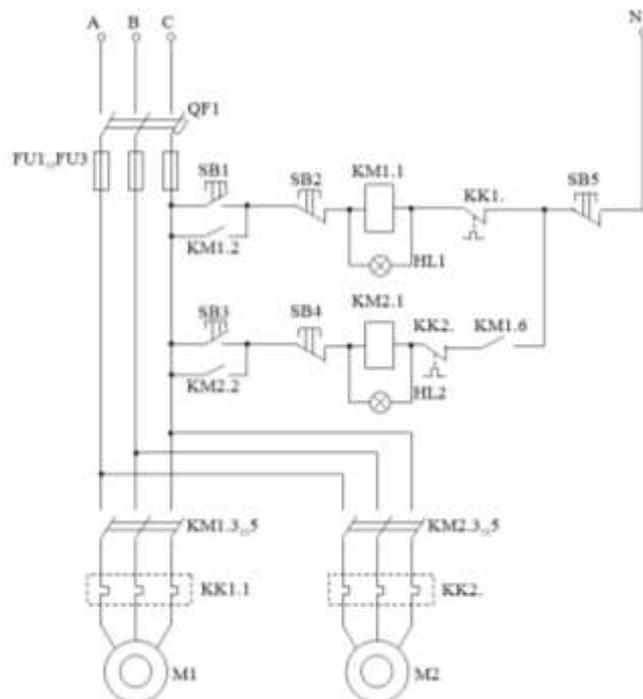


Безик В.А.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Учебно-методическое пособие
по выполнению курсовой работы
для студентов направлений подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника,
35.03.06 Агроинженерия



УДК 62-83 (076)
ББК 31.291
Б 39

Безик, В. А. Электрический привод: учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы для студентов направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 35.03.06 Агроинженерия / В. А. Безик. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2024. – 41 с.

Учебно-методическое пособие содержит указания по оформлению курсовой работы, задание для курсовой работы, методические указания по ее выполнению и необходимые справочные материалы. Позволяет студентам направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 35.03.06 Агроинженерия выполнять курсовую работу по дисциплине «Электрический привод».

Рецензенты:

д.т.н., профессор кафедры Автоматики, физики и математики Погоньшев В.А. (ФГБОУ ВО Брянский ГАУ),

зав. кафедрой электроэнергетики и электротехнологий, к.т.н., доцент Никитин А.М. (ФГБОУ ВО Брянский ГАУ).

Рекомендовано к изданию решением учебно-методической комиссии института энергетики и природопользования Брянского ГАУ, протокол № 2 от 30 сентября 2024 года.

© Брянский ГАУ, 2024
© Безик В.А., 2024

Содержание

Введение.....	4
1. Требования к оформлению курсовой работы.....	5
2. Задание на курсовую работу.....	7
3. Методические указания по выполнению работы	8
3.1. Выбор электродвигателя смесителя кормов.....	8
3.2. Расчёт продолжительности пуска приводного двигателя.....	13
3.3. Выбор двигателя выгрузного транспортёра.....	20
3.4. Расчет коэффициентов механической и тепловой перегрузки.....	23
3.5. Схема управления технологической установкой.....	25
3.6. Выбор аппаратуры управления и защиты.....	28
3.7. Проверка возможности пуска двигателя М1 и устойчивости работы двигателя М2 при пуске М1.....	30
4. Рекомендуемая литература.....	35
Приложение 1 Образец титульного листа.....	36
Приложение 2 Технические данные электродвигателей серии АИ	37
Приложение 3 Характеристики тепловых реле серии РТЛ, характеристики магнитных пускателей серии ПМЕ.....	38
Приложение 4 Автоматические воздушные выключатели.....	39
Приложение 5 Параметры предохранителей типа ПР-2, характеристики проводов, классы нагревостойкости.....	40

Введение

Одной из основ, на которых базируется комплексная электрификация и автоматизация технологических процессов в промышленности и сельском хозяйстве, является автоматизированный электропривод. Современный электрический привод предоставляет широкие возможности для обеспечения высокого качества продукции, повышении производительности труда и автоматизированного управления. От технического совершенства электропривода в значительной степени зависят условия труда, надежность и долговечность работы машин.

С развитием электромашиностроения развивались и другие отрасли электротехнической промышленности, что привело к широкому применению новейших средств автоматизации. Основными задачами являлось создание регулируемых приводов на базе асинхронного двигателя с применением тиристоров и других средств бесконтактного управления, а также разработка надежных, экономичных и дешевых статических преобразователей энергии. В последние годы расширилось применение цифровых вычислительных и управляющих устройств для управления электроприводами.

Широкое внедрение автоматизированного электропривода во все отрасли хозяйства и быстрое его развитие требует от всех инженеров знания основ электропривода и автоматики, поскольку это обеспечит лучшее использование и проектирование оборудования.

Поэтому навыки расчета и проектирования электропривода необходимы выпускникам направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 35.03.06 Агроинженерия, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

Цель курсовой работы: приобретение навыков расчета и проектирования электроприводов технологических установок.

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

Выполнение курсовой работы готовит студентов к выполнению выпускной квалификационной работы.

1. Требования к оформлению курсовой работы

Курсовая работа состоит из пояснительной записки и графического материала из двух листов. Текст записки набирается шрифтом Times New Roman размер 14 пт, межстрочный интервал – 1,5 строки. 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. Нумерация может быть сквозная. Нумерация по разделам размещается в нижнем правом углу.

Записка оформляется на листах с рамкой установленного образца с полями 5 мм справа, снизу и сверху и 20 мм слева. Объем пояснительной записки – 25 – 35 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.

КР ЭП 342 000.003 ПЗ

КР ЭП 342 010.000 Э4

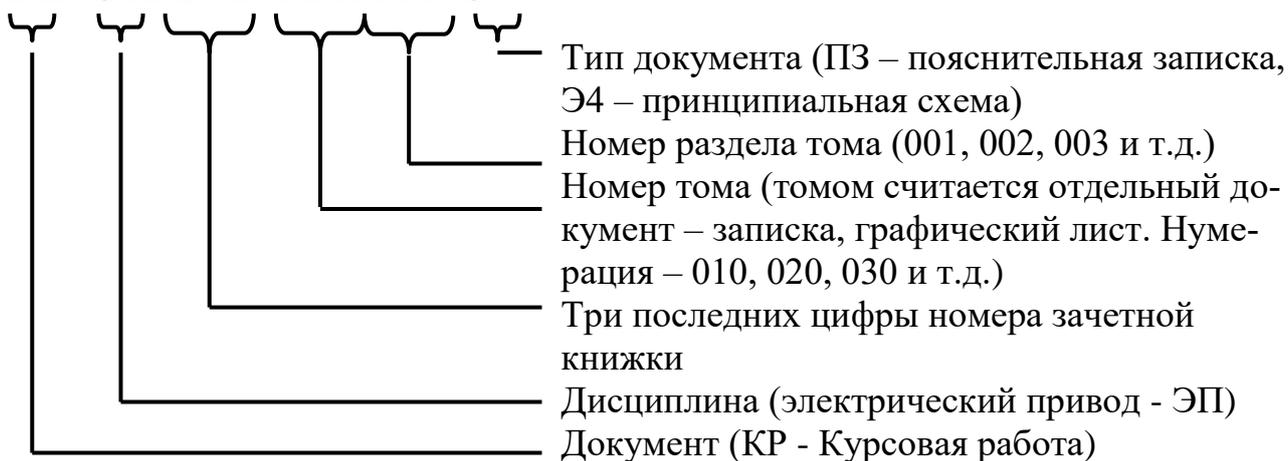


Рисунок 1 - Примеры заполнения шифров

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

Таблица 1 – Механическая характеристика двигателя

s	0	0,025	0,05	0,1	0,15	0,21	0,8	1
n, мин ⁻¹	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 2 - Пример оформления таблиц

