МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ
(Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

Кафедра «Эксплуатация энергетического
оборудования и электрические машины»

Н.Е. Пономарёва, Е.А. Шабаев, В.Н. Беленов, М.М. Романовец

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Лабораторный практикум

Зерноград – 2024

УДК [62-83:62-5:636](075.8)

Печатается по решению методического совета
энергетического факультета
Азово-Черноморского инженерного института – филиала ФГБОУ ВО
«Донской государственный аграрный университет» г. Зернограде

Рецензенты:
кандидат технических наук, доцент ***Лебедев К.Н.,***
кандидат технических наук, доцент ***Юндина А.М.***

Электропривод: лабораторный практикум / Н.Е. Пономарёва, Е.А. Шабаев, В.Н. Беленов, М.М. Романовец. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024. – 89 с.

Издание содержит методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплинам «Электропривод», «Электроэнергетическое оборудование и электропривод теплотехнического оборудования», «Электропривод и электротехнологии» для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 35.03.06 Агроинженерия (профиль подготовки «Электрооборудование и электротехнологии»), 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника (профиль подготовки «Энергообеспечение предприятий») и 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (профиль подготовки «Электроснабжение»).

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры ЭЭО и ЭМ.
Протокол № 8 от 21.02.2024 г.

Рассмотрено и одобрено методическим советом энергетического факультета.
Протокол № 3 от 27.02.2024 г.

© Пономарёва Н.Е., Шабаев Е.А.,
Беленов В.Н., Романовец М.М., 2024
© Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……...4

Правила работы в лаборатории электропривода 5
Правила безопасности при выполнении лабораторных работ..... ……6

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Исследование механических характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения 7
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Исследование механических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором в двигательном режиме работы……...15
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Определение момента инерции и махового момента электропривода методом свободного выбега…….24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Определение механических характеристик рабочих машин 29
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Исследование динамики нагревания и охлаждения трехфазного асинхронного электродвигателя..... 32
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. Исследование аппаратов защиты39
Л**АБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7.** Управление пуском двигателя постоянного тока параллельного возбуждения 46
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. Автоматическое управление пуском двигателя постоянного тока..... 52
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9. Исследование схем управления пуском асинхронного двигателя с фазным ротором 57
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10. Исследование схем включения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в однофазную сеть..... 64
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11. Исследование схем управления пуском асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором..... 71
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12. Исследование схем управления работой асинхронного двигателя 75
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13. Автоматизация процесса торможения асинхронного двигателя противовключением с использованием реле контроля скорости 79
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14. Автоматизация динамического торможения трехфазного асинхронного двигателя..... 84

Литература…….88

ВВЕДЕНИЕ

Современное сельскохозяйственное производство немыслимо без применения электротехнологического оборудования, оборудования в котором происходит преобразование электрической энергии в другие виды: механическую, тепловую, энергию оптического излучения и т.д.

Особую роль в повышении эффективности сельскохозяйственного производства играет электропривод. Около 69% вырабатываемой в стране электроэнергии потребляется электроприводом. Основными достоинствами электропривода являются: широкий диапазон мощностей (от сотых долей Вт до десятков тысяч кВт) и угловых скоростей вращения (от долей оборота вала в минуту до нескольких сотен тысяч оборотов в минуту), доступность регулирования угловой скорости вращения, высокий КПД, простота автоматизации и эксплуатации.

Благодаря этим достоинствам электропривод широко используется для привода разнообразных машин и механизмов: оборудования для приготовления и раздачи кормов, удаления навоза, поддержания параметров микроклимата производственных объектов, в системах водоснабжения.

Материал, изложенный в практикуме, направлен на формирование у студентов умений и навыков, связанных с реализацией современных тенденций в области электропривода, умений и навыков реализовывать современные технологии и обосновывать их применение в профессиональной деятельности, умений и навыков проведения экспериментальных исследований механических характеристик электродвигателей и приводных характеристик рабочих машин; исследования характеристик аппаратов защиты.

Лабораторные работы являются одной из важнейших составных частей учебного процесса при формировании специалиста любого профиля. Лабораторная работа позволяет глубже воспринимать процессы, описываемые в теории, убеждаться на практике в достоверности теоретических закономерностей и относиться к ним с большим доверием.

Тщательное выполнение лабораторных работ, осмысление и обобщение полученных результатов, оформление отчетов с соблюдением требований стандартов и ЕСКД обеспечат высокую эффективность познавательного процесса.

ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1. К занятиям в лаборатории допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и расписавшиеся в журнале.

2. Лабораторные работы выполняются на стендах бригадами студентов численностью не менее двух человек.

3. Перед выполнением лабораторной работы производится проверка подготовки студентов к данной работе. При успешном ответе на вопросы преподавателя и наличии бланков отчетов (тетрадей) с вычерченными схемами и таблицами студент допускается к выполнению лабораторной работы. При выполнении очередной лабораторной работы необходимо иметь также полностью оформленный отчет по предыдущей работе. В противном случае студент не допускается к выполнению лабораторной работы.

4. После допуска к лабораторной работе студенты на лабораторном стенде при необходимости собирают электрическую схему. Собранная схема предъявляется для проверки преподавателю. По его разрешению студенты допускаются к выполнению лабораторной работы.

5. Студент обязан бережно обращаться с оборудованием, аппаратурой и приборами. Запрещается делать какие-либо дополнительные надписи на приборах, стендах и столах.

6. Выполнив лабораторную работу, студенты должны отключить электропитание стенда и разобрать схему.

7. В случае нарушения внутреннего распорядка и техники безопасности студент отстраняется от выполнения лабораторной работы.

8. Повторное выполнение лабораторной работы возможно только при наличии разрешения заведующего кафедрой или декана факультета.

ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

При выполнении лабораторных работ необходимо выполнять следующие правила безопасности.

1. Перед началом сборки схемы следует убедиться в том, что переключатель питания стенда находится в выключенном состоянии.

2. Производить сборку и разборку схемы разрешается только при отключенном напряжении питания. Выполнять какие-либо пересоединения в схемах под напряжением запрещается.

3. Убедиться в исправности изоляции соединительных проводов. Не использовать провода без наконечников.

4. Подача напряжения на стенд производится только после проверки схемы преподавателем и с его разрешения, а также после предупреждения о включении всех студентов, выполняющих данную лабораторную работу.

5. Если в процессе работы требуется неоднократное включение и отключение установки, то эти операции должны выполняться только одним студентом. В аварийных случаях отключение стенда от напряжения питания может быть произведено любым из студентов.

