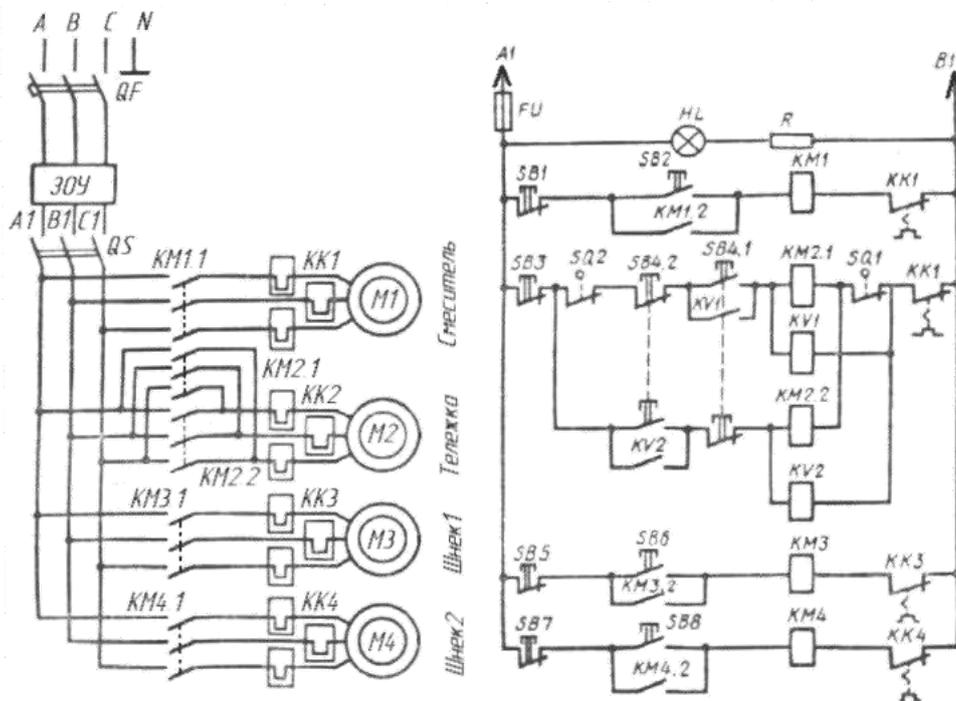


Безик В.А.

# ЭЛЕКТРОПРИВОД

Методические указания  
по выполнению курсовой работы для студентов специальности  
110302 – Электрification и автоматизация сельского хозяйства



УДК 621.31 (075)  
ББК 31.291  
Б 39

Безик В.А. Электропривод. Методические указания по выполнению курсовой работы для студентов специальности 110302 – Электрификация и автоматизация сельского хозяйства / В.А. Безик. – Брянск: Изд-во БГСХА, 2011. – 40 с.

Методические указания содержат общие методические указания по выполнению курсовой работы, задание для курсовой работы, методические указания по ее выполнению и необходимые справочные материалы. Позволяет студентам специальности 110302 – «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» выполнять курсовую работу по дисциплине «электропривод».

Рецензенты:

доцент Яковенко Н.И. (Брянская государственная сельскохозяйственная академия);

доцент Кисель Ю.Е. (Брянская государственная технологическая академия).

*Рекомендовано к изданию методической комиссии факультета энергетики и природопользования Брянской государственной сельскохозяйственной академии протокол № 1 от 11.01.2011 года.*

© ФГОУ ВПО Брянская ГСХА, 2011  
© Безик В.А., 2011

## Содержание

1. Общие методические указания по выполнению курсовой работы.....	4
2. Задание на курсовую работу.....	6
3. Рекомендуемая литература.....	7
4. Краткие теоретические сведения по разделам курсовой работы.....	8
4.1. Общие сведения о системах управления электроприводами.....	8
4.2. Выбор электродвигателя по мощности.....	10
4.3. Механика электропривода.....	13
4.4. Особенности работы электропривода в сельском хозяйстве.....	14
5. Пример выполнения расчетов.....	15
5.1. Выбор электродвигателя смесителя кормов.....	15
5.2. Расчёт продолжительности пуска приводного двигателя.....	18
5.3. Проверка на допустимый перегрев при пуске.....	24
5.4. Выбор двигателя выгрузного транспортёра.....	25
5.5. Расчет коэффициентов механической и тепловой перегрузки.....	27
5.6. Проверка на возможность пуска и устойчивость работы.....	29
5.7. Схема управления технологической установкой.....	32
5.8. Выбор аппаратуры управления и защиты.....	33
Приложение 1. Образец титульного листа.....	35
Приложение 2. Технические данные электродвигателей серии 4А.....	36
Приложение 3. Технические данные аппаратуры управления и защиты.....	37
Приложение 4. Удельные сопротивления алюминиевых проводов воздушных линий.....	39
Приложение 5. Нормированные значения температуры нагрева и превышения температуры электродвигателей.....	39

## 1. Общие методические указания по выполнению курсовой работы

Основой, на которой базируется комплексная механизация и автоматизация технологических процессов в сельском хозяйстве, является автоматизированный электропривод. От технического совершенства электропривода в значительной степени зависит производительность, условия труда, надежность и долговечность работы машин, а также качество выпускаемой продукции. Поэтому навыки расчета и проектирования автоматизированного электропривода необходимы инженеру по специальности – электрификация и автоматизация сельского хозяйства.

Цель курсовой работы – приобретение навыков расчета электроприводов сельскохозяйственных технологических установок.

Выполнение курсовой работы базируется на материале дисциплины «Электропривод», использует сведения, полученные по смежным дисциплинам: «Электрические машины», «Автоматика», «Теоретические основы электротехники» и др.

Выполнение курсовой работы готовит студентов к дипломному проектированию.

### *Требования к оформлению работы*

Текст записки набирается шрифтом Times New Roman размер 14 пт или Arial размер 13 пт, межстрочный интервал 1,3. Ссылки на литературу делаются в квадратных скобках, где указывается номер источника, согласно списка литературы.

Содержание пояснительной записки разделяется на разделы и подразделы, имеющие порядковые номера. Введение, содержание, список литературы, заключение не являются разделами и не нумеруются. Все страницы записки, включая рисунки и таблицы, нумеруются. Номер страницы проставляется в правом верхнем углу листа, начиная с введения, титульный лист не нумеруется.

Записка оформляется на листах с рамкой установленного образца с полями 5 мм справа, снизу и сверху и 20 мм слева. Объем пояснительной записки – 30 – 40 листов. Каждый раздел начинается на листе с большой рамкой, остальные листы печатаются с малыми рамками. В рамках проставляется шифр. Примеры шифров с пояснениями указаны на рисунке 1.

Формулы, таблицы, рисунки отделяются от текста вначале и в конце пустой строкой. Формулы нумеруются, их номера проставляются по правому краю в круглых скобках. Рисунки и таблицы также нумеруются. Пример оформления названий рисунков и таблиц указан на рисунке 2.

Значения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, расшифровываются непосредственно под ней. Все расчеты в курсовой работе выполняются в Международной системе единиц (СИ).

КР ЭП 342 000.003 ПЗ

КР ЭП 342 010.000 Э4

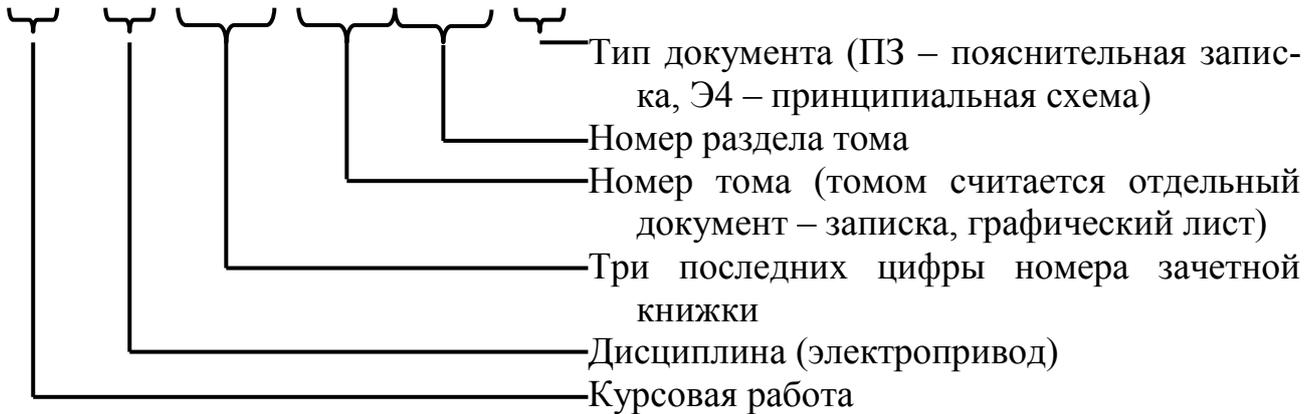


Рисунок 1. Примеры шифров

Таблица 1 – Механическая характеристика двигателя

s	0	0,025	0,05	0,1	0,15	0,21	0,8	1
n, мин <sup>-1</sup>	1500	1463	1425	1350	1275	1185	500	0
M, Н·м	0	18,9	36,9	62,5	77,3	81,2	59	73,8



Рисунок 1. Нагрузочная диаграмма электропривода.

Рисунок 2. Пример оформления таблиц и рисунков.

Расчетно-пояснительная записка курсовой работы должна содержать следующие обязательные части:

- титульный лист (приложение 1);
- введение (включая определение задач курсовой работы и исходных данных);
- расчетно-пояснительная часть;
- заключение;
- список литературы.

Каждый раздел расчетно-пояснительной части должен начинаться краткими теоретическими сведениями. Далее следуют необходимые расчеты, и заканчивается раздел кратким выводом. В заключении кратко описываются результаты работы (выбранные двигатели, результаты проверок, вычислений, выбора аппаратуры и др.)

Графическая часть курсовой работы должна содержать минимум один лист формата А1 с принципиальной схемой технологической установки.