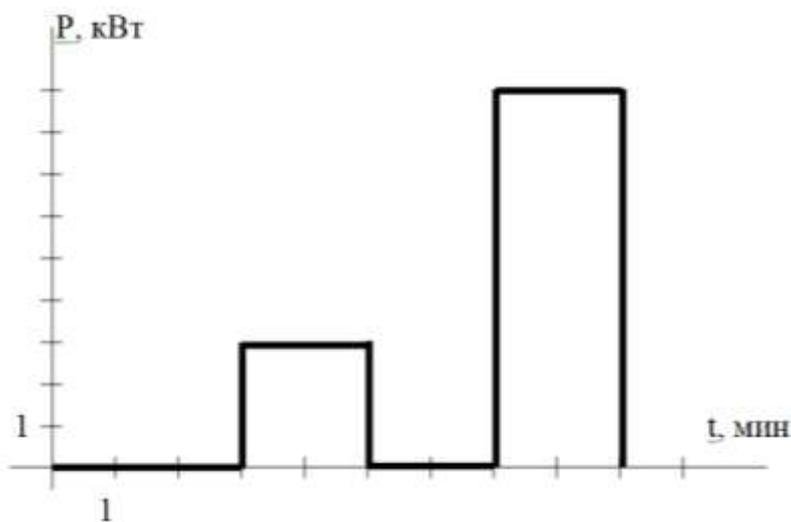


Рисунок 3 - Нагрузочная диаграмма электропривода.

Рисунок 3 - Пример оформления 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, 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: лист с принципиальной схемой технологической установки и лист с графиками для расчета времени пуска электропривода.

2. Задание на курсовую работу

Для привода смесителя кормов периодического действия нагрузочная диаграмма электрического привода которого 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.

Необходимо:

1. Выбрать приводной асинхронный двигатель с синхронной частотой 1500 мин^{-1} , используя метод 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 является вентиляторной с начальным моментом 20% от номинального момента двигателя, номинальная скорость равна номинальной скорости двигателя.

3. 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 двигателя равна последней цифре в номере зачетной книжки в кВт (если она равна 0, считать 5 кВт).

5. Составить принципиальную схему управления технологической установкой. Предусмотреть, что двигатель выгрузного транспортёра может быть включён только при включённом двигателе смесителя, для этого предусмотреть блокировку в схеме. Также предусмотреть необходимые защиты и сигнализацию включённого состояния двигателей.

6. Описать работу схемы.

7. Выбрать аппараты управления и защиты, представленные в схеме управления.

8. Проверить двигатель смесителя на возможность пуска с номинальной нагрузкой на валу при питании от трансформатора ТМ – 63/10 с номинальной мощностью $S_n=63 \text{ кВА}$, номинальным выходным фазным напряжением $U_{2n}=220 \text{ В}$, напряжением короткого замыкания $u_k=8,5\%$ через линию электропередач длиной 200 м, выполненную проводом А – 16 с погонным сопротивлением $r_n=2,2 \text{ Ом/км}$. При необходимости предложить меры по обеспечению возможности пуска.

9. Проверить устойчивость работы двигателя выгрузного транспортёра при пуске двигателя смесителя по условиям из предыдущего пункта.

3. Методические указания по выполнению работы

3.1. Выбор электродвигателя привода смесителя кормов

Процесс преобразования электрической энергии в механическую в электродвигателе сопровождается потерями мощности ΔP , 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.

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.

Главным условием при выборе мощности электродвигателя является обеспечение его теплового режима работы. Наиболее точным методом расчета потребляемой мощности электродвигателя является метод средних потерь, предполагающий нахождение средних потерь $\Delta P_{\text{ср}}$ за рабочий цикл и сравнение их с номинальными двигателя $\Delta P_{\text{н}}$.

$$\Delta P_{\text{н}} \leq \Delta P_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{н}}$, $\Delta P_{\text{ср}}$, ΔP_i – номинальные потери двигателя, средние за цикл и на i -том участке нагрузочной диаграммы,

t_i – длительность i -того участка.

Метод является достаточно трудоемким, потому как предполагает проведение расчетов для каждого предполагаемого двигателя. 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 нагрузки (тока, момента, мощности на валу двигателя) по нагрузочной диаграмме:

$$\begin{aligned}
I_{\text{э}} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} \\
M_{\text{э}} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} \\
P_{\text{э}} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}
\end{aligned} \tag{2}$$

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

В длительном режиме с переменной нагрузкой номинальная мощность P_n (ток I_n , момент M_n) выбираемого двигателя должна быть не меньше расчетной эквивалентной мощности $P_{\text{э}}$ (тока $I_{\text{э}}$, момента $M_{\text{э}}$).

$$P_n \geq P_{\text{э}} \quad (I_n \geq I_{\text{э}}, \quad M_n \geq M_{\text{э}})$$

В повторно-кратковременном режиме при несовпадении продолжительности включения (ПВ) со стандартной для выбираемого двигателя, номинальный ток (момент, мощность) двигателя должны удовлетворять условию

$$I_n \geq I_{\text{э}} \sqrt{\frac{ПВ_{\text{рас}}}{ПВ_{\text{ст}}}}, \quad M_n \geq M_{\text{э}} \sqrt{\frac{ПВ_{\text{рас}}}{ПВ_{\text{ст}}}}, \quad P_n \geq P_{\text{э}} \sqrt{\frac{ПВ_{\text{рас}}}{ПВ_{\text{ст}}}}, \tag{3}$$

где $ПВ_{\text{рас}}$ – рассчитанная по нагрузочной диаграмме продолжительность включения,

$ПВ_{\text{ст}}$ – стандартная продолжительность включения выбираемого двигателя.

при использовании двигателей предназначенных для работы в длительном режиме их стандартную продолжительность включения считают равной 100%.

В перемежающемся режиме выбор двигателя аналогичен с заменой ПВ на продолжительность нагрузки ПН.

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

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 4.

