 Двигатели асинхронные единой серии 4А мощностью 0,06...400 кВт: Каталог. – М.: Информэлектро, 2000. – 108 с.
- 20 Машины постоянного тока серии 2П: каталог. – М.: Информэлектро, 2000. – 33 с.

**Учебное издание**

**Методические указания**

к выполнению РГР по курсу

«Основы теории электропривода»

для студентов специальности 7.092501

«Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии»

заочной формы обучения

Составитель

А. В. Разживин, к.т.н., доц., каф. АПП

Отв. за выпуск

О. В. Субботин, к.т.н., доц. АПП

Подп. к печати

Формат 60×84/16

Офсетная печать. Усл. печ. л.

Уч.-изд. л.

Тираж 50

Зак. №

---

**ДГМА, 83913, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72**