6. Запрещается касаться любых токоведущих частей лабораторной установки независимо от того, под каким напряжением они находятся.

7. Обнаружив любую неисправность лабораторного стенда, оборудования, необходимо немедленно отключить питание стенда и сообщить об этом преподавателю.

8. Запрещается оставлять без надзора работающую лабораторную установку.

9. Студент несет персональную ответственность за нарушение порядка и правил безопасности в лаборатории.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: приобрести практические навыки в выполнении опытов по снятию данных и построении механических характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения для различных режимов работы. Получить экспериментальное подтверждение теоретических сведений о механических характеристиках двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Общие сведения

Механическая характеристика ДПТ выражается уравнениями:

$$\omega = \frac{U}{C_м \Phi} - \frac{MR_{ац}}{C_м^2 \Phi^2}; \quad (1.1)$$

$$n = \frac{U}{C_е \Phi} - \frac{MR_{ац}}{C_е C_м \Phi^2}, \quad (1.2)$$

где ω и n – угловая скорость и частота вращения вала, рад/с и об/мин;

U – напряжение питания электродвигателя, В;

Ф – основной магнит поток машины, Вб;

$R_{ац}$ – сопротивление якорной цепи, Ом;

$C_е$ и $C_м$ – соответственно конструктивная постоянная ЭДС и момента машины постоянного тока.

Конструктивная постоянная ЭДС и момента машины постоянного тока могут вычисляться по соотношениям:

$$C_е = \frac{pN}{60a}; \quad (1.3)$$

$$C_м = \frac{pN}{2\pi a}, \quad (1.4)$$

где p – число пар полюсов;

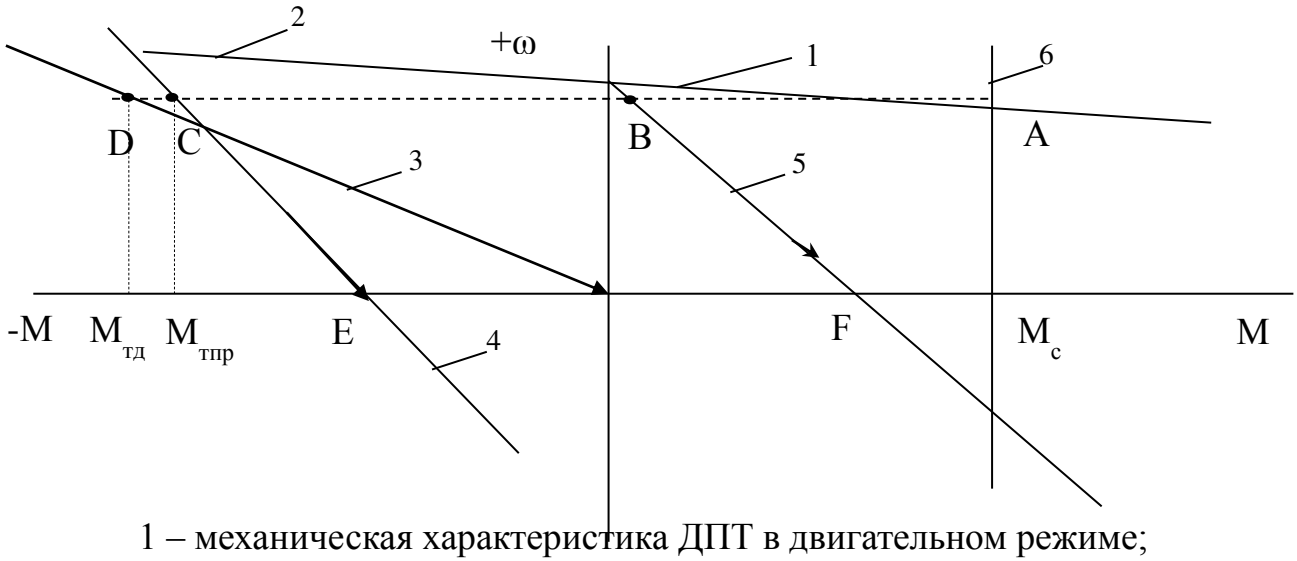
N – количество активных проводников обмотки якоря;

a – число параллельных ветвей в обмотке якоря.

Из выражений (1.1) и (1.2) следует, что механические характеристики ДПТ независимого возбуждения представляют собой прямые линии, наклон которых зависит от величины сопротивления якорной цепи $R_{ЯЦ}$ (рисунок 1.1).

Естественная характеристика двигателя постоянного тока получается при отсутствии внешних сопротивлений в якорной цепи и номинальных значениях напряжения и потока возбуждения. При изменении одного из перечисленных параметров получаются искусственные характеристики. Для двигателей постоянного тока независимого возбуждения возможны следующие режимы работы:

– двигательный;
– режим рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть;
– режим торможения противовключением;
– режим динамического торможения.



1 – механическая характеристика ДПТ в двигательном режиме;
2 – механическая характеристика при рекуперативном торможении;
3 – механическая характеристика при динамическом торможении;
4 – противовключение сменой полярности; 5 – противовключение введением $R_{пр}$; 6 – механическая характеристика рабочей машины

Рисунок 1.1 – Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Режим рекуперативного торможения наступает при частоте вращения якоря, превышающей частоту вращения идеального холостого хода. В этом случае ЭДС якоря становится больше напряжения сети и ток якоря изменяет свое направление по отношению к току в двигательном режиме:

$$I_а = \frac{U - E_а}{R_{ац}}, \qquad (1.5)$$

где $E_а$ – ЭДС якоря, В.

В связи с изменением направления тока якоря свое направление изменяет и электромагнитный момент электродвигателя, он становится тормозящим:

$$\omega = \frac{U}{C_м Ф} + \frac{MR_{ац}}{C_м^2 Ф^2}. \qquad (1.6)$$

Характеристики ДПТ в этом режиме, являясь продолжением характеристик в двигательном режиме, располагаются во втором квадранте осей координат (зависимость 2, рисунок 1.1).

Торможение противовключением может быть получено двумя способами:

– изменением полярности на обмотке якоря или обмотке возбуждения;
– включением в цепь якоря добавочного сопротивления.

При торможении противовключением по первому способу изменяется знак тока, а соответственно и знак момента, знак скорости сохраняется:

$$I_a = \frac{-U-E_a}{R_{ац}}, \tag{1.7}$$

$$\omega = -\left(\frac{U}{C_м\Phi} + \frac{MR_{ац}}{C_м^2\Phi^2}\right). \tag{1.8}$$

В этом случае характеристика также располагается во втором квадранте (участок [CE] зависимости 4, рисунок 1.1). При достижении двигателем скорости, равной нулю, его необходимо отключить от сети. В противном случае произойдет реверсирование двигателя.