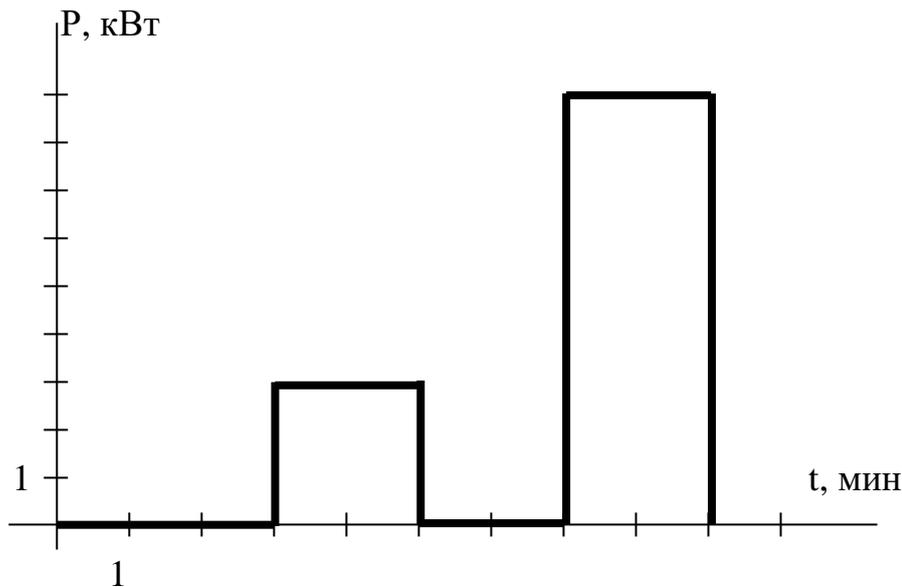


Рисунок 4 - Нагрузочная диаграмма электропривода.

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

$$ПВ\% = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} 100\% \quad (4)$$

$$ПВ\% = (4/9) \cdot 100\% = 44\%,$$

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

$t_{\text{ц}} = 3+2+2+2 = 9$ мин – длительность цикла.

Эквивалентная мощность нагрузки

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} \quad (5)$$

$$P_{\text{э}} = \sqrt{(0^2 \cdot 3 + 9^2 \cdot 2 + 0^2 \cdot 2 + 3^2 \cdot 2) / (3 + 2 + 2 + 2)} = 4,47 \text{ кВт}$$

Для привода механизма будем использовать двигатель, предназначенный заводом изготовителем для длительного режима работы. Поэтому его стандартной $ПВ_{\text{ст}}\%$ считаем 100%. Мощность выбираемого двигателя должна удовлетворять условию

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{э}} \sqrt{\frac{ПВ_{\text{рас}}\%}{ПВ_{\text{ст}}\%}} \quad (6)$$

$$P_H \geq 4,47 \cdot \sqrt{44/100} = 2,97 \text{ кВт.}$$

Выбираем двигатель АИР100S4У3 (приложение 1)

С параметрами:

Номинальная мощность $P_H = 3 \text{ кВт}$,

Номинальное скольжение $s_H = 5,3 \%$,

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

Номинальный КПД $\eta_H = 83 \%$,

Кратность пускового момента $\mu_H = 2$,

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

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

Кратность пускового тока $K_i = 6,5$.

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. Или использовать двигатель

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.

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

Условие перегрузочной способности

$$\frac{M_{i.max.}}{M_H} < \mu_K - 0,25, \quad (7)$$

где $M_{i.max}$ – максимальный момент сопротивления по нагрузочной диаграмме,

M_H – номинальный момент двигателя.

Т.к. скорость вращения при работе асинхронного двигателя меняется незначительно, отношение моментов можно заменить отношением мощностей $P_{i.max}$, P_H Тогда условие переписывается в виде

$$\frac{P_{i.max.}}{P_H} < \mu_K - 0,25, \quad (8)$$

$$9/3 = 3 > 2,2 - 0,25 = 1,95.$$

Для двигателя 4A100L4У3 мощностью 4 кВт условие перегрузочной способности

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

также не выполняется.

Выбираем двигатель на одну ступень большей мощности АИР112М4У3
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 данного двигателя 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 ΔP_n по формуле

$$\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}, \quad (9)$$

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

Где P_n – номинальная мощность двигателя,

η_n – номинальный КПД двигателя.

Для асинхронных двигателей базового закрытого исполнения отношение постоянных ΔP_c и номинальных переменных потерь $\Delta P_{v.n.}$

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

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

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

Потери на каждом участке нагрузочной диаграммы найдем по формуле

$$\Delta P_i = \Delta P_c + \Delta P_{v.н.} \left(\frac{P_i}{P_H} \right)^2. \quad (10)$$

$$\Delta P_1 = 0 \text{ Вт},$$

$$\Delta P_2 = 376 + 751 \cdot (9/5,5)^2 = 2387 \text{ Вт},$$

$$\Delta P_3 = 0 \text{ Вт},$$

$$\Delta P_4 = 376 + 751 \cdot (2/5,5)^2 = 475 \text{ Вт}.$$

Средние потери за цикл

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}, \quad (11)$$

$$\Delta P_{cp} = (0+2387+0+475)/(3+2+2+2) = 318 \text{ Вт}.$$

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

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

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

3.2. Расчет продолжительности пуска 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:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (12)$$

где M – электромагнитный момент развиваемый двигателем;

M_c – статический момент сопротивления на валу двигателя;

J – момент инерции вращающихся масс в электроприводе, приведенный к валу двигателя;

$\frac{d\omega}{dt}$ – угловое ускорение;

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

(идущий на изменение 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 при изменении скорости с ω_1 до ω_2 можно найти непосредственным интегрированием уравнения движения

$$t_{п.п.} = \int_{t_1}^{t_2} dt = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M - M_c} d\omega. \quad (13)$$

Из-за того, что входящие в формулу величины являются сложными зависимостями от скорости, углового положения и времени, нахождение интеграла весьма проблематично. Поэтому на практике используют различные численные приближенные методы интегрирования.

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

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

$$n_1 = \frac{60f}{p}, \quad (14)$$

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.

Частота вращения равна номинальной, которая приведена в паспортных данных электродвигателя

$$n_H = 1425 \text{ мин}^{-1}.$$

Номинальный момент рассчитывается по формуле

$$M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_H}, \quad (15)$$

где P_H – номинальная мощность двигателя,
 n_H – номинальная частота вращения ротора.

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

Критическая точка.

критическое скольжение

$$s_K = s_H \left(\mu_K + \sqrt{\mu_K^2 - 1} \right), \quad (16)$$

где

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1} - \text{критическое скольжение,}$$

$$s_H = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0,05.$$

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

Критическая частота вращения

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

Критический момент

$$M_K = \mu_K M_H, \quad (17)$$

где μ_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.

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

$$n_{\min} = 0,2 \cdot 1500 = 300 \text{ мин}^{-1}.$$

Минимальный момент определяется по формуле

$$M_{\min} = \mu_{\min} M_n, \quad (18)$$

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

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

Пусковая точка.

Частота вращения в пусковой точке равно 0.

Момент рассчитывается по формуле

$$M_n = \mu_n M_n, \quad (19)$$

где μ_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 рассчитаем еще три, используя упрощенную формулу Клосса

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}. \quad (20)$$

Для двигателей с улучшенными пусковыми характеристиками формула дает достаточно точные значения при скольжении от 0 до критического. На этом участке и будем выбирать точки. Скольжение в первой точке возьмем приблизительно равным половине от номинального, во второй и третьей точках приблизительно равномерно между номинальным и критическим скольжениями

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

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 для удобства сведем в таблицу 1.