## 2. Задание на курсовую работу

1. Для привода смесителя кормов периодического действия по нагрузочной диаграмме выбрать асинхронный двигатель с синхронной частотой  $1500\text{мин}^{-1}$ , используя метод эквивалентных величин.  
Нагрузочная диаграмма задана повторяющимся циклом:  
3 минуты – остановка двигателя;  
2 мин – работа под нагрузкой, мощность на валу равна последней цифре в номере зачетной книжки в кВт,  
2 мин – работа под нагрузкой, мощность на валу равна предпоследней цифре в номере зачетной книжки в кВт,  
2 мин – работа под нагрузкой, мощность на валу равна третьей справа цифре в номере зачетной книжки в кВт,  
Расчёты проводить методом эквивалентных величин. Провести проверку на перегрузочную способность. Результаты выбора проверить методом средних потерь.
2. Рассчитать продолжительность пуска приводного двигателя методом площадей. Считать приведенный к валу двигателя момент инерции в 10 раз больше момента инерции двигателя. Механическая характеристика смесителя описывается вентиляторной с начальным моментом, составляющим 20% от номинального момента двигателя, номинальная скорость равна номинальной скорости двигателя.
3. Рассчитать потери двигателя в процессе пуска. Проверить выбранный двигатель по нагреву во время пуска. Рассчитать коэффициенты тепловой и механической перегрузки.
4. Выбрать асинхронный двигатель для привода выгрузного транспортёра, работающего в кратковременном режиме в течении 6 минут. Мощность на валу равна последней цифре в номере зачетной книжки в кВт (если она равна 0, считаем 5 кВт).
5. Составить принципиальную схему управления технологической установкой. Двигатель смесителя может быть включён только при включённом двигателе выгрузного транспортёра, для этого предусмотреть блокировку в схеме. Также предусмотреть необходимые защиты и сигнализацию включённого состояния двигателей.
6. Описать работу схемы.
7. Выбрать необходимую аппаратуру управления и защиты.
8. Проверить двигатель на возможность пуска с номинальной нагрузкой на валу при питании от трансформатора ТМ – 63/10 с номинальной мощностью  $S_H=63\text{кВА}$ , номинальным выходным фазным напряжением  $U_{2H}=220\text{В}$ , напряжением короткого замыкания  $u_K=8,5\%$  через линию электропередач длиной 200 м, выполненную проводом АС – 16 с погонным сопротивлением  $r_n=2,2\text{ Ом/км}$ .
9. Проверить устойчивость работы двигателя выгрузного транспортёра при пуске двигателя смесителя по условиям из предыдущего пункта.

### 3. Рекомендуемая литература

#### Основная

1. Епифанов А. П. Основы электропривода. - СПб.: Лань 2009.
2. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. – С. Пб.: Энергоиздат Санкт-Петербургское отделение, 2000.
3. Онищенко Г. Б. Электрический привод. - М.: Академия 2008.
4. Системы автоматизированного управления электроприводами / под. ред. Ю. Н. Петренко М.: КолосС 2007.
5. Терехов В. М. Системы управления электроприводов. - М.: Академия 2006.
6. Фролов Ю. М. Основы электрического привода.- М.: КолосС 2007.
7. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981.
8. Шичков Л. П. Электрический привод. - М.: КолосС 2006.

#### Дополнительная

1. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод.- М.: Академия 2004.
2. Ильинский Н. Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение.- М.: Академия 2008.
3. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам. М.: Академия. 2005, 479 с.
4. Кондратенков Н.И., Антони В.И., Ермолин М.Я. Электропривод сельскохозяйственных машин. – Челябинск, 1999.
5. Москаленко В.В. Электрический привод М.: Высшая школа 2000.
6. Савченко П.И., Гаврилюк И.А., Земляной И.Н., Худобин Н.В. Практикум по электроприводу в сельском хозяйстве. – М.: Колос, 1996.
7. Шичков Л.П., Коломиец А.П. Электрооборудование и средства автоматизации сельскохозяйственной техники. – М. Колос, 1995.

## 4. Краткие теоретические сведения по разделам курсовой работы

### 4.1. Общие сведения о системах управления электроприводами

Основная задача электропривода в технологической установке - выполнение заданных по технологическим требованиям законов движения рабочего органа с максимальным приближением. При реализации этой задачи часто исходят из того, что закон движения ротора электродвигателя пропорционален закону движения рабочего органа. Поэтому управление скоростью - наиболее общая функция систем управления электроприводом.

К основным функциям систем управления электроприводом относятся:

1. Управление процессами пуска, торможения, реверсирования и останова электроприводов.
2. Поддержание постоянства (стабилизация) регулируемой координаты в статике и динамике с заданной точностью.
3. Слежение за вводимыми в систему произвольно изменяющимися входными сигналами (следящее управление).
4. Отработка заданной программы (программное управление).
5. Выбор целесообразных режимов работы электроприводов (адаптивное управление).

Вспомогательные функции систем управления электроприводом:

- защита электродвигателя и другого электрооборудования, направленная на предотвращение аварийных ситуаций (короткое замыкание, перегрузки и т.п.);
- блокировки, исключающие возникновение аварийных и ненормальных режимов при ошибочных действиях персонала и обеспечивающие определенную последовательность операций включения;
- сигнализация о ходе технологического процесса, об исправном или неисправном состоянии элементов системы управления электроприводом.

#### *Требования к системам управления электроприводами*

1. *Технологические* требования:
  - а) обеспечение пуска – торможение – реверса – останова.
  - б) обеспечение требуемого диапазона регулирования.
  - в) точность регулирования – определяется свойствами нагрузочной характеристики (понятие статизма).
2. *Технико-экономические* требования сводятся к минимизации капитальных и экономических затрат.
3. *Надёжность*. Под надёжностью понимают вероятность безотказной работы оборудования в течении определённого интервала времени.
4. *Безопасность*. Обеспечение исправленного заземления, ограждения, доступность конструкции, контроль точек и т.п.

В электроприводах используют контактную и бесконтактную аппаратуру управления. В задачу релейно-контактных схем управления входит:

- включение и отключение двигателя,

- выбор направления и скорости вращения,
- пуск и торможение двигателя,
- создание временных пауз в движении,
- защитное отключение двигателя и остановка механизма.

### *Контактная аппаратура управления*

К этой группе относятся простейшие аппараты: рубильники, пакетные выключатели, контроллеры, универсальные переключатели, командоконтроллеры, путевые переключатели, кнопки. Основными элементами этих аппаратов являются контакты, для изготовления которых применяют медь, бронзу, латунь, в особо ответственных случаях – серебро. Все большее применение находят контакты из металлокерамики, обладающие повышенной надежностью, долговечностью, износостойкостью.

Переключение контактов осуществляется путем воздействия на них различных рычагов, кулачков вручную или механически – элементом движущейся машины.

При размыкании контактов под нагрузкой вследствие действия ЭДС самоиндукции и ионизации воздушного промежутка между ними возможно возникновение электрической дуги, которая вызывает оплавление или подгорание контактов. Для защиты контактов от действия дуги и сокращения времени ее действия применяют различные дугогасительные приспособления и устройства.

Так как электрические контакты требуют ухода и снижают надежность работы установки, то в настоящее время широко внедряют бесконтактную аппаратуру, выполняемую на полупроводниковых элементах.

Основные параметры при выборе аппаратуры управления – рабочее напряжение и рабочий ток аппарата, которые должны быть не ниже напряжений и токов в установке. Также учитываются дополнительные характеристики, такие как допустимая частота включений, показатели надежности, отключающая способность и др.

### *Защита электроприводов*

Важной функцией современных систем управления является защитная. Основными аварийными режимами для электродвигателей являются: короткое замыкание, перегрузка, неполнофазные режимы. Короткое замыкание характеризуется быстрым (доли секунд) и многократным превышением тока от рабочих значений. Перегрузка характеризуется относительно небольшим (десятки процентов) и чаще длительным (единицы минут) превышением тока рабочих значений. Неполнофазные режимы возникают при несимметрии питающего напряжения. При этом ток в фазе (фазах) с меньшим напряжением снижается, в остальных увеличивается. При обрыве фазе, в оставшихся ток возрастает в  $\sqrt{3}$  раз.

Наиболее широко используют плавкие предохранители для защиты от коротких замыканий, тепловые реле для защиты от перегрузок. Возможное перегорание одного или двух предохранителей может привести к неполнофазному

режиму работы двигателя, поэтому необходимо одновременно применять плавкие вставки и тепловые реле. Плавкая вставка дополнительно защитит тепловое реле при коротких замыканиях, тепловое реле сработает при возникновении повышенных токов, вызванных неполнофазным режимом.

Комплексную защиту от коротких замыканий (при помощи электромагнитного расцепителя) и перегрузок (при помощи теплового расцепителя) реализуют автоматические выключатели.

При выборе средств защиты дополнительно необходимо учитывать защитную характеристику аппарата, которая представляет зависимость времени срабатывания от тока.

Защиту персонала от поражения электрическим током и оборудования от токов утечки выполняют устройства защитного отключения (УЗО), реагирующие на дифференциальный ток.

## 4.2. Выбор электродвигателя по мощности

Процесс преобразования электрической энергии в механическую в электродвигателе сопровождается потерями мощности  $\Delta P$ , которые превращаются в тепло. В результате отдельные части электродвигателя нагреваются. Особенно чувствительна к повышению температуры изоляция обмоток, срок службы которой в значительной мере определяет срок службы электродвигателя. Поэтому наибольшая допустимая температура  $t_{\text{доп}}$  электродвигателя определяется применяемыми изоляционными материалами для изготовления его обмоток.

Изоляционные материалы по нагревостойкости делятся на 7 классов (*Y, A, E, B, F, H, C*), из которых наиболее распространенными для электроприводов являются:

**класс A** – хлопчатобумажные ткани и шелк, пропитанные в жидком диэлектрике,  $t_{\text{доп}} = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

**класс E** – синтетические органические пленки (эмали),  $t_{\text{доп}} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

**класс B** – слюда, асбест, стекловолокно,  $t_{\text{доп}} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

**класс F** – слюда, асбест, стекловолокно с синтетическими связывающими веществами и с пропитыванием диэлектрическими составами,  $t_{\text{доп}} = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Изоляция двигателей серий 4A, 5A, AI по классам нагревостойкости (ГОСТ 8865-70) выполняется для двигателей с высотами оси вращения 56...63 мм – класса E; 71...132 мм – класса B; 150...365 мм – класса F.