Торможение противовключением по второму способу может происходить, например, в режиме тормозного спуска в приводе подъемного устройства, когда двигатель включен на подъем, а момент, развиваемый грузом, заставляет привод вращаться в сторону спуска груза.

При введении в цепь якоря сопротивления $R_{пр}$ двигатель из точки A перейдет в точку B. Так как в точке B момент, развиваемый двигателем, меньше момента сопротивления рабочей машины, угловая скорость двигателя начнет падать. Но так как в точке F момент двигателя все еще меньше момента сопротивления, направление вращения изменяется. При этом способе торможения изменяет знак скорость двигателя при сохранении знака момента (зависимость 5, рисунок 1.1):

$$I_a = \frac{U+E_a}{R_a+R_{пр}}, \tag{1.9}$$

$$\omega = \frac{U}{C_м\Phi} - \frac{M(R_a+R_{пр})}{C_м^2\Phi^2}. \tag{1.10}$$

Динамическое торможение ДПТ наступает при отключении обмотки якоря от сети и замыкании ее на некоторое сопротивление $R_т$. Обмотка возбуждения при этом остается подключенной к сети. Якорь продолжает вращаться за счет сил инерции, электродвигатель переходит в генераторный режим, но энергия, вырабатываемая при этом, преобразуется в тепловую, выделяемую на $R_т$ и R_a.

В режиме динамического торможения ЭДС якоря не изменяет своего направления по сравнению с двигательным режимом, но так как напряжение сети равно $U = 0$, то ток якоря, изменив свое направление, действует согласно с ЭДС. В этом режиме ток якоря и момент описываются следующими соотношениями:

$$I_a = \frac{-E_a}{R_{ац}}, \tag{1.11}$$

$$\omega = -\frac{M(R_a+R_{пр})}{C_м^2\Phi^2}. \tag{1.12}$$

Характеристики ДПТ в режиме динамического торможения проходят через начало координат и располагаются во втором квадранте (зависимость 3, рисунок 1.1).

Перечисленные характеристики можно получить с помощью системы машин (рисунок 1.2). В данной системе машины М2 и М3 включены в режиме «генератор – двигатель», асинхронный двигатель М4 является гонным для машины М3, исследуемый электродвигатель М1 является гонным для машины М2. Возбуждение машин постоянного тока регулируется широтно-импульсными преобразователями ШИП-1, ШИП-2, ШИП-3, управляемыми с помощью переменных резисторов R300, R301, R302. Напряжение на якоре электродвигателя М1 регулируется широтно-импульсным преобразователем ШИП с помощью резистора R201. Питание асинхронного двигателя М4 осуществляется от инвертора, позволяющего изменять частоту (резистор R402) и амплитуду трехфазного напряжения (резистор R401). Контроль частоты вращения машин М1, М2 осуществляется измерителем ИС1, машин М3, М4 – измерителем ИС2.

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. Собрать схему, изображенную на рисунках 1.2–1.4, установив перемычки J44-J45, J46-J47, J52-J53, J54-J55; J2-J3, J14-J15 и J59-J60, J63-J65. Включить сеть, включить SA300-SA302. Установить ток возбуждения машины М1, равный 400 мА. Записать погрешность прибора РА10.

Внимание! Перед включением автомата QF1 питания стенда тумблеры SA1, SA100, SA101, SA200, SA300, SA301, SA302, SA700 должны находиться в нижнем положении.

2. Снять зависимости $\omega = f(I_a)$ в двигательном режиме, режиме рекуперативного торможения и режиме торможения противовключением. Для этого с помощью перемычек J40-J41 и J42-J43 (рисунок 1.2) подсоединить резистор R910 параллельно цепи якоря М1.

Резисторами R300-R302 установить токи возбуждения машин М1-М3 равными 200 мА. Кнопкой SB704 подключить цепь якоря М1 к ШИП и резистором R201 установить напряжение на якоре М1 (PV10) равным 50 В.

Установить частоту инвертора 20…25 Гц резистором R402. Кнопкой SB700 подключить М4 к инвертору и резистором R401 установить напряжение на инверторе (PV3) 100 В.

Изменяя ток возбуждения машины М3 резистором R302, добиться равенства показаний PV1 и PV2, включить SA1.

Увеличивая ток возбуждения машины М3 резистором R302 и, если этого недостаточно, уменьшая ток возбуждения машины М2 резистором R301, перевести машину М1 в генераторный режим. Ток якоря (РА10) при этом должен поменять знак. Установив максимально возможный ток якоря М1 с обратным знаком, зафиксировать значения частоты вращения (ИС1) и тока якоря (РА10). Уменьшая далее ток возбуждения машины М3 (R302), снять еще 2–3 точки характеристики в генераторном режиме.