Таблица 1 - Механическая характеристика двигателя

s	0	0,025	0,05	0,1	0,15	0,21	0,8	1
n, мин ⁻¹	1500	1463	1425	1350	1275	1185	300	0
M, Н·м	0	18,9	36,9	62,5	77,3	81,2	59	73,8
Точка	синхронная	1	номинальная	2	3	критическая	МИНИМАЛЬНОГО МОМЕНТА	пусковая

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

$$M_c = M_{c.0} + M_{c.n.} \left(\frac{n}{n_n} \right)^2, \quad (21)$$

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

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

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.

Тогда расчетная формула –

$$M_c = 7,4 + 29,5 (n / 1425)^2.$$

Результаты расчета характеристики механизма сведем в таблицу 2.

Таблица 2 - Механическая характеристика производственного механизма

n, мин ⁻¹	0	300	600	900	1200	1500
M _c , Н·м	7,4	8,6	12,1	18	26,3	37,1

Для нахождения времени пуска электропривода на одном чертеже строим механическую характеристику двигателя $M_\delta(n)$ и механическую характеристику производственного механизма $M_c(n)$ (рисунок 5).

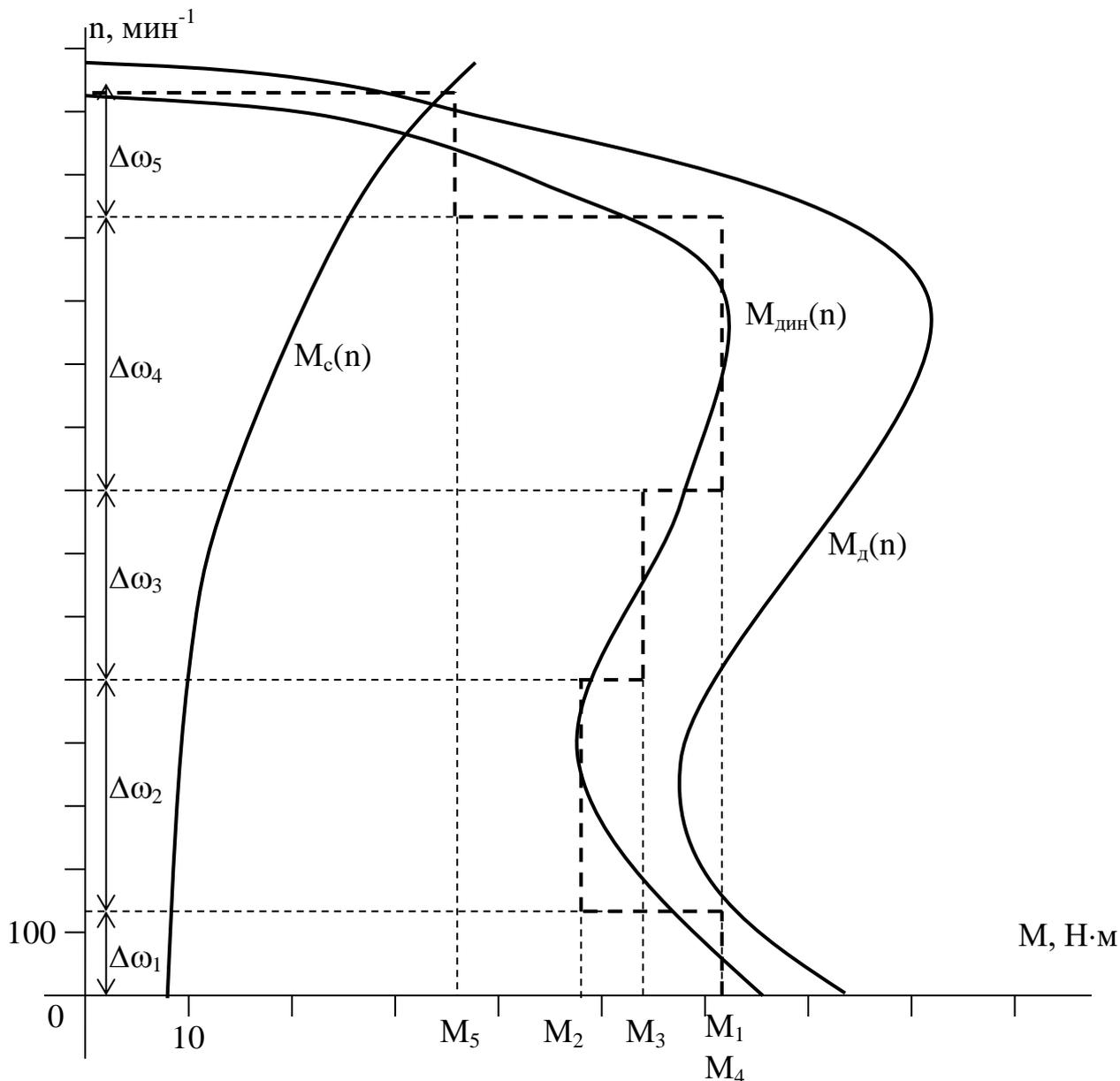


Рисунок 5 - Нахождение времени пуска электропривода

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

Аппроксимируем полученную характеристику ступенчатой кривой. Для достижения необходимой точности число ступеней должно быть не менее 5, Площади фигур между исходной и ступенчатой кривой с одной и другой стороны от исходной кривой должны приблизительно совпадать.

Заменив бесконечно малые приращения конечными в уравнении движения электропривода, получим формулу для расчета времени разгона на каждом вертикальном участке

$$\Delta t_i = J \frac{\Delta \omega_i}{M_{\text{дин.}i}} = J \frac{\Delta n_i}{9,55 M_{\text{дин.}i}}, \quad (22)$$

где J – суммарный приведенный момент инерции электропривода,
Согласно заданию на курсовую работу

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

где J_d – момент инерции двигателя.

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

$M_{\text{дин.}i}$ – динамический момент на i -том участке.

Изменения скорости вращения и динамический момент на участках находим по построенному графику. Время разгона на участках

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

$$\Delta t_2 = 0,166 \cdot 366 / (9,55 \cdot 48) = 0,132 \text{ с},$$

$$\Delta t_3 = 0,166 \cdot 300 / (9,55 \cdot 54) = 0,096 \text{ с},$$

$$\Delta t_4 = 0,166 \cdot 430 / (9,55 \cdot 62) = 0,120 \text{ с},$$

$$\Delta t_5 = 0,166 \cdot 200 / (9,55 \cdot 36) = 0,096 \text{ с}.$$

Общее время разгона электропривода

$$t_{\text{раз}} = \sum \Delta t_i, \quad (23)$$

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

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

Разгонную кривую для упрощения (совмещается вертикальная ось) часто строят с левой стороны от графиков характеристик двигателя и механизма.