Срок службы изоляции при указанных предельных температурах примерно 15–20 лет.

Необходимая мощность двигателя для привода рабочей машины напрямую зависит от характера изменения нагрузки и ее величины, что отражается нагрузочной диаграммой привода – изменением мощности на валу (момента, тока) в течении времени.

Различают 8 режимов нагрузки привода, которые определяются характером изменения нагрузки с учетом протекания тепловых процессов в двигателе:

S1 – длительный,

S2 – кратковременный,

- S3 – повторно-кратковременный,
- S4 – повторно-кратковременный с частыми пусками,
- S5 – повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением,
- S6 – перемежающийся,
- S7 – перемежающийся с частыми реверсами,
- S8 – перемежающийся с двумя или более угловыми скоростями.

Наиболее точным методом расчета потребной мощности электродвигателя является метод средних потерь, предполагающий нахождение средних потерь за рабочий цикл и сравнение их с номинальными двигателя.

$$\Delta P_n \leq \Delta P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}, \quad (4.1)$$

где  $\Delta P_n$ ,  $\Delta P_{cp}$ ,  $\Delta P_i$  – номинальные потери двигателя, средние за цикл и на  $i$ -том участке нагрузочной диаграммы,  
 $t_i$  – длительность  $i$ -того участка.

Метод является достаточно трудоемким, поэтому для режимов с изменяющейся нагрузкой (S3, S6 и их производных) необходимую мощность приводного двигателя наиболее часто определяют методами эквивалентных величин, которые предполагают нахождение эквивалентной величины (тока, момента, мощности двигателя) из нагрузочной диаграммы с учетом рабочих характеристик двигателя.

$$I_\vartheta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}, \quad M_\vartheta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}, \quad P_\vartheta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}, \quad (4.2)$$

где  $I_i$ ,  $M_i$ ,  $P_i$  – ток момент и мощность на  $i$ -том участке диаграммы,  
 $t_i$  – длительность  $i$ -того участка.

При несовпадении продолжительности включения (ПВ) со стандартной для выбираемого двигателя, номинальный ток (момент, мощность) двигателя должны удовлетворять условию

$$I_n \geq I_\vartheta \sqrt{\frac{ПВ_{pac}}{ПВ_{cm}}}, \quad M_n \geq M_\vartheta \sqrt{\frac{ПВ_{pac}}{ПВ_{cm}}}, \quad P_n \geq P_\vartheta \sqrt{\frac{ПВ_{pac}}{ПВ_{cm}}}, \quad (4.3)$$

где  $ПВ_{pac}$  – рассчитанная по нагрузочной диаграмме продолжительность включения,

$ПВ_{cm}$  – стандартная продолжительность включения выбираемого двигателя.

При использовании двигателей предназначенных для работы в длитель-

ном режиме их стандартную продолжительность включения считают 100%.

Для кратковременного режима работы двигатель обычно выбирают прямым методом по нагреву.

При несовпадении длительности работы по нагрузочной диаграмме со стандартной длительностью цикла выбираемого двигателя, его номинальная мощность  $P_n$  должна быть не меньше мощности по нагрузочной диаграмме  $P_p$  (эквивалентной при переменной нагрузке)

$$P_n \geq P_p \frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{t_{cm}}{T_n}}}, \quad (4.4)$$

где  $T_n$  – постоянная времени нагрева двигателя,

$t_p$  – продолжительность работы двигателя по нагрузочной диаграмме,

$t_{cm}$  – стандартная продолжительность нагрева выбираемого двигателя.

При использовании двигателей предназначенных для работы в длительном режиме их стандартную длительность работы считают бесконечной.

Выбранный двигатель (для любого режима работы) необходимо проверить на перегрузочную способность. Т.е. проверить, чтобы на любом участке нагрузочной диаграммы момент сопротивления на валу не превышал максимально допустимого для выбранного двигателя.

При невыполнении условий по перегрузочной способности необходимо взять двигатель большей мощности, даже если тепловой режим не будет нарушен.

Обычно большую перегрузочную способность имеют двигатели, предназначенные для работы в кратковременном режиме S2, но их не рекомендуется использовать в других режимах из-за повышенных потерь.

Кроме перечисленных основных условий некоторые механизмы предъявляют особые требования к электроприводу. Проводится проверка выбранного двигателя по дополнительным условиям. Некоторые из них:

При *проверке на допустимое число включений* рассчитанная максимально допустимое число включений в час должно быть больше фактической.

При проверке на *обеспечение допустимого перегрева* при пуске находится превышение температуры двигателя при пуске, которая не должна превышать максимальное рабочее превышение, согласно класса изоляции двигателя.

При проверке на *обеспечение возможности пуска с учетом снижения напряжения питания* учитывается снижение момента двигателя при снижении напряжения питания.

*Обеспечение статической и динамической устойчивости* предполагает проверку на сохранение устойчивой работы привода при изменяющейся нагрузке.

### 4.3. Механика электропривода

Электропривод является электромеханической системой, на его работу влияют помимо электрических параметров и характеристики механические.

В работе электропривода различают два основных режима: установившийся и переходный. В *установившемся режиме* электропривод работает с постоянной скоростью. Нарушение постоянства скорости (при регулировании хода технологического процесса, изменении параметров питающего напряжения и др.) вызывает *переходный режим*, в течение которого система электродвигатель – рабочая машина переходит в новое установившееся состояние.

В электроприводах вращательного движения уравнение движения представляется как уравнение равновесия всех моментов, действующих в электроприводе. При постоянном моменте инерции оно примет вид:

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.5)$$

где  $M$  – электромагнитный момент двигателя;

$M_c$  – статический момент сопротивления на валу двигателя;

$J$  – момент инерции вращающихся масс в электроприводе, приведенный к одной оси, как правило, к валу двигателя;

$\frac{d\omega}{dt}$  – ускорение;

$J \cdot \frac{d\omega}{dt}$  – динамический момент, обусловленный изменением скорости;

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем, уравнивается статическим моментом сопротивления и динамическим моментом. Статический момент сопротивления может быть активным или реактивным. Активные статические моменты не изменяют направления действия при изменении направления движения. Реактивные моменты сопротивления изменяют направления действия при изменении направления движения электропривода.

В переходных процессах моменты и токи двигателя могут принимать большие значения. К примеру, при пуске двигателя пусковой ток превышает номинальные значения в 3,5...7,5 раз. Длительное протекание таких токов может повредить двигатель, питающую сеть, аппараты управления. Поэтому важно знать длительность протекания переходных процессов в электроприводе.

Время переходного процесса можно найти непосредственным интегрированием уравнения движения

$$t_{п.п.} = \int dt = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M - M_c} d\omega. \quad (4.6)$$

Из-за того, что входящие в формулу величины являются сложными зави-

симостями от скорости, углового положения и времени, нахождение интеграла весьма проблематично. Поэтому используют различные численные приближенные методы интегрирования.

Одним из таких методов является графоаналитический метод площадей, по сути, являющийся методом Эйлера для численного нахождения интегралов.

#### **4.4. Особенности работы электропривода в сельском хозяйстве**

Эксплуатационные условия работы электропривода в сельском хозяйстве:

##### *Условия окружающей среды*

К ним относятся повышенная влажность, загазованность, запыленность, наличие агрессивных сред, резкие суточные и сезонные колебания температуры. Совместное воздействие этих факторов разрушительно действует на все элементы привода, особенно на состояние изоляции и контактов, снижая срок службы в несколько раз.

##### *Технологические особенности работы электроприводов*

Основные из которых: низкий коэффициент использования оборудования, значительные трудноконтролируемые изменения нагрузки, низкая загрузка машин, приводящая к низким энергетическим показателям привода.

Отдельно необходимо выделить *особенности электрических сетей* – большую протяженность и соизмеримость мощности питающих трансформаторов с мощностью отдельных потребителей.

Особенности сетей могут привести к неустойчивой работе приводов и, даже, к невозможности их запуска. Это объясняется значительным падением напряжения на клеммах запускаемого двигателя и соседних работающих. Поэтому необходимо проводить проверку возможности пуска и устойчивости работы двигателей. Она заключается в сравнении падения напряжения на клеммах двигателя с максимально допустимыми.

Для обеспечения пуска и устойчивости работы можно принимать следующие меры: увеличить сечение питающей линии, сократить длину линии за счет рационального расположения питающей ТП, использовать трансформатор большей мощности или трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания. Однако они, обычно, приводят к дополнительным, не всегда оправданным, затратам.

## 5. Пример выполнения расчетов

Рассмотрим пример расчетов, если три последних цифры номера зачетной книжки – 903.

### 5.1. Выбор электродвигателя привода смесителя кормов

Нагрузочная диаграмма смесителя задана повторяющимся циклом в соответствии с требованиями технологического процесса. Согласно задания на курсовую работу на первом участке (3 мин) двигатель отключен, мощность на втором участке (2 мин) нагрузочной диаграммы – 9 кВт, на третьем (2 мин) – 0 кВт, на четвертом (2 мин) – 2 кВт.

Т. к. в дальнейшем диаграмма повторяется, расчеты будем проводить на одном ее цикле, изображенном на рисунке 3.

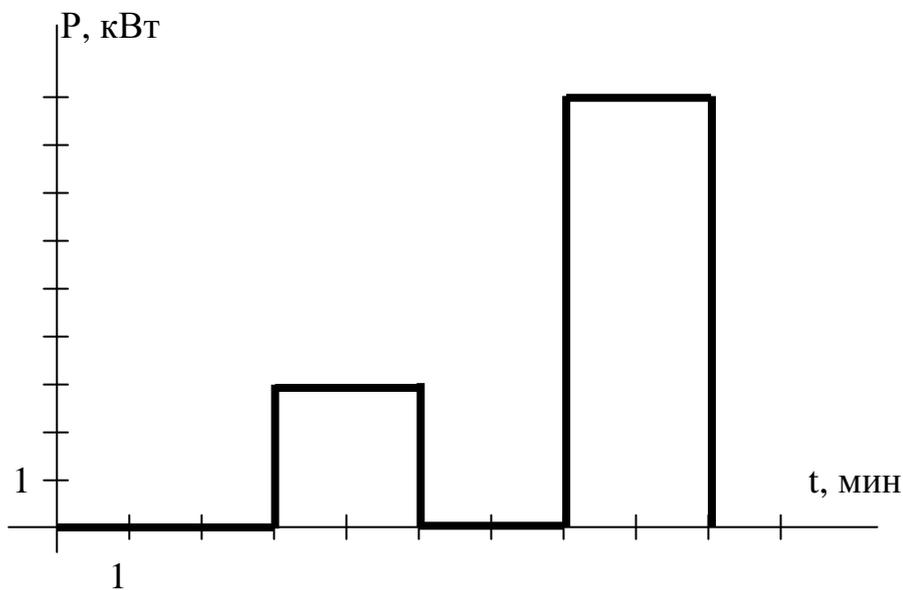


Рисунок 2. Нагрузочная диаграмма электропривода.