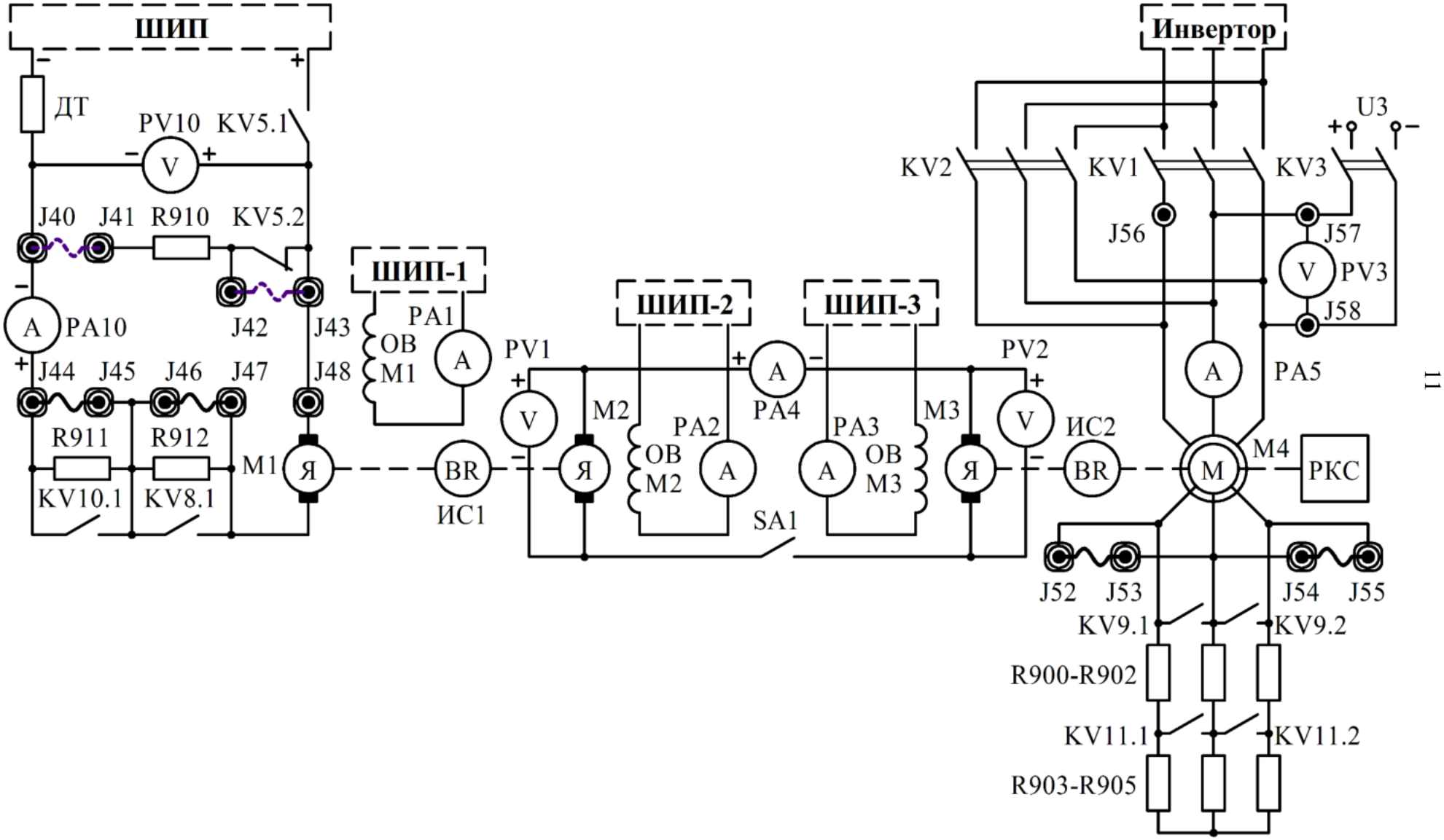


Рисунок 1.2 – Силовая схема лабораторного стенда

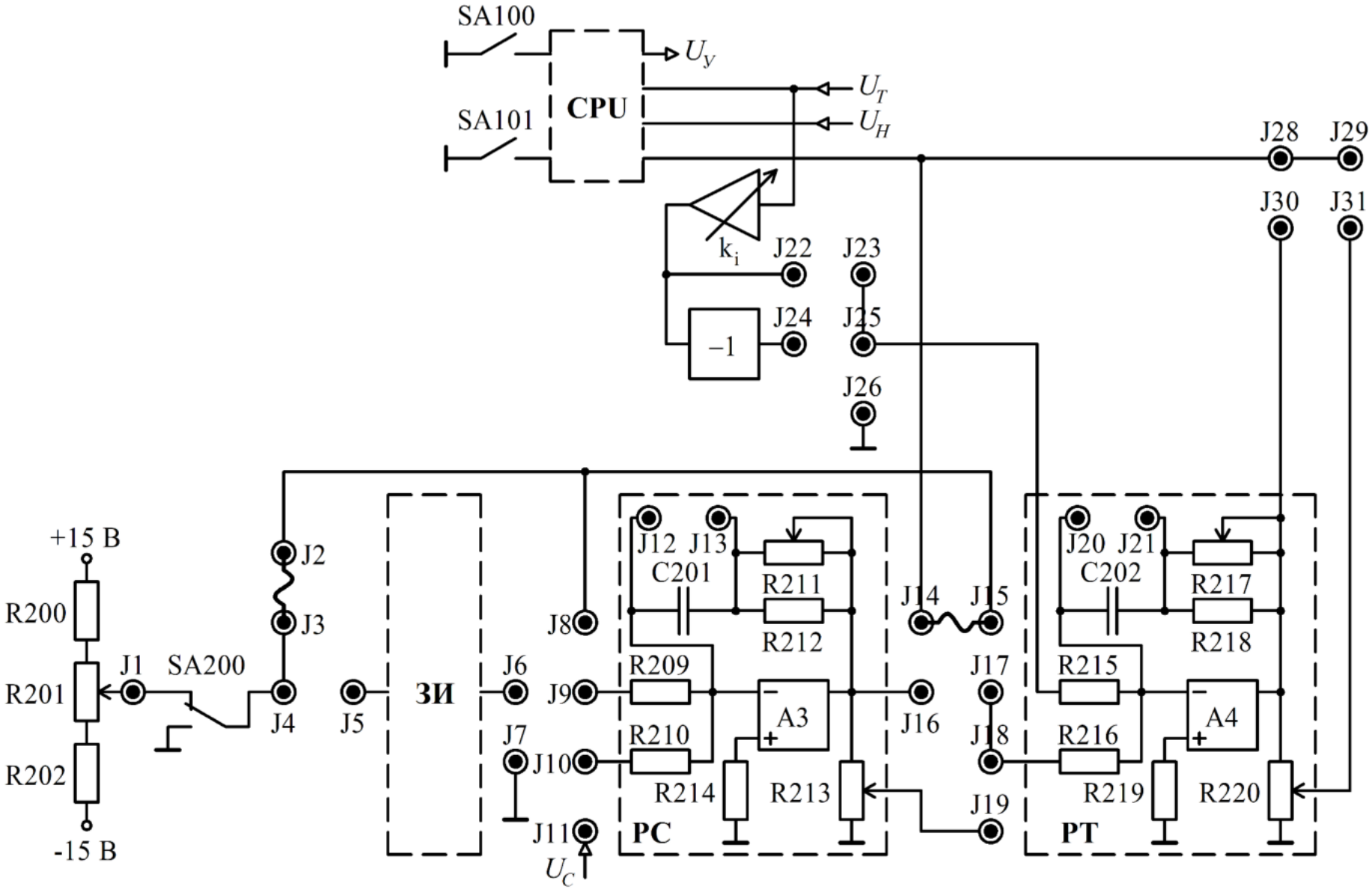


Рисунок 1.3 – Схема формирования напряжения управления ШИП

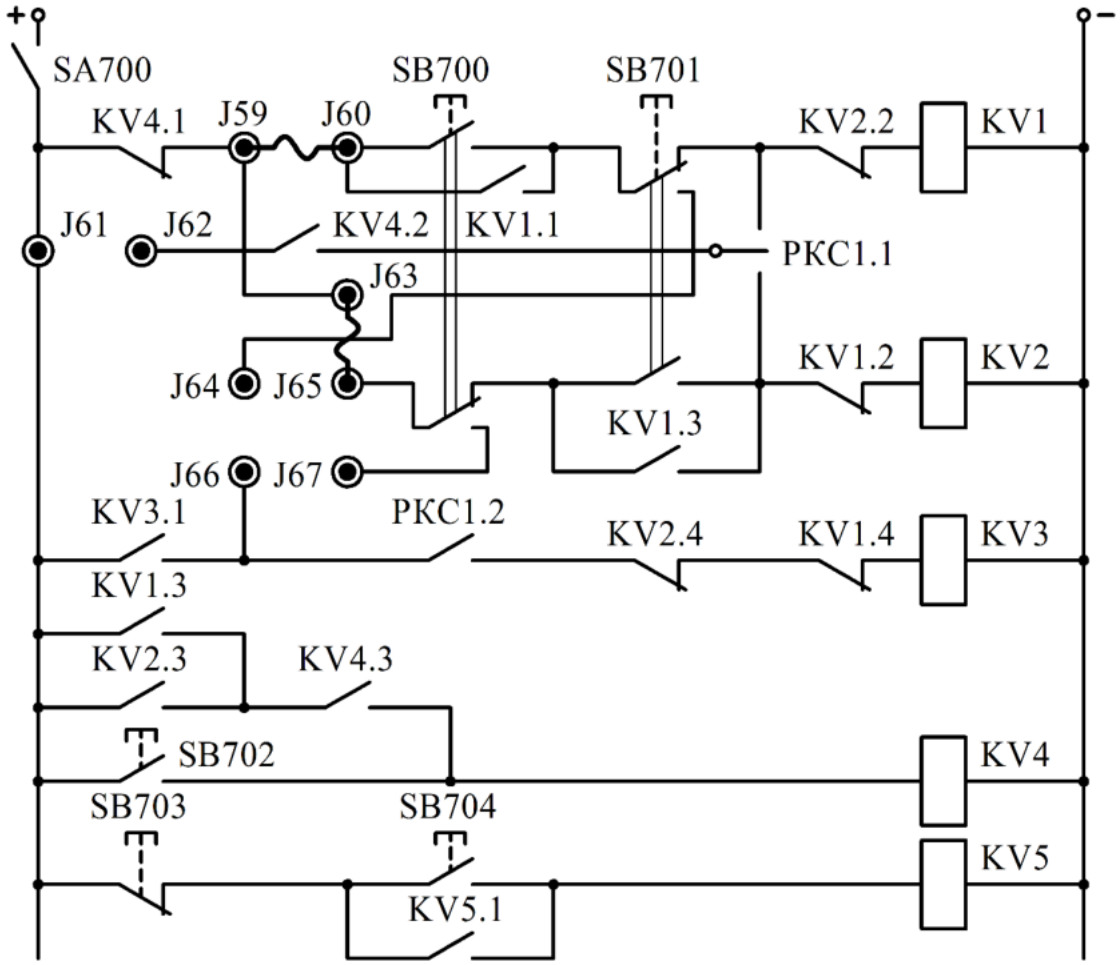


Рисунок 1.4 – Релейная схема управления лабораторного стенда

Продолжая уменьшать ток возбуждения М3, а затем увеличивая ток возбуждения М2 (R301), снять 3–4 точки скоростной характеристики М1 в двигательном режиме.

При полностью выведенном R302 (показание РА3 ≈ 0) кнопкой SB701 осуществить реверс машины М4. Далее опять увеличивая ток возбуждения машины М3 резистором R302, довести М1 до полной остановки. Если М1 не остановится, то плавно увеличивать частоту инвертора и пропорционально напряжение (R402, R401). Следя за тем, чтобы показания РА10 не превысили $2I_н = 6{,}64$ А, добиться обратного вращения машины М1. Снять 3–4 точки характеристики в четвертом квадранте.

Кнопкой SB702 остановить М4, кнопкой SB703 остановить М1, разомкнуть SA1.

3. Снять зависимости $\omega = f(I_a)$ в режиме динамического торможения. Результаты измерений занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Данные для построения механических характеристик ДПТ

I_a, А					
ω, рад/с					
М, Н·м					

Внимание! ШИП необходимо выключить (SA100, SA200 – вниз).

Резистором R300 установить ток возбуждения М1 (РА1) 400 мА, резистором R302 установить ток возбуждения М3 (РА3) 0 А. Установить частоту инвертора 40 Гц резистором R402 и запустить М4. Резистором R401 установить напряжение инвертора (PV3) 140 В. Замкнуть SA1 и, плавно увеличивая ток возбуждения М3 (РА3, R302), снять зависимость $\omega = f(I_Я)$ при U = 0 (4–5 точек).

Уменьшить ток возбуждения М3 резистором R302 до нуля, разомкнуть SA1, нажать SB702 (отключить М4), выключить SA300-SA302. Произвести процедуру отключения стенда. Разобрать схему.