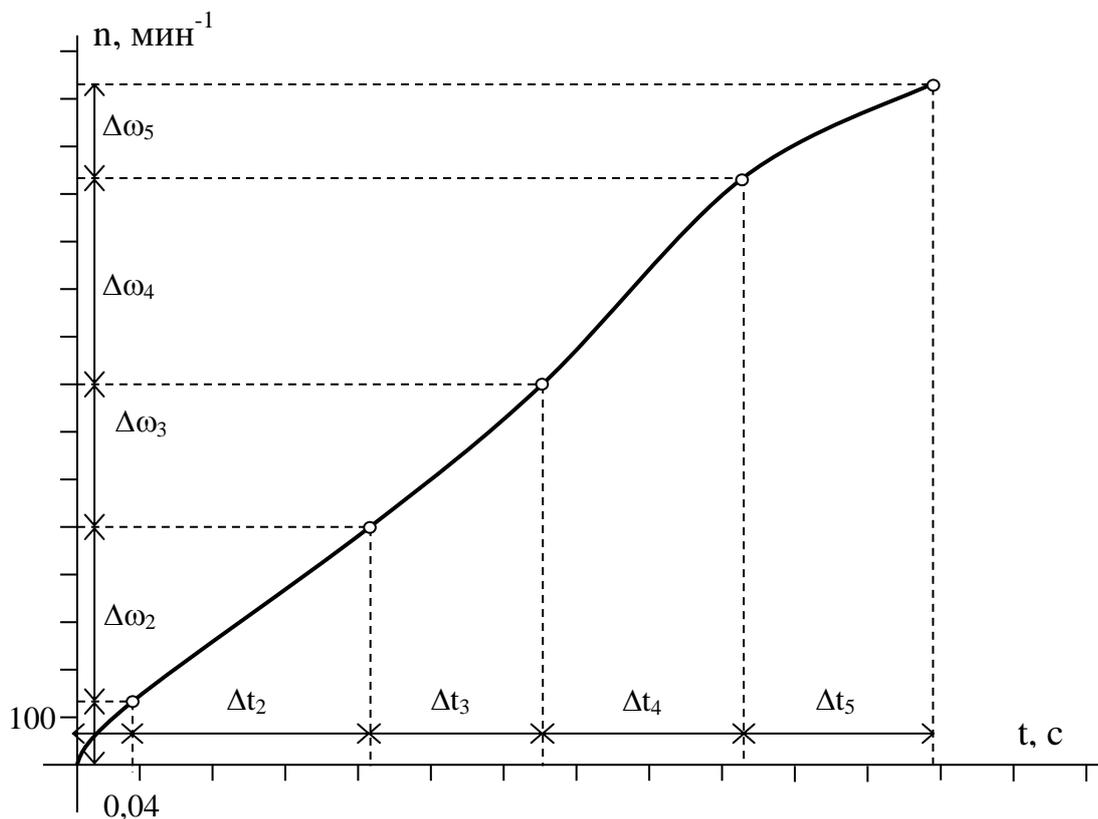


Рисунок 6 - Разгонная кривая электропривода

3.3. 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.

Для правильного использования электродвигателя при кратковременном режиме работы (режим S2) необходимо, чтобы за время включения его перегрев не достиг максимально допустимого для соответствующего класса изоляции величины. При использовании для кратковременной работы электродвигателей продолжительного режима необходимо обеспечить такую их перегрузку, чтобы перегрев за время включения был бы не более допустимого перегрева.

В реальных условиях, как показывают многочисленные эксперименты, кривая нагрева двигателя отличается от теоретической, выведенной с рядом допущений, но с допустимой погрешностью можно считать, что 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. Если нагрузка во время работы переменная, для расчетов используют эквивалентную нагрузку за период работы.

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

При несовпадении длительности работы по нагрузочной диаграмме со стандартной длительностью работы выбираемого двигателя, его номинальная мощность P_n должна удовлетворять условию

$$P_n \geq P_p \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{t_{p.ст}}{T_n}}}}, \quad (24)$$

где P_p - мощность по нагрузочной диаграмме (эквивалентная за время работы при переменной нагрузке),

T_n - постоянная времени нагрева двигателя,

t_p - продолжительность работы двигателя по нагрузочной диаграмме,

$t_{p.ст}$ - стандартная продолжительность работы выбираемого двигателя.

При использовании двигателей предназначенных для работы в длительном режиме их стандартную длительность работы считают равной бесконечности. Тогда знаменатель формулы равен 1.

Предварительно выбираем двигатель АИР80В4У3

С параметрами

Номинальная мощность $P_n = 1,5$ кВт ,

Номинальное скольжение $s_n = 6,7$ % ,

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

Номинальный КПД $\eta_n = 77$ % ,

Кратность пускового момента $\mu_n = 2$,

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

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

Кратность пускового тока $K_i = 5$.

Постоянную времени нагрева в минутах можно найти по эмпирической формуле

$$T_n = 6 \frac{m \theta_n \eta_n}{P_n (1 - \eta_n)}, \quad (25)$$

где m - масса электродвигателя, кг;

θ_n - нормированное превышение температуры двигателя при номинальной нагрузке при измерении методом сопротивления, град;

η_n - номинальный КПД двигателя;

P_n - номинальная мощность двигателя, Вт.

$$T_n = 6 \frac{21,3 \cdot 80 \cdot 0,77}{1500 (1 - 0,77)} = 22,8 \text{ мин.}$$

Номинальная мощность выбранного электродвигателя должна удовлетворять условию

$$P_H \geq P_э \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_{p.ст}}{T_H}}}}, \quad (26)$$

где $P_э$ – эквивалентная мощность нагрузки на участке работы.

t_p - время работы двигателя,

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

$$P_H \geq P_э \sqrt{1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}}, \quad (27)$$

$$1,5 \geq 3 \sqrt{1 - e^{-\frac{6}{22,8}}} = 1,44.$$

Условие выполняется с небольшим запасом, значит тепловой режим электродвигателя не будет нарушен. При невыполнении условия следовало бы выбрать двигатель большей мощности и провести заново проверку.

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

Условие перегрузочной способности

$$\frac{M_{i.max.}}{M_H} < \mu_k - 0,25, \quad (28)$$

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

$$\frac{P_{i.max.}}{P_H} < \mu_k - 0,25, \quad (29)$$

$$3/1,5 = 2 \geq 2,2 - 0,25 = 1,95.$$

Условие не выполняется, поэтому выбираем двигатель на одну ступень большей мощности

Двигатель АИР90L4У3

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 $K_i = 6$.

Условие проверки на перегрузочную способность для данного двигателя

$$3/2,2 = 1,47 \leq 2,2 - 0,25 = 1,95$$

выполняется. Двигатель выбран правильно.

3.4. Расчет коэффициентов механической и тепловой перегрузки

Чтобы количественно оценить перегрузку двигателя и его перегрев используются коэффициенты термической и механической перегрузок

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

$$p_T = \frac{\Delta P_{кр}}{\Delta P_n}. \quad (30)$$

В режиме S3 коэффициент тепловой перегрузки можно найти из формулы

$$p_T = \frac{1 - e^{-(t_{раб} + \beta_0 t_o)/T_n}}{1 - e^{-t_{раб}/T_n}}, \quad (31)$$

где $e=2,718$;

$t_{раб}$, t_o - продолжительности работы и отключенного состояния электродвигателя (или работы на холостом ходу в режиме S6);

β_0 - коэффициент, учитывающий ухудшение теплоотдачи в отключенном состоянии;

T_n - постоянная времени нагрева электродвигателя, мин.