Используя метод эквивалентной мощности, проведем расчет необходимой мощности привода. Режим работы привода – S3 – повторно-кратковременный с продолжительностью включения

$$ПВ\% = \frac{t_p}{t_u} 100\% , \quad (5.1)$$

$$ПВ\% = (4/9) \cdot 100\% = 44\% ,$$

где  $t_p = 2+2 = 4$  мин – время работы двигателя за цикл нагрузочной диаграммы,

$t_u = 3+2+2+2 = 9$  мин – длительность цикла.

Эквивалентная мощность нагрузки

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum P_i t_i}{\sum t_i}} \quad (5.2)$$

$$P_{\text{э}} = \sqrt{(0^2 \cdot 3 + 9^2 \cdot 2 + 0^2 \cdot 2 + 3^2 \cdot 2) / (3 + 2 + 2 + 2)} = 4,5 \text{ кВт}$$

Для привода механизма будем использовать двигатель, предназначенный заводом изготовителем для длительного режима работы. Поэтому его стандартной ПВ<sub>ст</sub>% считаем 100%. Мощность выбираемого двигателя должна удовлетворять условию

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{э}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}\%}{\text{ПВ}_{\text{см}}\%}} \quad (5.3)$$

$$P_{\text{н}} \geq 4,5 \cdot \sqrt{44/100} = 2,9 \text{ кВт.}$$

Выбираем двигатель 4А100S4У3 (приложение 1)

С параметрами –

Номинальная мощность  $P_{\text{н}} = 3 \text{ кВт}$ ,

Номинальное скольжение  $s_{\text{н}} = 5,3 \%$ ,

Коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,82$ ,

Номинальный КПД  $\eta_{\text{н}} = 83 \%$ ,

Кратность пускового момента  $\mu_{\text{п}} = 2$ ,

Кратность критического момента  $\mu_{\text{к}} = 2,2$ ,

Кратность минимального момента  $\mu_{\text{мин}} = 1,6$ ,

Кратность пускового тока  $K_{\text{i}} = 6,5$ .

Проверим выбранный двигатель на перегрузочную способность. Максимальная мощность по нагрузочной диаграмме  $P_{i.\text{max}} = 9 \text{ кВт}$ .

Проверим выполнение условия перегрузочной способности

$$\frac{M_{i.\text{max}}}{M_{\text{н}}} < \mu_{\text{к}} - 0,25. \quad (5.4)$$

Т.к. скорость вращения при работе асинхронного двигателя меняется незначительно, отношение моментов можно заменить отношением мощностей. Тогда условие переписывается в виде

$$\frac{P_{i.\text{max}}}{P_{\text{н}}} < \mu_{\text{к}} - 0,25,$$
$$9/3 = 3 > 2,2 - 0,25 = 1,95.$$

Для двигателя 4A100L4У3 мощностью 4 кВт условие перегрузочной способности

$$9/4 = 2,25 > 2,2 - 0,25 = 1,95.$$

Условие также не выполняется.

Выбираем двигатель– 4A112M4У3

С параметрами –

Номинальная мощность  $P_n = 5,5$  кВт ,

Номинальное скольжение  $s_n = 5$  % ,

Коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,86$ ,

Номинальный КПД  $\eta_n = 85,5$  % ,

Кратность пускового момента  $\mu_n = 2$ ,

Кратность критического момента  $\mu_k = 2,2$ ,

Кратность минимального момента  $\mu_{\min} = 1,6$ ,

Кратность пускового тока  $K_i = 7$ .

Для которого условие перегрузочной способности

$$9/5,5 = 1,64 < 2,2 - 0,25 = 1,95.$$

выполняется.

Методы эквивалентных величин не точно учитывают постоянные потери в двигателе, поэтому проверим двигатель по нагреву более точным методом средних потерь. Для этого найдем номинальные потери двигателя по формуле

$$\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}, \quad (5.5)$$

$$\Delta P_n = 5500 \cdot (1 - 0,855) / 0,855 = 1127 \text{ Вт.}$$

Для асинхронных двигателей базового закрытого исполнения отношение постоянных и переменных потерь

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P_{v,n}} \approx 0,5.$$

Поэтому треть номинальных потерь составляют постоянные потери, а две трети – переменные потери.

$$\begin{aligned} \Delta P_c &= \Delta P_n / 3 = 1127 / 3 = 376 \text{ Вт,} \\ \Delta P_{v,n} &= 2 \cdot \Delta P_n / 3 = 2 \cdot 1127 / 3 = 751 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

По формуле

$$\Delta P_i = \Delta P_c + \Delta P_{v.н} \left( \frac{P_i}{P_n} \right)^2 \quad (5.6)$$

найдем потери на каждом участке нагрузочной диаграммы

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= 0 \text{ Вт}, \\ \Delta P_2 &= 376 + 751 \cdot (9/5,5)^2 = 2387 \text{ Вт}, \\ \Delta P_3 &= 0 \text{ Вт}, \\ \Delta P_4 &= 376 + 751 \cdot (2/5,5)^2 = 475 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Средние потери за цикл

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum \Delta P_i t_i}{\sum t_i}, \quad (5.7)$$
$$\Delta P_{cp} = (2387+475)/(3+2+2+2) = 318 \text{ Вт}.$$

Тепловой режим двигателя не будет нарушен, если средние потери не превысят номинальных потерь двигателя, т.е.

$$\Delta P_{cp} = 318 \text{ Вт} < \Delta P_n = 1127 \text{ Вт}.$$

Условие выполняется, поэтому тепловой режим работы двигателя не будет нарушен.

## 5.2. Расчет продолжительности пуска электропривода

Для расчета продолжительности пуска используем графоаналитический метод площадей.

Произведем расчет механической характеристики двигателя. Вычислим значения момента и частоты вращения в характерных точках характеристики:

*Синхронная точка.*

Скорость двигателя равна синхронной

$$n_1 = \frac{60f}{p}, \quad (5.8)$$

где  $f$  – частота токов статора,  
 $p$  – число пар полюсов статора.

$$n_1 = (60 \cdot 50)/2 = 1500 \text{ мин}^{-1}.$$

Момент двигателя равен 0.

*Номинальная точка.*

Номинальная частота вращения

$$n_n = n_1(1 - s_n), \quad (5.9)$$

где  $s_n$  – номинальное скольжение.

$$n_n = 1500 \cdot (1 - 0,05) = 1425 \text{ мин.}^{-1}.$$

Номинальный момент рассчитывается по формуле

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n}, \quad (5.10)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность двигателя,

$n_n$  – номинальная частота вращения ротора.

$$M_n = 9,55 \cdot (5500/1425) = 36,9 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

*Критическая точка.*

критическое скольжение

$$s_k = s_n \left( \mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1} \right), \quad (5.11)$$

$$s_k = 0,05 \cdot (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,21.$$

Критическая частота вращения

$$n_k = n_1(1 - s_k),$$
$$n_k = 1500 \cdot (1 - 0,21) = 1185 \text{ мин.}^{-1}.$$

Критический момент

$$M_k = \mu_k M_n, \quad (5.12)$$

где  $\mu_k$  – кратность критического момента (из паспортных данных двигателя).

$$M_k = 2,2 \cdot 36,9 = 81,2 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

*Точка минимального момента.*

Минимальный момент определяется по формуле

$$M_{\min} = \mu_{\min} M_n, \quad (5.13)$$

где  $\mu_{\min}$  - кратность минимального момента (из паспортных данных).

$$M_{\min} = 1,6 \cdot 36,9 = 59 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Частота вращения в минимального точке приблизительно равна 20% от синхронной.

$$n_{\min} = 0,2 \cdot 1500 = 500 \text{ мин}^{-1}.$$

*Пусковая точка.*

Частота вращения в пусковой точке равно 0. Момент рассчитывается по формуле

$$M_n = \mu_n M_n, \quad (5.14)$$

где  $\mu_n$  - кратность пускового момента (из паспортных данных).

$$M_n = 2,0 \cdot 36,9 = 73,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Дополнительно к этим точкам необходимо рассчитать еще три, используя упрощенную формулу Клосса

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s}}. \quad (5.15)$$

Скольжение в первой точке возьмем приблизительно равным половине от номинального, во второй и третьей точках приблизительно равномерно между номинальным и критическим

$$s_1 = 0,025; s_2 = 0,1; s_3 = 0,15.$$

Соответствующие им частоты вращения

$$n_1 = 1500 \cdot (1 - 0,025) = 1463 \text{ мин}^{-1}.$$

$$n_2 = 1500 \cdot (1 - 0,1) = 1350 \text{ мин}^{-1}.$$

$$n_3 = 1500 \cdot (1 - 0,15) = 1275 \text{ мин}^{-1}.$$

## Моменты в точках

$$M_1 = (2 \cdot 81,2) / (0,025/0,21 + 0,21/0,025) = 18,9 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$M_2 = (2 \cdot 81,2) / (0,1/0,21 + 0,21/0,1) = 62,5 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$M_3 = (2 \cdot 81,2) / (0,15/0,21 + 0,21/0,15) = 77,3 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Данные расчетов сведем в таблицу

Таблица 1 – Механическая характеристика двигателя

s	0	0,025	0,05	0,1	0,15	0,21	0,8	1
n, мин <sup>-1</sup>	1500	1463	1425	1350	1275	1185	500	0
M, Н·м	0	18,9	36,9	62,5	77,3	81,2	59	73,8

Рассчитаем механическую характеристику производственного механизма, которая является вентиляторной и может быть рассчитана по формуле Бланка

$$M = M_{c.0.} + M_{c.n.} \left( \frac{n}{n_n} \right)^2, \quad (5.16)$$

где  $M_{c.0.}$  – начальный момент сопротивления,

$M_{c.n.}$ ,  $n_n$  – номинальные момент сопротивления и частота вращения.