4. По результатам измерений построить механические характеристики двигателя в двигательном и тормозном режимах.

Паспортные данные ДПТ типа 2П90L УХЛ4: $P_н$=0,55 кВт; $U_н$=220 В; $U_{вн}$=220 В; $I_{ан}$=3,32 А; $I_{вн}$=400 мА; $\eta_н$=67,5%; $n_н$=1500 об/мин; $n_м$=4300 об/мин; $R_а$=5,44 Ом и $R_{дп}$=3,89 Ом (при 15°С); $L_{ац}$=132 мГн; 2р=2; $J_{дв}$=0,005 кг·м^2; класс изоляции В, $\theta_{раб}$=75 °С.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Схемы лабораторного стенда (рисунки 1.2–1.4).
2. Результаты опытов по снятию скоростных характеристик $\omega = f(I_а)$ ДПТ в исследуемых режимах его работы.
3. Результаты расчетов и графические зависимости $\omega = f(M)$.
4. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Как перевести ДПТ в режим генераторного торможения?
2. Назовите способы получения торможения противовключением.
3. Поясните, как достигается каждый из способов торможение противовключением?
4. Изобразите механическую характеристику двигателя в двигательном режиме и в режиме торможения противовключением по одному из способов.
5. Изобразите механическую характеристику двигателя в двигательном режиме и в режиме динамического торможения.
6. Укажите, в каких режимах работают электродвигатели лабораторной установки при работе машины М1 в генераторном режиме?
7. В каких режимах работы М1 машина М3 работает генератором, а в каких двигателем?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ В ДВИГАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Цель работы: приобрести практические навыки в выполнении опытов по снятию данных и построению механических характеристик трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором в двигательном режиме работы. Получить экспериментальное подтверждение теоретических сведений о естественной и искусственных механических характеристиках данного асинхронного двигателя.