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

Постоянная времени нагрева согласно формуле 25

$$T_H = 6 \frac{58 \cdot 80 \cdot 0,855}{5500(1 - 0,855)} = 29,8 \text{ мин.}$$

Коэффициент тепловой перегрузки

$$p_T = \frac{1 - 2,72^{-(4+0,7 \cdot 5)/29,8}}{1 - 2,72^{-4/29,8}} = 1,51 .$$

Также определяют коэффициент механической перегрузки p_m , который показывает превышение мощности нагрузки на участке работы к номинальной мощности двигателя. Если режим работы электродвигателя отличается от длительного S1, то с учетом возможных технологических пауз в работе его коэффициент механической перегрузки p_m рассчитывают через коэффициент тепловой перегрузки p_T по формуле

$$p_m = \sqrt{p_T(\alpha + 1) - \alpha}, \quad (32)$$

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

Для асинхронных двигателей общепромышленного назначения герметичного исполнения $\alpha = 0,45 \dots 0,55$, принимаем 0,5. Тогда

$$p_m = \sqrt{1,51(0,5 + 1) - 0,5} = 1,33$$

Расчеты для двигателя M2 проводим аналогично.

Постоянная времени нагрева

$$T_H = 6 \frac{32 \cdot 80 \cdot 0,8}{2200(1 - 0,8)} = 26,2 \text{ мин.}$$

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

$$p_T = \frac{1}{1 - e^{-t_{раб}/T_H}}. \quad (33)$$

Значения коэффициентов

$$p_T = \frac{1}{1 - 2,72^{-6/26,2}} = 4,89,$$

$$p_m = \sqrt{4,89(0,5 + 1) - 0,5} = 2,61.$$

По известной мощности нагрузки P_c (эквивалентной при переменной нагрузке) и найденному коэффициенту механической перегрузки можно определить расчетную мощность двигателя

$$P_{рас} = \frac{P_c}{p_m}$$

По расчетной мощности выбирается номинальная мощность двигателя по условию

$$P_n \geq P_{рас} .$$

Расчетная мощность для двигателя М1

$$P_{рас}=4,5/1,33=3,38 \text{ кВт.}$$

Для двигателя М2

$$P_{рас}=3/2,61=1,15 \text{ кВт.}$$

Выбранные ранее мощности двигателей удовлетворяют этим условиям.

3.5. Схема управления смесителем

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 (следающее 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.

Рассмотрим схему управления смесителем (рисунок 7).

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

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

Рассмотрим работу цепи управления двигателем М1. Нажав на кнопку SB1, замыкается цепь катушки магнитного пускателя КМ1.1, 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.

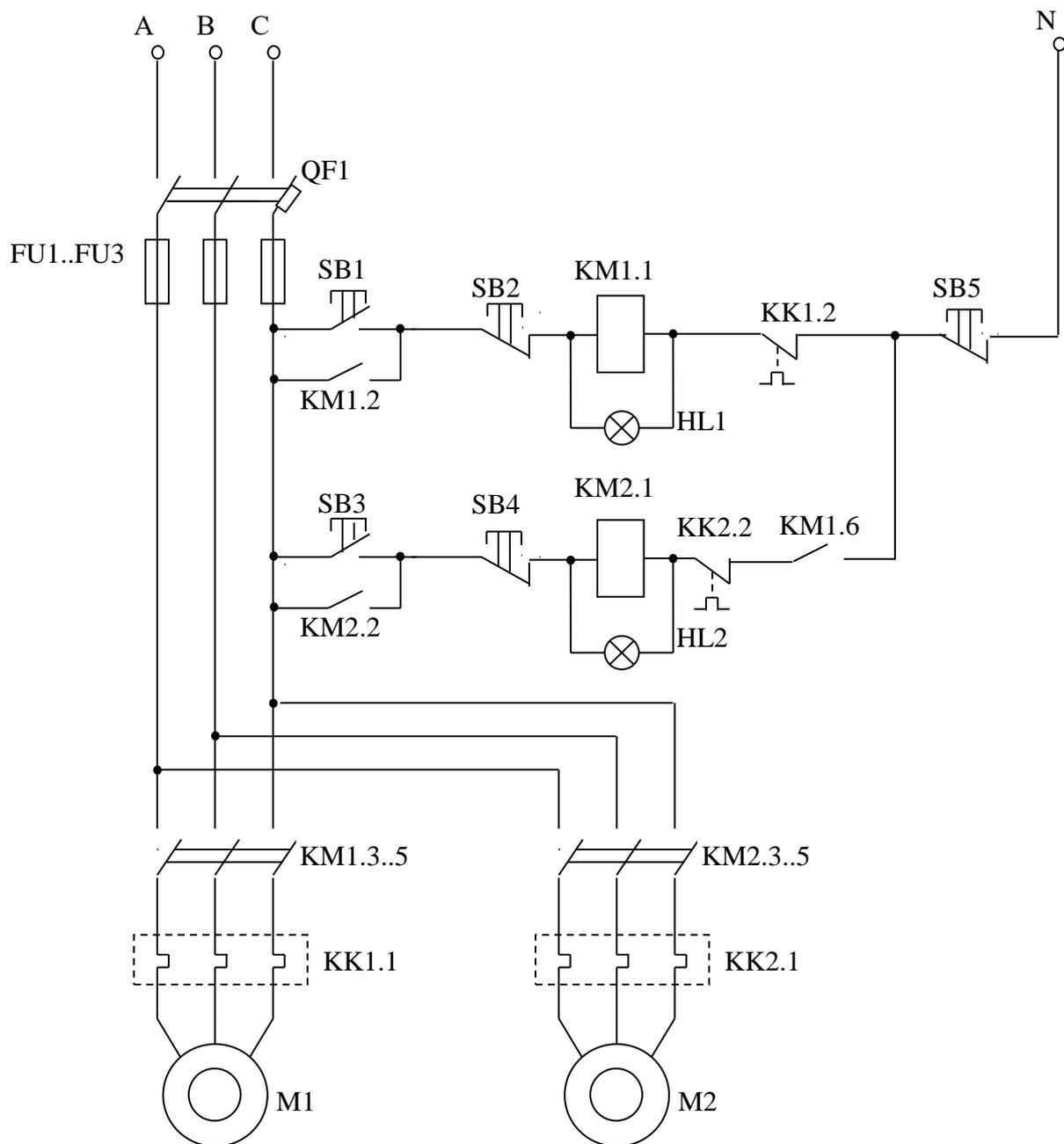


Рисунок 7 - Схема управления смесителем

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 KK1, KK2, 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.

3.6. Выбор аппаратуры управления и защиты

Аппаратура управления электроприводом разделяется на контактную и бесконтактную.

К контактной аппаратуре управления 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.

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 фазы, 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 электромаг-

нитного 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.

Для схемы на рисунке 7 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

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3}U_H\eta_H\cos\varphi}. \quad (34)$$

Номинальный ток двигателя М1

$$I_{H1} = 5500 / (1,73 \cdot 380 \cdot 0,84 \cdot 0,83) = 12 \text{ А.}$$

Выбираем магнитный пускатель ПМЕ-212 с номинальным током 25 А (приложение 3).