Согласно заданию

$$M_{c.0.} = 0,2 M_n = 0,2 \cdot 36,9 = 7,4 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$M_{c.n.} = 0,8 M_n = 0,8 \cdot 36,9 = 29,5 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где  $M_n$  – номинальный момент двигателя.

Номинальные частоты механизма и двигателя совпадают.

Результаты расчета характеристики механизма сведем в таблицу 2.

Таблица 2 - Механическая характеристика производственного механизма

n, мин <sup>-1</sup>	0	300	600	900	1200	1500
$\dot{I}_{\dot{n}}, \dot{I} \cdot \dot{i}$	7,4	8,6	12,1	18	26,3	37,1

Для нахождения времени пуска электропривода на одном чертеже строим механическую характеристику двигателя  $M_d(n)$  и механическую характеристику производственного механизма  $M_c(n)$  (рисунок 4).

Находим зависимость динамического момента от частоты  $M_{дин}(n) = M_d(n) - M_c(n)$  как графическую разность характеристик.

Аппроксимируем полученную характеристику ступенчатой кривой. Для достижения необходимой точности число ступеней должно быть не менее 5.

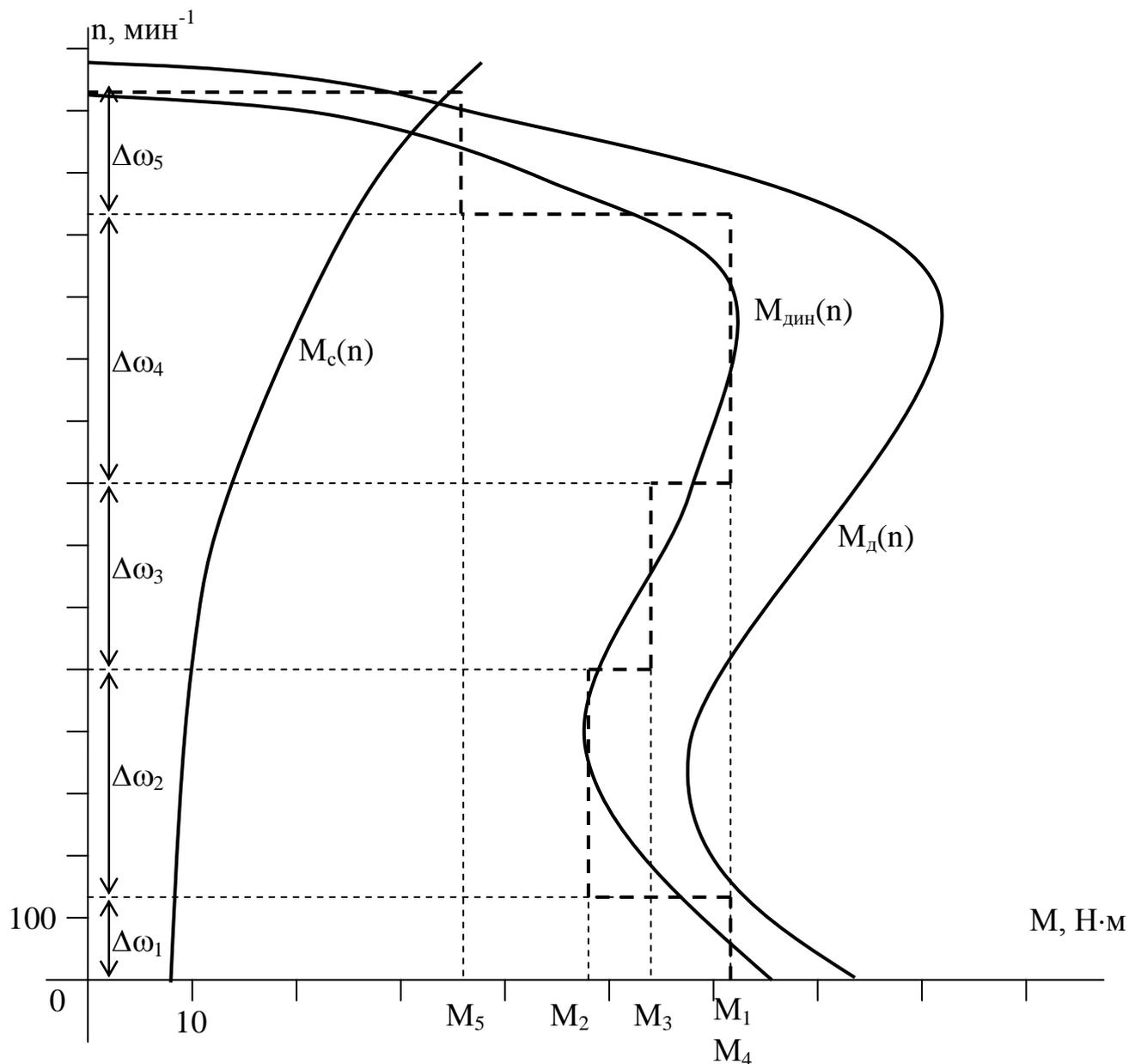


Рисунок 3. Нахождение времени пуска электропривода.

Согласно уравнению движения электропривода, заменив бесконечно малые приращения конечными, находим время разгона на каждом вертикальном участке по формуле

$$\Delta t_i = J \frac{\Delta \omega_i}{M_{динi}} = J \frac{\Delta n_i}{9,55 M_{динi}}, \quad (5.17)$$

где  $J$  – суммарный приведенный момент инерции электропривода.

Согласно заданию на курсовую работу

$$J = 10 \cdot J_d = 10 \cdot 1,66 \cdot 10^{-2} = 16,6 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$J_d$  – момент инерции двигателя.

$\Delta\omega_i$  – изменение скорости на  $i$ -том участке,

$M_{динi}$  – динамический момент на  $i$ -том участке.

$$\Delta t_1 = 0,166 \cdot 130 / (9,55 \cdot 62) = 0,036 \text{ с,}$$

$$\Delta t_1 = 0,166 \cdot 366 / (9,55 \cdot 48) = 0,132 \text{ с,}$$

$$\Delta t_1 = 0,166 \cdot 300 / (9,55 \cdot 54) = 0,096 \text{ с,}$$

$$\Delta t_1 = 0,166 \cdot 430 / (9,55 \cdot 62) = 0,120 \text{ с,}$$

$$\Delta t_1 = 0,166 \cdot 200 / (9,55 \cdot 36) = 0,096 \text{ с.}$$

Общее время разгона электропривода

$$t_{раз} = \sum \Delta t_i, \quad (5.18)$$

$$t_{раз} = 0,036 + 0,132 + 0,096 + 0,120 + 0,096 = 0,48 \text{ с.}$$

Строим разгонную кривую, показывающую изменение скорости вращения двигателя во время пуска (рисунок 5).

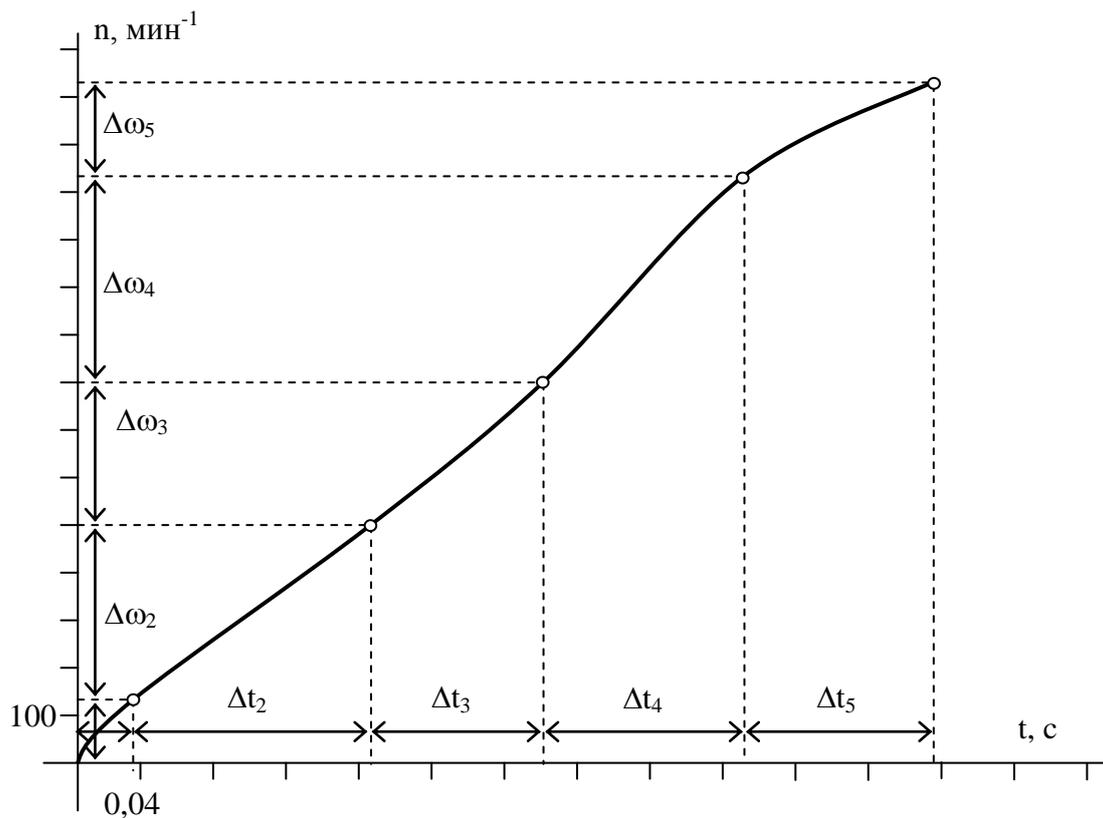


Рисунок 4. Разгонная кривая электропривода.

### 5.3. Проверка на допустимый перегрев при пуске

Потери энергии при пуске практически полностью определяются потерями энергии в обмотках двигателя, которые пропорциональны квадрату силы тока.