Общие сведения

Асинхронные двигатели (АД) получили в промышленности весьма широкое применение благодаря ряду существенных преимуществ по сравнению с другими типами электродвигателей. АД прост и надежен в эксплуатации, так как не имеет коллектора. Асинхронные двигатели дешевле и значительно легче двигателей постоянного тока.

Естественной называется механическая характеристика АД, полученная при номинальных параметрах (напряжении на обмотке статора, частоте тока питающей сети, сопротивлениях обмоток статора и ротора):

$$M = \frac{3U_Ф^2 R'_2}{\omega_1 S\left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2\right]}. \qquad (2.1)$$

Для практических расчетов естественной механической характеристики используют уточненную формулу Клосса:

$$M_{дв} = \frac{M_к(2+q)}{\frac{S_к}{S} + \frac{S}{S_к} + q}, \qquad (2.2)$$

где $M_{дв}$ – момент, развиваемый электродвигателем, Н·м;

$M_к$ – критический момент электродвигателя, Н·м;

S и $S_к$ – текущее скольжение и его критическое значение;

$q=2\alpha S_к$ – конструктивный параметр электродвигателя;

$\alpha=R_1/R_2'$ – соотношение активных сопротивлений статора R_1 и приведённого ротора R_2'.

Критическое значение момента и скольжения электродвигателя определяется по соотношениям:

$$S_к = \pm\frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}; \qquad (2.3)$$

$$M_к = \frac{3U_Ф^2}{2\omega_1\left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}\right]}. \qquad (2.4)$$

Критическое скольжение может быть также рассчитано по приближенной формуле:

$$S_к = S_н\left(\mu_к \pm \sqrt{\mu_к^2 - 1}\right), \qquad (2.5)$$

где $S_н$ – номинальное скольжение;

$\mu_к = M_к/M_н$ – кратность критического момента электродвигателя.

В формулах (2.3–2.5) знак «+» относится к двигательному режиму АД, знак «–» – к генераторному.

Скорость вращения магнитного поля АД может быть определена через число пар полюсов p и частоту питающей сети f_1:

$$\omega_1 = 2\pi f_1/p. \qquad (2.6)$$

Для более точного построения механических характеристик АД учитывают характерные точки механической характеристики: точку пуска, провала на пусковой ветви, критического момента, номинального момента, холостого хода, координаты которых определяются через координаты номинальной точки и соответствующие кратности моментов, информация о которых приводится в данных завода-изготовителя.

Как следует из выражения (2.1), регулировать угловую скорость АД можно изменением: подводимого напряжения, частоты питающей сети, числа пар полюсов, а у двигателей с фазным ротором также и за счет введения добавочного сопротивления в цепь ротора.

При регулировании угловой скорости АД введением добавочного сопротивления в цепь ротора (как следует из выражения (2.4)), значение критического момента не изменяется, изменяется только значение критического скольжения (рисунок 2.1). При регулировании критическая точка перемещается по прямой, параллельной оси скольжений.

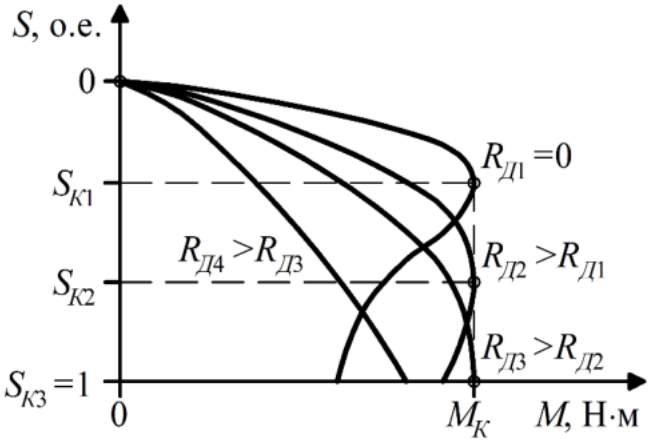


Рисунок 2.1 – Естественная и реостатные механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором

Данный способ регулирования характеризуется следующими показателями:

− регулирование осуществляется только вниз от основной угловой скорости;

− снижается жесткость механической характеристики, а соответственно и стабильность работы двигателя;

− диапазон регулирования составляет (2–3):1;

− с энергетической точки зрения реостатное регулирование в асинхронном приводе неэффективно, так как приводит к увеличению потерь энергии.

При регулировании угловой скорости асинхронного электродвигателя изменением подводимого напряжения, как следует из выражения (2.4), момент двигателя изменяется пропорционально квадрату напряжения, а это приводит к снижению перегрузочной способности электродвигателя. Диапазон регулирования в замкнутой системе составляет (3–4):1. Как и в предыдущем случае регулирование производится вниз от основной скорости.

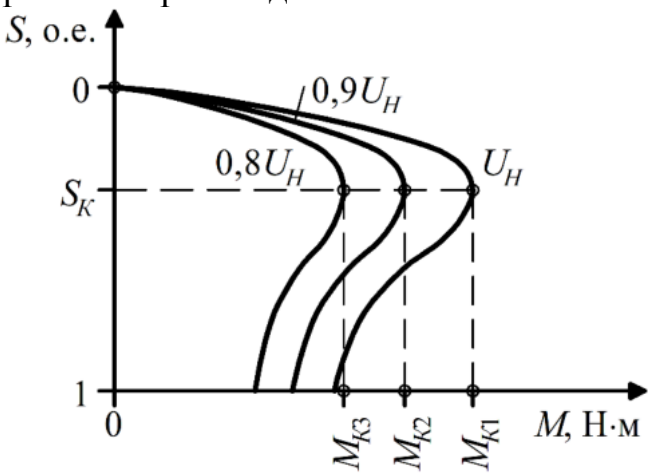


Рисунок 2.2 – Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении питающего напряжения

Искусственная характеристика при регулировании напряжением может быть получена пересчетом естественной характеристики:

$$M_{их} = M_{ех}(U_Р / U_н)^2, \qquad (2.7)$$

где $M_{их}$ и $M_{ех}$ – моменты электродвигателя естественной и искусственной механической характеристики, Н·м;

$U_р$ и $U_н$ – напряжение при регулировании и номинальное напряжение электродвигателя, В.

При регулировании частоты f напряжения питающей сети можно добиться регулирования угловой скорости АД в широких пределах как вверх, так и вниз от номинального значения синхронной скорости. Недостатками такого способа регулирования являются: необходимость в применении электронного преобразующего устройства (частотного регулятора), а также снижение перегрузочной способности при снижении частоты напряжения (рисунок 2.3).