Номинальный ток двигателя М2

$$I_{H2} = 2000 / (1,73 \cdot 380 \cdot 0,81 \cdot 0,75) = 5 \text{ А.}$$

Выбираем магнитный пускатель ПМЕ-112 с номинальным током 10 А (приложение 3).

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 или большим на 10-15% для исключения ложных срабатываний.

Для двигателя М1 теплового реле должно обеспечивать установку тока равного номинальному току двигателя М1 12А. Выбираем тепловое реле РТЛ-1016 (приложение 3).

Аналогично для двигателя М2 выбираем тепловое реле РТЛ-1010.

Предохранители FU1 – FU3 защищают группу двигателей – М1 и М2. При защите группы двигателей номинальный ток плавкой вставки $I_{H.вс.}$ должен удовлетворять условию

$$I_{H.вс.} \geq \frac{I_{наиб}}{k}, \quad (35)$$

где $I_{наиб}$ – наибольший ток схемы,
коэффициент $k = 2,5$ для обычного пуска длительностью менее 10 с и $k = 1,6$ при затяжном пуске.

В рассматриваемой схеме вначале производится запуск двигателя М1, затем пуск двигателя М2. Наибольшим током схемы будет пусковой ток М1

$$I_{п1.} = K_I I_{н1}, \quad (36)$$

$$I_{п1.} = 6,0 \cdot 12 = 72 \text{ А.}$$

Тогда номинальный ток плавкой вставки должен удовлетворять условию

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

Выбираем предохранитель ПР-2-60 с номинальным током 60 А и вставкой 35 А (приложение 5).

Автоматический выключатель выбираем из условия

$$I_y \geq I_p, \quad (37)$$

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 4).

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

Эксплуатационные условия работы электропривода в сельском хозяйстве являются непростыми.

Условия окружающей среды характеризуют повышенной влажностью, загазованностью, запыленностью, 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: низкий коэффициент использования оборудования, значительные трудноконтролируемые изменения нагрузки, низкая загрузка машин, приводящая к низким энергетическим показателям привода.

Отдельно необходимо выделить особенности сельских 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.

При включении двигателя пусковой ток может превышать номинальный в 5-7 раз, из-за чего включение крупных двигателей существенно влияет на работу присоединенных к сети приемников.

Это объясняется тем, что пусковой ток вызывает значительное увеличение потерь напряжения в сети, вследствие чего напряжение на зажимах приемников дополнительно снижается. Это отчетливо видно по лампам накаливания, когда резко снижается световой поток (мигание света). Работающие двигатели в это время замедляют ход и при некоторых условиях могут вообще остановиться.

Кроме того, может случиться, что сам пускаемый двигатель из-за сильной просадки напряжения не сможет развернуть присоединенный к нему механизм.

Режим пуска двигателя рассматривается при максимальной нагрузке линии, так как именно при таких условиях создаются наиболее неблагоприятные условия для работы присоединенных к сети приемников.

Чтобы проверить возможно ли включение двигателя, нужно рассчитать напряжение на его зажимах во время пуска и напряжение на любом другом работающем двигателе, а также проверить напряжение у ламп.

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

$$\Delta U_{\text{доп}} = 1 - \sqrt{\frac{M_{\text{изб}}^{\circ} + M_{\text{тр}}^{\circ}}{\mu_{\text{п}}}}, \quad (38)$$

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

$M_{\text{тр}}^{\circ}$ – относительный момент трогания – момент сопротивления на валу двигателя при пуске. $M_{\text{тр}}^{\circ} = 1$, 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 38 использовать кратность минимального момента μ_{min} .

Тогда максимально допустимое падение напряжения при пуске двигателя М1

$$\Delta U_{\text{доп}} = 1 - \sqrt{\frac{M_{\text{изб}}^0 + M_{\text{тр}}^0}{\mu_{\text{min}}}}, \quad (39)$$

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

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 $I_{\text{н.дв.}}$ и номинальный ток трансформатора $I_{\text{н.тр.}}$. Вычислим их.

Пусковой ток двигателя

$$I_{\text{н.дв.}} = K_I \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \eta_{\text{н}} \cos \varphi}, \quad (39)$$

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

где K_I – кратность пускового тока двигателя,

$P_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$, $\eta_{\text{н}}$ – номинальные мощность, напряжение и КПД двигателя, $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

Номинальный ток трансформатора

$$I_{\text{н.тр.}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}}}, \quad (40)$$

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

где $S_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$ – номинальные мощность и напряжение трансформатора.

Относительное падение напряжения в линии

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{I_{\text{н.дв.}} l \sqrt{R_{\text{л}}^2 + X_{\text{л}}^2}}{U_{\text{н}}}, \quad (41)$$

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

где l – длина линии,

$R_{\text{л}}$ – активное погонное сопротивление линии,

$x_{\text{л}}$ – реактивное погонное сопротивление линии, принимается 0,4 Ом/км для воздушной линии 0,4 кВ,

$U_{\text{н}}$ – номинальное фазное напряжение питания,

$I_{\text{н.дв.}}$ – пусковой ток двигателя.

Падение напряжения в трансформаторе

$$\Delta U_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{к}} \% I_{\text{н.дв.}}}{100 I_{\text{н.тр.}}}, \quad (42)$$

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

где $u_k\%$ - напряжение короткого замыкания трансформатора.
Суммарное падение напряжения

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

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

Для обеспечения пуска двигателя М1 можно предложить следующие меры: увеличить сечение питающей линии, сокращение длины линии за счет рационального расположения питающей ТП, использование трансформатора большей мощности или трансформатора с меньшим напряжением короткого замыкания.

Будем использовать провод большего сечения, чтобы снизить суммарные потери до максимально допустимого, т.е. на $\Delta U_0 = \Delta U - \Delta U_{\text{доп}} = 0,214 - 0,12 = 0,094$. Т.к. падение напряжения в линии пропорционально сечению необходимо увеличить сечение провода не менее чем в $\Delta U_{\text{л}} / (\Delta U_{\text{л}} - \Delta U_0) = 0,146 / (0,146 - 0,094) = 2,8$ раза. (в знаменателе формулы находится требуемое падение напряжения)

Выбираем провод А-50 с погонным сопротивлением 0,7 Ом/км (приложение 5). 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

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

Что меньше максимально допустимого. Двигатель запустится.

При определении устойчивости работы двигателя М2 при пуске двигателя М1, можем пренебречь относительно малым рабочим током двигателя М2 по сравнению с пусковым током двигателя М1. Поэтому используем найденное ранее падение напряжения.

Рассчитаем максимально допустимое снижение напряжения для устойчивой работы

$$\Delta U_{\text{доп}} = 1 - \sqrt{\frac{M_c^0}{\mu_k}}, \quad (43)$$

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

где M^o_C - относительный момент сопротивления на валу двигателя, т.к. он работает с номинальной нагрузкой $M^o_C = 1$,

μ_k – кратность критического момента.

Падение напряжения в линии как с проводом А16 $\Delta U = 0,214$ так и с проводом А50 $\Delta U = 0,114$ меньше найденного максимально допустимого, поэтому двигатель М2 будет устойчиво работать при пуске двигателя М1.