С учетом того, что для асинхронных двигателей среднее значение тока при пуске примерно 0,9 его пускового значения, можно получить формулу для определения потерь

$$\Delta A_n = 0,81 \frac{1 - \eta_n}{\eta_n (1 + \alpha)} P_n K_I^2 t_n, \quad (5.19)$$

где  $P_n$ ,  $\eta_n$  – номинальные значения мощности двигателя и КПД;

$K_I$  – кратность пускового тока двигателя;

$t_n$  – время пуска привода;

$\alpha$  – отношение постоянных потерь к номинальным переменным, для асинхронных двигателей 0,5...0,7; для двигателей постоянного тока 0,4...1,0.

$$\Delta A_n = 0,81 \cdot (1 - 0,855) \cdot 5500 \cdot 6^2 \cdot 0,48 / 0,855 / (1 + 0,5) = 8704 \text{ Дж.}$$

При проверке на обеспечение допустимого перегрева при пуске находится температура нагрева при пуске

$$\theta_k = \frac{\Delta A_n}{c \cdot m}, \quad (5.20)$$

где  $c$ ,  $m$  – теплоемкость и масса обмоток двигателя (теплоемкость меди  $c = 390 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ). При пуске длительностью менее 1 мин используют теплоемкость и массу обмоток двигателя.

$$\theta_k = 8704 / 390 / 5,6 = 3,98 \text{ К}$$

Температура во время пуска повышается на 3,98 К, что не превышает наибольшее превышение температуры двигателя 80 К, которая определяется по классу нагревостойкости изоляции. Для двигателей серии 4А мощностями до 10 кВт класс нагревостойкости В.

Если температура превышает максимально допустимую по классу нагревостойкости изоляции двигателя необходимо принять меры для уменьшения времени пуска (использовать двигатель с повышенным пусковым моментом, разгонную муфту и т.д.) или использовать двигатель большей мощности.

## 5.4. Выбор двигателя выгрузного транспортера

По заданию двигатель выгрузного транспортера работает в кратковременном режиме с нагрузкой на валу равной последней цифре в номере зачетной книжки в кВт, т.е. с нагрузкой 3 кВт.

В реальных условиях, как показывают многочисленные эксперименты, кривая нагрева двигателя отличается от теоретической, выведенной с рядом допущений. При повышении температуры действительная кривая нагрева приближается к экспоненциальной.

В кратковременном режиме температура двигателя не успевает достигнуть установившихся значений, поэтому для привода можно использовать двигатель номинальной мощностью меньше, чем мощность на валу на участке работы.

Предварительно выбираем двигатель 4А80В4У3

С параметрами –

Номинальная мощность  $P_H = 1,5$  кВт ,

Номинальное скольжение  $s_H = 6,7$  % ,

Коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,83$ ,

Номинальный КПД  $\eta_H = 77$  % ,

Кратность пускового момента  $\mu_H = 2$ ,

Кратность критического момента  $\mu_K = 2,2$ ,

Кратность минимального момента  $\mu_{\min} = 1,6$ ,

Кратность пускового тока  $K_i = 5$ .

Постоянную времени нагрева в минутах можно найти по эмпирической формуле

$$T_{нагр} = 6 \frac{m \cdot \theta_n \cdot \eta_H}{P_H (1 - \eta_H)}, \quad (5.21)$$

где  $m$  - масса электродвигателя, кг;

$\theta_i$  - нормированное превышение температуры двигателя при номинальной нагрузке при измерении методом сопротивления, град;

$\eta_H$  - номинальный КПД двигателя;

$P_H$  - номинальная мощность двигателя, Вт.

$$T_{нагр} = 6 \frac{21,3 \cdot 80 \cdot 0,77}{1500(1 - 0,77)} = 10,9 \text{ мин.}$$

Выбранный электродвигатель должен удовлетворять условию

$$P_H \geq P_{\text{э}} \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_{p.ст.}}{T_H}}}}, \quad (5.22)$$

где  $P_{\text{э}}$  – эквивалентная мощность нагрузки на рабочем участке.

$t_{p.ст.}$  - стандартное время работы двигателя.

Если условие выполняется со значительным запасом, это говорит о завышенной мощности двигателя.

Выбираемый двигатель предназначен заводом изготовителем для режима S1, поэтому его стандартное время работы  $t_{p.ст.} = \infty$  и условие запишется в виде

$$P_n \geq P_{\Sigma} \sqrt{1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}}}, \quad (5.23)$$

$$1,5 \leq 3 \sqrt{1 - e^{-\frac{6}{10,9}}} = 1,99.$$

Условие не выполняется, значит тепловой режим электродвигателя будет нарушен.

Выбираем двигатель на одну ступень большей мощности

Предварительно выбираем двигатель 4A90L4УЗ

С параметрами –

Номинальная мощность  $P_n = 2,2$  кВт ,

Номинальное скольжение  $s_n = 5,4$  % ,

Коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,83$ ,

Номинальный КПД  $\eta_n = 80$  % ,

Кратность пускового момента  $\mu_n = 2$ ,

Кратность критического момента  $\mu_k = 2,2$ ,

Кратность минимального момента  $\mu_{min} = 1,6$ ,

Кратность пускового тока  $K_i = 6$ .

Для него условие по нагреву

$$T_{нагр} = 6 \frac{30 \cdot 80 \cdot 0,8}{2200(1 - 0,8)} = 10,9 \text{ мин},$$

$$2,2 \geq 3 \sqrt{1 - e^{-\frac{6}{10,9}}} = 1,99$$

выполняется.

Проверим выбранный двигатель на перегрузочную способность. Максимальная мощность во время работы  $P_{max} = 3$  кВт.

Условие перегрузочной способности

$$\frac{M_{i.max}}{M_n} < \mu_k - 0,25 \quad (5.24)$$

Т.к. скорость вращения при работе асинхронного двигателя меняется незначительно, отношение моментов можно заменить отношением мощностей. Тогда условие переписывается в виде

$$\frac{P_{i.\max}}{P_H} < \mu_K - 0,25, \quad (5.25)$$

$$3/2,2 = 1,37 \leq 2,2 - 0,25 = 1,95.$$

Условие выполняется, двигатель выбран правильно.

### 5.5. Расчет коэффициентов механической и тепловой перегрузки

Коэффициент тепловой перегрузки представляет собой отношение повышенных кратковременных потерь мощности  $\Delta P_{кр}$  в двигателе к его номинальным  $\Delta P_H$ , то есть

$$p_T = \Delta P_{кр} / \Delta P_H. \quad (5.26)$$

В режиме S3, в котором работает двигатель M1, коэффициент тепловой перегрузки

$$p_T = \frac{1 - e^{-(t_{раб} + \beta_0 \cdot t_{откл}) / T_{нагр}}}{1 - e^{-t_{раб} / T_{нагр}}}, \quad (5.27)$$

где  $e=2,718$ ;

$t_{раб}; t_{откл}$  - продолжительности работы и отключенного состояния электродвигателя или работы на холостом ходу;

$\beta_0$  - коэффициент, учитывающий ухудшение теплоотдачи в отключенном состоянии;

$T_{нагр}$  - постоянная времени нагрева электродвигателя, мин.

Для рассчитываемого двигателя, самовентилируемого закрытого обдуваемого исполнения,  $\beta_0 = 0,7$ .

Постоянная времени нагрева согласно формуле 21

$$T_{нагр} = 6 \frac{58 \cdot 80 \cdot 0,855}{5500(1 - 0,855)} = 11,4 \text{ мин.}$$

Коэффициент тепловой перегрузки

$$p_T = \frac{1 - 2,72^{-(4+0,7 \cdot 5)/11,4}}{1 - 2,72^{-4/11,4}} = 2,67.$$

Если режим работы электродвигателя отличается от длительного S1, то с учетом возможных технологических пауз в работе его коэффициент механиче-

ской перегрузки  $p_M$  рассчитывают через коэффициент тепловой перегрузки  $\delta_\theta$  по формуле

$$p_M = p_I = \sqrt{p_T(\alpha + 1) - \alpha}, \quad (5.28)$$

где  $\alpha = \Delta P_c / \Delta P_{эл.н}$  - отношение постоянных потерь мощности в двигателе к номинальным переменным (электрическим потерям).

Для асинхронных двигателей  $\alpha=0,45\dots 0,55$ , принимаем 0,5.

$$p_M = p_I = \sqrt{2,67 \cdot (1 + 0,5) - 0,5} = 1,87.$$

Расчеты для двигателя М2 проводим аналогично. Постоянная времени нагрева была найдена ранее. Учитываем, что для кратковременного режима работы S2, когда в течении технологических пауз в работе электродвигатель полностью охлаждается до температуры окружающей среды, то есть  $t_{откл} \rightarrow \infty$ , знаменатель равен 1 и

$$p_T = \frac{1}{1 - e^{-t_{раб}/T_{нагр}}}. \quad (5.29)$$

Значения коэффициентов

$$p_T = \frac{1}{1 - 2,72^{-6/10,9}} = 2,38,$$

$$p_M = p_I = \sqrt{2,38 \cdot (1 + 0,5) - 0,5} = 1,75.$$

По известной мощности нагрузки  $P_c$  (эквивалентной при переменной нагрузке) и найденному коэффициенту механической перегрузки можно определять расчетная мощность двигателя

$$P_{рас} = \frac{P_c}{p_M}.$$

По расчетной мощности выбирается номинальная мощность двигателя по условию

$$P_n \geq P_{рас}.$$

Расчетные мощность для двигателя М1

$$P_{рас} = 4,5 / 1,87 = 2,4 \text{ кВт.}$$

Для двигателя М2

$$P_{рас} = 3 / 1,75 = 1,71 \text{ кВт.}$$

Выбранные ранее мощности двигателей удовлетворяют этим условиям.

## 5.6. Проверка возможности пуска двигателя М1 и устойчивости работы двигателя М2 при пуске М1

Для проверки двигателя на возможность пуска найдем максимально допустимое падение напряжения при пуске двигателя

$$\Delta U = 1 - \sqrt{\frac{M_{изб}^0 + M_{тр}^0}{\mu_n}}, \quad (5.30)$$

где  $M_{изб}^0$  – относительный (к номинальному) избыточный момент, идущий на разгон электропривода. Обычно принимают  $M_{изб}^0 = 0,25$ .