Способом, дающим наилучший эффект при регулировании, является одновременное изменение частоты и напряжения питающей сети. В современных электроприводах этого добиваются с помощью полупроводниковых широтно-импульсных преобразователей (ШИП). Данный способ регулирования позволяет изменять угловую скорость и момент ДА в самых широких пределах, гибко изменять параметры электропривода в зависимости от тре-

бования технологического процесса. Единственным существенным недостатком применения ШИП является их высокая стоимость, поэтому они применяются в основном в ответственных электроприводах сложных технологических процессов, требующих регулирования угловой скорости и момента на валу электродвигателя.

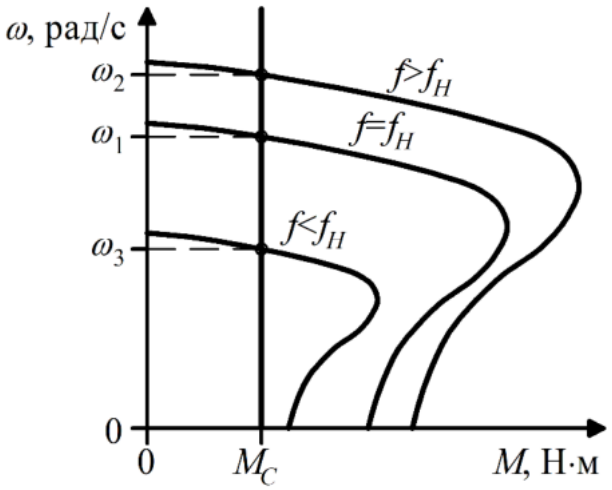


Рисунок 2.3 – Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения и частоты питающего напряжения

При выборе закона изменения напряжения и частоты необходимо учитывать характер изменения нагрузки. При выборе соотношения между частотой и напряжением, подводимым к статору АД, часто исходят из условия сохранения его перегрузочной способности, которая определяется отношением критического момента двигателя к моменту нагрузки.

При постоянном моменте нагрузки $M_c = \text{const}$ должно соблюдаться условие:

$$\frac{U_{1i}}{f_{1i}} = \text{const}, \tag{2.8}$$

для вентиляторного характера нагрузки

$$\frac{U_{1i}}{f_{1i}^2} = \text{const}, \tag{2.9}$$

при моменте нагрузки обратно пропорциональном скорости

$$\frac{U_{1i}}{\sqrt{f_{1i}}} = \text{const}. \tag{2.10}$$

При регулировании с соблюдением условия (2.8) значение критического момента электродвигателя не изменяется. Это позволяет при не зависящем от угловой скорости моменте сопротивления рабочей машины сохранять неизменную перегрузочную способность электродвигателя (рисунок 2.4).

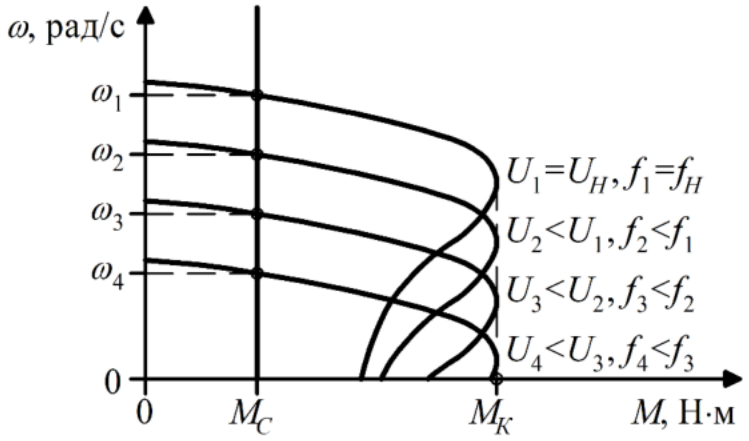


Рисунок 2.4 – Механические характеристики асинхронного двигателя при пропорциональном законе регулирования

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. Собрать схему, изображенную на рисунках 2.5 и 2.6, установив перемычки J52-J53, J54-J55 и J63-J65, J71-J73, J77-J78, J82-J83.

Внимание! Перед включением автомата QF1 питания стенда тумблеры SA100, SA101, SA200, SA300, SA301, SA302, SA700 должны находиться в нижнем положении, SA1 – в верхнем.

2. Исследовать естественную механическую характеристику АД. Для этого включить автоматом QF1 питание стенда. Тумблером SA302 включить ШИП-3, питающий обмотку возбуждения машины М3, и резистором R302 установить ток возбуждения, равный нулю (прибор РА3). Включить тумблеры SA1, затем SA700. Резистором R402 выставить частоту инвертора 50 Гц. Кнопкой SB701 запустить электродвигатель М4 и резистором R401 установить напряжение на приборе PV3, равное 220 В.

Изменяя резистором R302 ток возбуждения машины М3, снять 5–6 точек механической характеристики АД М4, измеряя угловую скорость вращения ω (прибор ИС2), ток $I_В$ возбуждения и ток $I_Я$ якоря нагрузочной машины М3 (приборы РА3 и РА4). Данные измерений занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерений и расчетов механической характеристики асинхронного двигателя

ω, рад/с (ИС2)						
$I_В$, мА (РА3)						
$I_Я$, мА (РА4)						
$M_С$, Н·м						

По значениям тока возбуждения и якоря и паспортным данным машины М3 рассчитать момент нагрузки на валу АД М4. Если принять, что магнитный поток Ф машины М3 пропорционален току возбуждения, то момент $M_С$ сопротивления, создаваемый машиной М3 на валу АД М4, может быть рассчитан по следующему уравнению:

$$M_с = \frac{M_н}{I_{вн} I_{ан}} I_в I_я, \qquad (2.11)$$

где $M_н$ – номинальный момент машины М3, Н·м;
$I_{вн}$ и $I_{ан}$ – номинальные токи возбуждения и якоря машины М3, А.

Результаты расчетов занести в таблицу 2.1. Вывести R302 в крайнее левое положение и кнопкой SB702 остановить М4. Выключить SA700.

3. Исследовать реостатные механические характеристики АД. Исследование первой реостатной механической характеристики асинхронного двигателя М4 производить при удаленной перемычке J77-J78 в цепи питания реле К9 (рисунок 2.6).

Включить SA700. Кнопкой SB701 запустить электродвигатель М4. Снять данные при введении первой ступени реостата (R900-R902) в цепь ротора в соответствии с методикой, изложенной в пункте 2.