4. Рекомендуемая литература

Основная

1. Епифанов А.П. Основы электропривода: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2017. 192 с.
2. Епифанов А.П., Гущинский А.Г., Малайчук Л.М. Электропривод в сельском хозяйстве: учеб. пособие. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2020. 224 с.
3. Москаленко В.В. Электрический привод: учеб. для вузов. М.: Академия, 2007. 368 с.
4. Муконин А.К. Романов А.В., Трубецкой В.А. Электрический привод: учеб. пособие. Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2019. 87 с.
5. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учеб. для вузов. М.: Академия, 2008. 288 с.
6. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Проектирование электропривода промышленных механизмов: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2014. 448 с.
7. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Регулируемый асинхронный электропривод: учеб. пособие. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2018. 464 с.

Дополнительная

1. Воробьев В.А. Электропривод сельскохозяйственных машин: учеб. для вузов. М.: БИБКМ, 2016. 304 с.
2. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2008. 208 с.
3. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам. М.: Академия, 2005. 479 с.
4. Кацман М.М. Электрический привод: учеб. для СПО. М.: Академия, 2013. 384 с.
5. Кузнецов А.Ю. Электрический привод и электрооборудование в АПК: практикум. Новосибирск: Изд-во Новосибирский ГАУ, 2016. 73 с.
6. Никитенко Г.В. Электропривод производственных механизмов: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2013. 224 с.
7. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2012. 368 с.
8. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Проектирование электропривода промышленных механизмов: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2014. 448 с.
9. Шичков Л.П. Электрический привод: учеб. для вузов. М.: КолосС, 2006. 279 с.
10. Электропривод и электрооборудование: учеб. для вузов / А.П. Коломиец, Н.П. Кондратьева, И.Р. Владыкин, С.И. Юран. М.: КолосС, 2006. 328 с.

Приложение 1

Образец титульного листа

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Брянский государственный аграрный университет»

Факультет энергетики и природопользования
Кафедра Автоматики, физики и математики

КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине:

«Электрический привод»

на тему:

«Расчет электропривода смесителя кормов»

Выполнил: студент _____

Группа _____

Номер зачетной книжки _____

Принял _____

Оценка _____

Дата _____

Брянская область 2024

Приложение 2

Технические данные электродвигателей серии АИ общепромышленного исполнения.

Синхронная частота вращения 1500 об/мин.

Тип электродвигателя	Мощность $P_{н\text{, кВт}}$	Частота вращения $n_{н\text{, мин}}^{-1}$	Ток статора $I_{н\text{, А}}$	КПД $\eta_{н\text{, \%}}$	$\cos\phi$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{ном}}}$	Момент инерции ротора, кг м^2	Масса, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
АИР63А4	0,25	1320	0,83	68,0	0,67	5,0	2,3	2,2	0,0012	5,1
АИР63В4	0,37	1320	1,18	68,0	0,70	5,0	2,3	2,2	0,0015	6
АИР71А4	0,55	1350	1,61	75,0	0,73	5,0	2,3	2,4	0,0013	8,1
АИР71В4	0,75	1350	1,90	75,0	0,80	5,0	2,5	2,6	0,0015	9,4
АИР80А4	1,1	1395	2,75	76,5	0,77	5,0	2,2	2,4	0,0034	11,9
АИР80В4	1,5	1395	3,52	78,5	0,80	5,3	2,2	2,4	0,0035	13,8
АИР 90L4	2,2	1395	4,98	81,0	0,81	6,5	2,2	2,4	0,0056	18,1
АИР100S4	3,0	1410	6,70	82,0	0,82	7,0	2,0	2,2	0,0085	23
АИР100L4	4,0	1410	8,52	85,0	0,84	6,0	2,1	2,4	0,011	29,2
АИР112М4	5,5	1430	11,3	86,0	0,86	6,0	2,0	2,5	0,016	38,5
АИР132S4	7,5	1440	15,1	87,5	0,86	7,5	2,0	2,5	0,027	53,5
АИР32М4	11,0	1450	22,2	88,5	0,85	7,5	2,2	3,1	0,048	66,3

Приложение 3

Характеристики тепловых 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

Характеристики магнитных пускателей 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

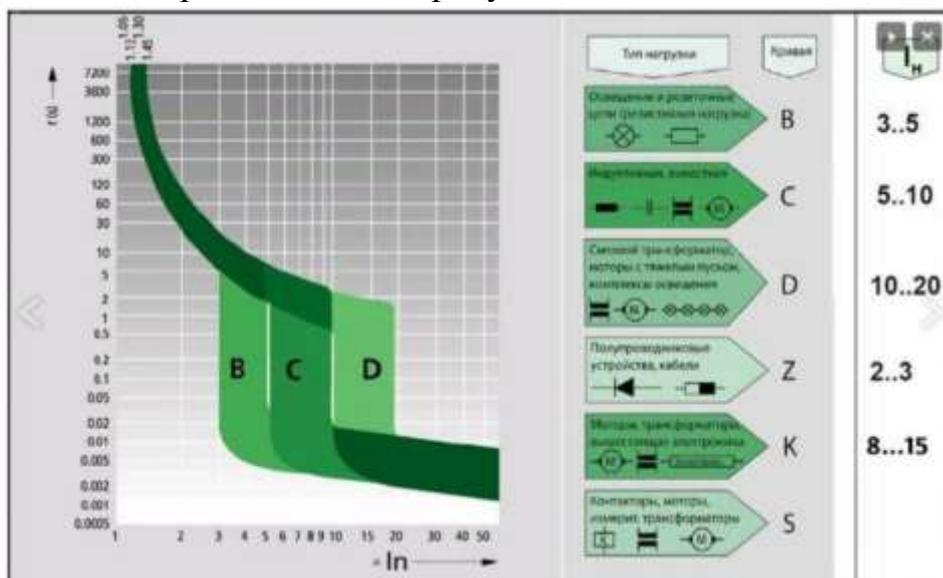
Приложение 4

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
A3160	50	110, 220	1,2. 3	15...50	1.6..3,6	2,5..4,5	0,025	158x105x89
A3110	100	220	2,3	15...100	5	2,5...10	0,015	237x105x112
A3120	200	220	2.3	15...100	20	18	0,015	258x153x105
A3130	200	220	2,3	100..200	17...28	14...25	0,015	300x199x106
A3140	600	220	2.3	100..200	17...28	14...25	0,015	561x217x141
A3710	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.

Время-токовые характеристики автоматических выключателей и рекомендуемое применение представлено на рисунке



Приложение 5

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

Характеристики проводов

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

Сечение, мм ²	16	25	35	50	70
R_{Π} , Ом/км	2,1	1,4	1,0	0,7	0,6

Классы нагревостойкости

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

Показатели нагрева	Класс изоляции				
	А	Е	В	Ф	Н
Нормированная температура нагрева, оС	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

Электрический привод

учебно-методическое пособие
по выполнению курсовой работы
для студентов направлений подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 35.03.06 Агроинженерия

Редактор Осипова Е.Н.

Подписано к печати 14.10.2024 г. Формат 60x84. 1/16.
Бумага офсетная. Усл. п. 2,38. Тираж 25 экз. Изд. № 7740.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365, Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