$M_{тр}^0$  – относительный момент трогания – момент сопротивления на валу двигателя при пуске.

$M_{тр}^0 = 1$ , т.к. запуск проводится с номинальной нагрузкой.

Выбранный двигатель имеет провал в механической характеристике и если момент сопротивления на валу при пуске будет больше минимального и меньше пускового, разгон прекратится на частоте около 20% от синхронной. Поэтому при пуске необходимо, чтобы момент на валу не превышал минимальный, а в формуле 30 использовать кратность минимального момента  $\mu_{min}$ .

$$\Delta U = 1 - \sqrt{\frac{M_{изб}^0 + M_{тр}^0}{\mu_{min}}}, \quad (5.31)$$

$$\Delta U = 1 - \sqrt{(1+0,25)/1,6} = 0,12.$$

Найдем падение напряжения на зажимах двигателя при пуске, которое будет складываться из падения напряжения в трансформаторе и падения напряжения в линии. Для расчетов потребуется пусковой ток двигателя  $I_{п.дв.}$  и номинальный ток трансформатора  $I_{н.тр.}$ . Вычислим их.

Пусковой ток двигателя

$$I_{н.дв.} = K_I \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \eta_n \cos \varphi}, \quad (5.32)$$

где  $K_I$  – кратность пускового тока двигателя,

$P_n, U_n, \eta_n$  – номинальные мощность, напряжение и КПД двигателя,  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности.

$$I_{п.дв.} = (6 \cdot 5500) / (1,73 \cdot 380 \cdot 0,84 \cdot 0,83) = 72 \text{ А.}$$

Номинальный ток трансформатора

$$I_{н.тр} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (5.33)$$

где  $S_n$ ,  $U_n$  – номинальные мощность и напряжение трансформатора.

$$I_{н.тр.} = 63000 / (1,73 \cdot 400) = 91 \text{ А.}$$

Падение напряжения в линии

$$\Delta U_{л} = \frac{I_{н.дв.} \cdot l \cdot \sqrt{R_n^2 + x_n^2}}{U_n}, \quad (5.34)$$

где  $l$  – длина линии,

$R_n$  – активное погонное сопротивление линии,

$x_n$  – реактивное погонное сопротивление линии, принимается 0,4 Ом/км для воздушной линии 0,4 кВ,

$U_n$  – номинальное фазное напряжение питания,

$I_{п.дв.}$  – пусковой ток двигателя.

$$\Delta U_{л} = (72 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{2,2^2 + 0,4^2}) / 220 = 0,146.$$

Падение напряжения в трансформаторе

$$\Delta U_{тр} = \frac{u_k \% \cdot I_{н.дв.}}{100 \cdot I_{н.тр.}}, \quad (5.35)$$

где  $u_k\%$  - напряжение короткого замыкания трансформатора.

$$\Delta U_{тр} = (8,5 \cdot 72) / (91 \cdot 100) = 0,067.$$

Суммарное падение напряжения

$$\Delta U = \Delta U_{л} + \Delta U_{тр} = 0,146 + 0,067 = 0,214,$$

что больше максимально допустимого 0,12. Поэтому двигатель не запустится.

Для обеспечения пуска можно предложить следующие меры: увеличить сечение питающей линии, сократить длину линии за счет рационального расположения питающей ТП, использовать трансформатор большей мощности или трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания.

При определении устойчивости работы двигателя М2 при пуске двигателя М1, пренебрегаем относительно малым рабочим током двигателя М2

по сравнению с пусковым током двигателя М1. Поэтому используем найденное ранее падение напряжения.

Максимально допустимое снижение напряжения для устойчивой работы

$$\Delta U_{\text{дон}} = 1 - \sqrt{\frac{M_C^0}{\mu_k}}, \quad (5.36)$$

где  $M_C^0$  - относительный момент сопротивления на валу двигателя, т.к. он работает с номинальной нагрузкой  $M_C^0 = 1$ ,  $\mu_k$  - кратность критического момента.

$$\Delta U_{\text{дон}} = 1 - \sqrt{\frac{1}{2,2}} = 0,28.$$

Падение напряжения в линии  $\Delta U = 0,214$  меньше найденного максимально допустимого, поэтому двигатель М2 будет устойчиво работать при пуске двигателя М1.

Для обеспечения пуска двигателя М1 можно предложить следующие меры: увеличить сечение питающей линии, сократить длину линии за счет рационального расположения питающей ТП, использовать трансформатор большей мощности или трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания.

Будем использовать провод большего сечения, чтобы снизить суммарные потери до максимально допустимого, т.е. на  $0,214 - 0,12 = 0,094$ . Пропорционально снижению потерь необходимо увеличить сечение провода не менее чем в  $0,146 / (0,146 - 0,094) = 2,8$  раза.

Выбираем провод А-50 с погонным сопротивлением  $0,7$  Ом/км. Падение напряжения в линии составит

$$\Delta U_{\text{л}} = (72 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{0,7^2 + 0,4^2}) / 220 = 0,046,$$

а суммарное падение напряжения

$$\Delta U = \Delta U_{\text{л}} + \Delta U_{\text{тр}} = 0,046 + 0,067 = 0,114.$$

Что меньше максимально допустимого. Двигатель запустится.

## 5.7. Схема управления смесителем

Рассмотрим схему управления смесителем (рисунок 3).

Схема предусматривает защиту от коротких замыканий при помощи автоматического выключателя QF и предохранителей FU1 – FU3. От возможных перегрузок двигателя защищают тепловые реле КК1, КК2.

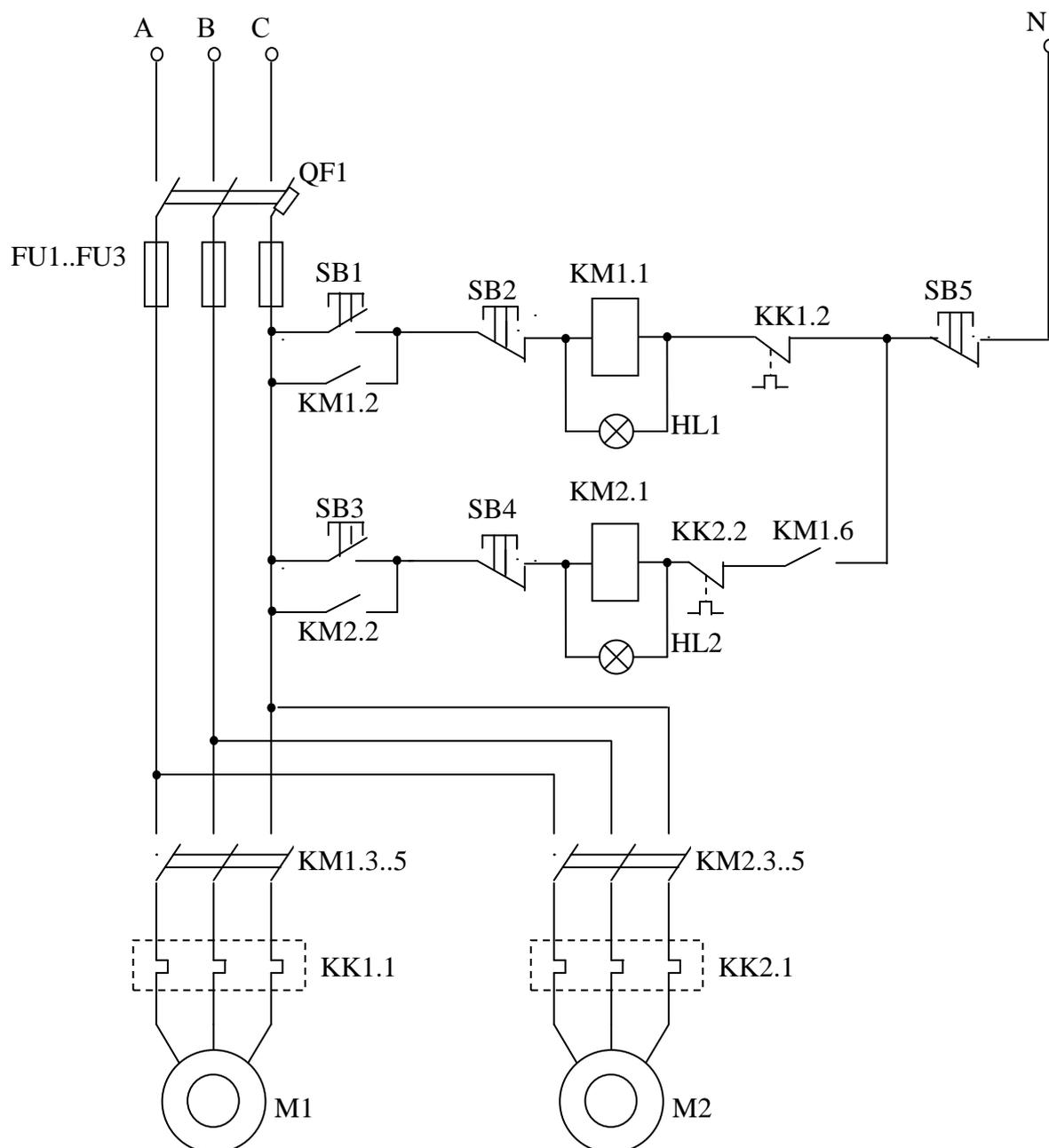


Рисунок 5. Схема управления смесителем.

Работа схемы происходит следующим образом. При замыкании контактов автоматического выключателя QF1 напряжение подается на схему.

Рассмотрим работу цепи управления двигателем M1. Нажав на кнопку SB1, замыкается цепь катушки магнитного пускателя KM1.1, по которой начинает

течь ток. Магнитный пускатель срабатывает и замыкает силовые контакты КМ1.3..5, через которые напряжение подается на двигатель. Он начинает работать. Одновременно замыкается контакт КМ1.2 и блокирует кнопку SB1. Теперь при отпускании кнопки, цепь катушки остается замкнутой через этот контакт.

Если необходимо остановить двигатель, нажимается кнопка SB2. Размыкается цепь катушки магнитного пускателя. Он отпускает, разрывается цепь питания двигателя, он останавливается.

Цепь управления двигателем М2 работает аналогично, но может функционировать только при срабатывании пускателя КМ1, контакт которого КМ1.6 замыкается и подает питание на цепь управления при работающем двигателе М1. Тем самым обеспечивается блокировка работы двигателя.

Кнопка SB5 позволяет разорвать цепи управления обоих пускателей, что приводит к остановке обоих двигателей. При возникновении коротких замыканий в схеме срабатывает электромагнитный расцепитель автоматического выключателя QF и размыкает его контакты или же перегорают предохранители FU1 – FU3. При перегрузках в двигателях срабатывают соответствующие тепловые реле КК1, КК2, своими контактами размыкая цепь управления. Время срабатывания данной защиты находится в пределах десятков секунд. Также тепловое реле способно защитить двигатель при перегорании одной или двух плавких вставок. При этом в оставшейся фазе будут протекать повышенные токи, от которых и происходит срабатывание защиты.

## 5.8. Выбор аппаратуры управления и защиты

Все выбираемые аппараты должны быть рассчитаны на рабочее напряжение не ниже 380 В.

Ток главных контактов магнитного пускателя должен быть не менее номинального тока двигателя. Номинальный ток двигателя

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \eta_n \cos \varphi} \quad (5.37)$$

Номинальный ток двигателя М1

$$I_n = 5500 / (1,73 \cdot 380 \cdot 0,84 \cdot 0,83) = 12 \text{ А.}$$

Выбираем магнитный пускатель ПМЕ-212 с номинальным током 25 А.

Номинальный ток двигателя М2

$$I_n = 2000 / (1,73 \cdot 380 \cdot 0,81 \cdot 0,75) = 5 \text{ А.}$$

Выбираем магнитный пускатель ПМЕ-112 с номинальным током 10 А.

В цепи управления протекают токи не превышающие 1 А, поэтому выбираем кнопочные станции ПКЕ 022 с номинальным током 5А.

Номинальный ток теплового реле должен отличаться от номинального тока двигателя не более чем на 15%. При наладке схемы ток теплового реле соответствующим регулятором устанавливается равным номинальному току двигателя.

Для двигателя М1 номинальный ток теплового реле должен находиться от  $0,85 \cdot 12 = 10,2$  А до  $1,15 \cdot 12 = 13,8$  А. Выбираем тепловое реле РТЛ-1016.

Аналогично для двигателя М2 выбираем тепловое реле РТЛ-1010.

При защите группы двигателей номинальный ток плавкой вставки  $I_{н.вс.}$  должен удовлетворять условию

$$I_{нвс} \geq \frac{I_{наиб}}{k}, \quad (5.38)$$

где  $I_{наиб}$  – наибольший ток схемы,

коэффициент  $k = 2,5$  для обычного пуска длительностью менее 10 с.

В рассматриваемой схеме вначале производится запуск двигателя М1, затем пуск двигателя М2. Наибольшим током схемы будет пусковой ток М1, найденный ранее 72 А. Тогда

$$I_{н.вс.} \geq 72/2,5 = 28,8 \text{ А.}$$

Выбираем предохранитель ПР-2-60 с номинальным током 60 А и вставкой 35 А.

Автоматический выключатель выбираем из условия

$$I_y \geq I_p, \quad (5.39)$$

где  $I_y$  – ток уставки автоматического выключателя,

$I_p$  – рабочий ток установки.

Рабочий ток установки

$$I_p = I_{н1} + I_{н2} = 12 + 5 = 17 \text{ А,}$$

где  $I_{н1}$ ,  $I_{н2}$  – номинальные токи двигателей.

Выбираем автоматический выключатель А3160 с номинальным током 50 А, уставкой 20 А.

# Приложение 1

Образец титульного листа

БРЯНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ

Факультет энергетики и природопользования

Кафедра электротехнологий

## КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине:

«Электропривод»

на тему:

«Расчет электропривода смесителя кормов»

Выполнил: студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_

Номер зачетной книжки \_\_\_\_\_

Принял \_\_\_\_\_

Оценка \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Кокино 2011

## Приложение 2

Технические данные электродвигателей серии 4А  
общепромышленного исполнения.

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Скольжение, %	КПД, %	cosφ	$\mu_k = M_k / M_H$	$\mu_{гр} = M_{гр} / M_H$	$\mu_{min} = M_{min} / M_H$	$K_I = I_{гр} / I_H$	Момент инерции J, кг м <sup>2</sup> · 10 <sup>-2</sup>	Масса, кг
4А63В4У3	0,37	9	68	0,69	2,2	2	1,2	5	0,11	6
4А71А4У3	0,55	8,7	70,5	0,70	2,2	2	1,6	4,5	0,13	8,1
4А71В4У3	0,75	8,7	72	0,73	2,2	2	1,6	4,5	0,14	9,4
4А80А4У3	1,1	6,7	75	0,81	2,2	2	1,6	5	0,32	11,9
4А80В4У3	1,5	6,7	77	0,83	2,2	2	1,6	5	0,33	13,8
4А90L4У3	2,2	5,4	80	0,83	2,2	2	1,6	6	0,56	18,1
4А100S4У3	3	5,3	82	0,83	2,2	2	1,6	6,5	0,87	23
4А100L4У3	4	5,3	84	0,84	2,2	2	1,6	6	1,12	29,2
4А112M4У3	5,5	5	85,5	0,86	2,2	2	1,6	7	1,66	38,5
4А132S4У3	7,5	3	87,5	0,86	2,2	2	1,6	7,5	2,83	53,5
4А132M4У3	11	2,8	87,5	0,87	2,2	2	1,6	7,5	4	66,3

### Приложение 3

#### Характеристики аппаратов управления и защиты

##### Тепловые реле серии РТЛ

Тип реле	Диапазон регулирования номинального тока несрабатывания, А
Номинальный ток 25 А	
РТЛ-1002	0,16...0,26
РТЛ-1003	0,24...0,40
РТЛ-1004	0,38...0,65
РТЛ-1005	0,61...1,00
РТЛ-1006	0,95...1,60
РТЛ-1007	1,50...2,60
РТЛ-1008	2,4...4,0
РТЛ-1010	3,8...6,0
РТЛ-1012	5,5...8,0
РТЛ-1014	7,0...10,0
РТЛ-1016	9,5...14,0
РТЛ-1021	13...19
РТЛ-1022	16...25

##### Магнитные пускатели серии ПМЕ

Тип	Номинальный ток А при напряжении 380/500 В	Габаритные размеры, мм	Наличие теплового реле
ПМЕ-001	3/1,5	75x65x119	Нет
ПМЕ-002	3/1,5	121x83x101	Есть
ПМЕ-111	10/6	68x65x84	Нет
ПМЕ-112	10/6	154x102x91	Есть
ПМЕ-211	25/14	102x90x116	Нет
ПМЕ-212	25/14	195x98x126	Есть
ПМЕ-311	40/21	214x114x144	Нет
ПМЕ-312	40/21	275x114x121	Есть
ПМЕ-411	63/35	290x183x135	Нет

## Автоматические воздушные выключатели

Тип	Номинальный ток, А	Напряжение, В	Число полюсов	Ток уставки, А	Предельный ток отключения, кА		Время отключения, с	Габариты, мм
					Постоянный	переменный		
АС-25	25	220, 380	2, 3	1...20	1,252	0,3...2	-	73x90x109
АП-50	50	220, 380	2, 3	1,6...50	3,2	2	-	210x160x143
А3160	50	110, 220	1,2, 3	15...50	1.6..3,6	2,5..4,5	0,025	158x105x89
А3110	100	220	2,3	15...100	5	2,5...1 0	0,015	237x105x112
А3120	200	220	2,3	15...100	20	18	0,015	258x153x105
А3130	200	220	2,3	100..200	17...28	14...25	0,015	300x199x106
А3140	600	220	2,3	100..200	17...28	14...25	0,015	561x217x141
А3710	160...630	440, 660	2,3	250...600	25...50 110	32...40 40...60	0,03	225x500x190

Шкала номинальных токов расцепителей максимального тока имеет следующие ступени: 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0 А.

### Параметры предохранителей типа ПР-2

Тип	Номинальный ток, А	Номинальные токи плавких вставок, А	Предельный ток отключения при напряжении		Габаритные размеры, мм
			380 В	500 В	
ПР-2-15	15	6; 10; 15	8000	7000	171x24,5x33
ПР-2-60	60	15; 20; 25; 35; 45; 60	4500	3500	173x30,5x43
ПР-2-100	100	60; 80; 100	-	-	247x43x56
ПР-2- 200	200	100; 125; 160;200	11000	10000	296x56x76.5
ПР-2-350	350	200; 225; 260; 300; 350	13000	11000	346x72x10
ПР-2-600	600	350; 430; 500; 600	23000	-	442x140x154
ПР-2-1000	1000	600; 700; 850; 1000	20000	20000	580x155x154

## Приложение 4

Удельные сопротивления  $R_{\text{п}}$  (Ом/км) алюминиевых проводов воздушных линий  
0,38/0,22 кВ марок «А» и «АС»,  $X_{\text{п}}=0,4$  Ом/км

Сечение, мм <sup>2</sup>	16	25	35	50	70
$R_{\text{п}}$ , Ом/км	2,1	1,4	1,0	0,7	0,6

## Приложение 5

Нормированные значения температуры нагрева и превышения температуры  
электродвигателей в зависимости от класса нагревостойкости  
используемой изоляции

Показатели нагрева	Класс изоляции				
	А	Е	В	F	Н
Нормированная температура нагрева, °С	105	120	130	155	180
Нормированное превышение температуры при измерении методом сопротивления, град	60	75	80	100	125
Нормированное превышение температуры при измерении методом термометра, град	50	65	70	85	105

Учебное издание

Безик Валерий Александрович

## ЭЛЕКТРОПРИВОД

Методические указания по выполнению курсовой работы  
для студентов специальности  
110302 – Электрификация и автоматизация сельского хозяйства

Редактор Осипова Е.Н.

---

Подписано к печати 12.01.2011 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Усл. п. л. 2,32. Тираж 50 экз. Изд. № 1872.

---

Издательство Брянской государственной сельскохозяйственной академии  
243365, Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянская ГСХА