Для исследования второй реостатной механической характеристики АД М4 необходимо удалить перемычку J82-J83 в цепи питания реле К11 (рисунок 2.6). Повторить исследования аналогично изложенному выше при введении обеих ступеней реостата (R900-R905) в цепь ротора.

4. Исследовать механические характеристики АД при регулировании уровня напряжения. Установить перемычки J77-J78 и J82-J83 в цепи питания реле К9, К11 (рисунок 2.6). Включить SA700. Кнопкой SB701 запустить М4 и резистором R401 установить напряжение на приборе PV3, равное 154 В. Изменяя резистором R302 ток возбуждения машины М3, выполнить измерения при заданном уровне напряжения. Повторить опыт для значения напряжения 110 В.

5. Исследовать механические характеристики АД при изменении частоты питающей сети. Резистором R402 выставить частоту инвертора 40 Гц. Включить SA700. Кнопкой SB701 запустить электродвигатель М4 и резистором R401 установить напряжение на приборе PV3, равное 220 В. Произвести исследование механической характеристики АД М4 при заданной частоте питающего напряжения. Повторить опыт для значения частоты 35 Гц.

6. Исследовать механические характеристики АД при изменении частоты и уровня питающего напряжения. Резистором R402 выставить частоту инвертора 40 Гц. Включить SA700. Кнопкой SB701 запустить электродвигатель М4 и резистором R401 установить напряжение на приборе PV3, равное 154 В. Произвести исследование механической характеристики ДА М4 при заданной частоте и уровне питающего напряжения. Повторить опыт для уровня напряжения 110 В и частоты 35 Гц.

7. Выполнить процедуру отключения стенда. Уменьшить напряжение инвертора до нуля резистором R401. Уменьшить задающую частоту инвертора резистором R402 до нуля. Выключить ШИП-3 тумблером SA302. Отключить автомат QF1. Разобрать схему.

8. По результатам измерений построить естественную и регулировочные механические характеристики асинхронного двигателя.

Паспортные данные ДПТ типа 2П90L УХЛ4: $P_н$=0,55 кВт; $U_н$=220 В; $U_{вн}$=220 В; $I_{ан}$=3,32 А; $I_{вн}$=400 мА; $\eta_н$=67,5%; $n_н$=1500 об/мин; $n_м$=4300 об/мин; $n_н$=1500 об/мин; $R_а$=5,44 Ом и $R_{дп}$=3,89 Ом (при 15 °С); $L_{ац}$=132 мГн; 2p=2; $J_{дв}$=0,005 кг·м^2; класс изоляции В, $\theta_{раб}$=75 °С.

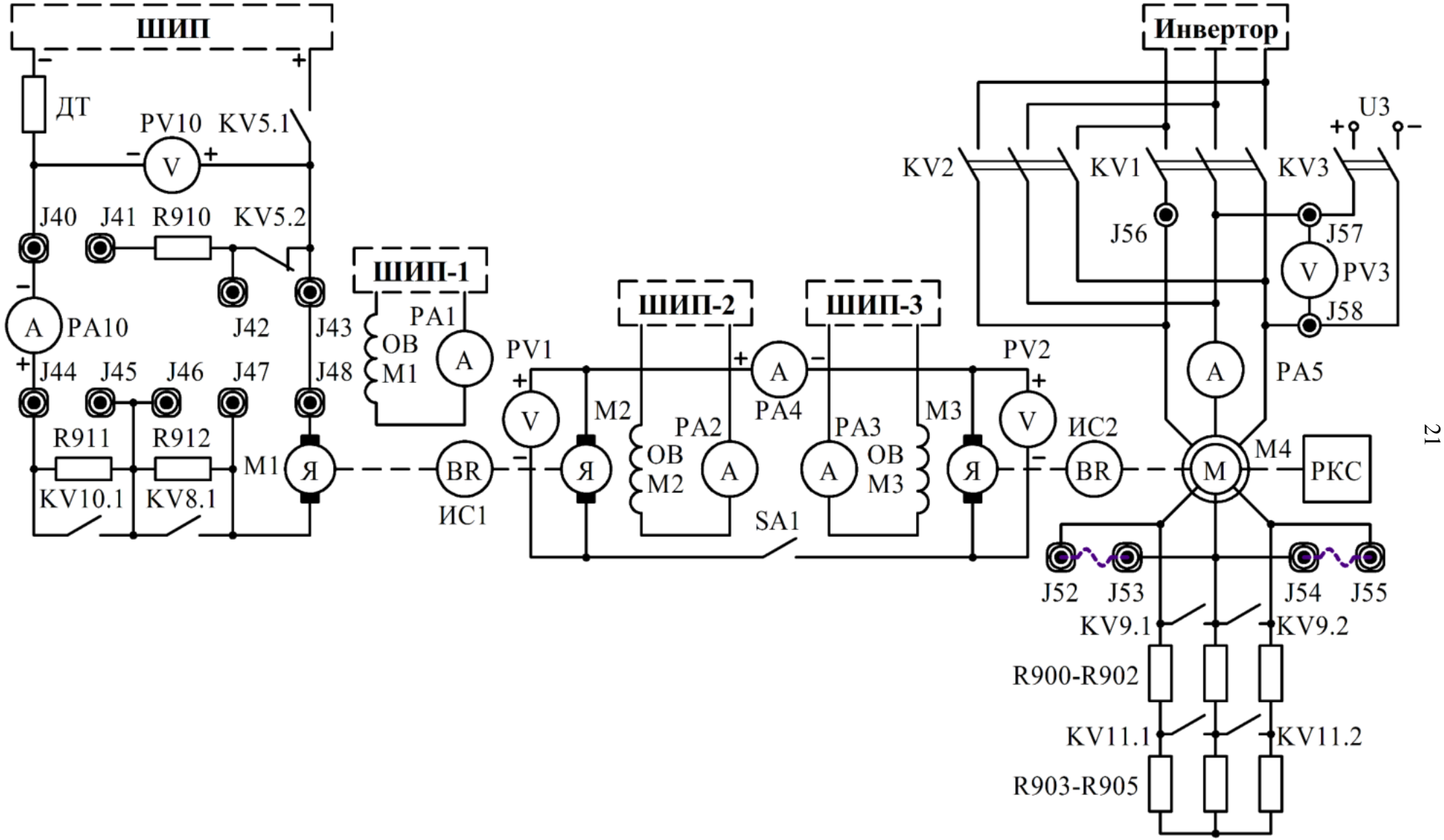


Рисунок 2.5 – Силовая схема лабораторного стенда

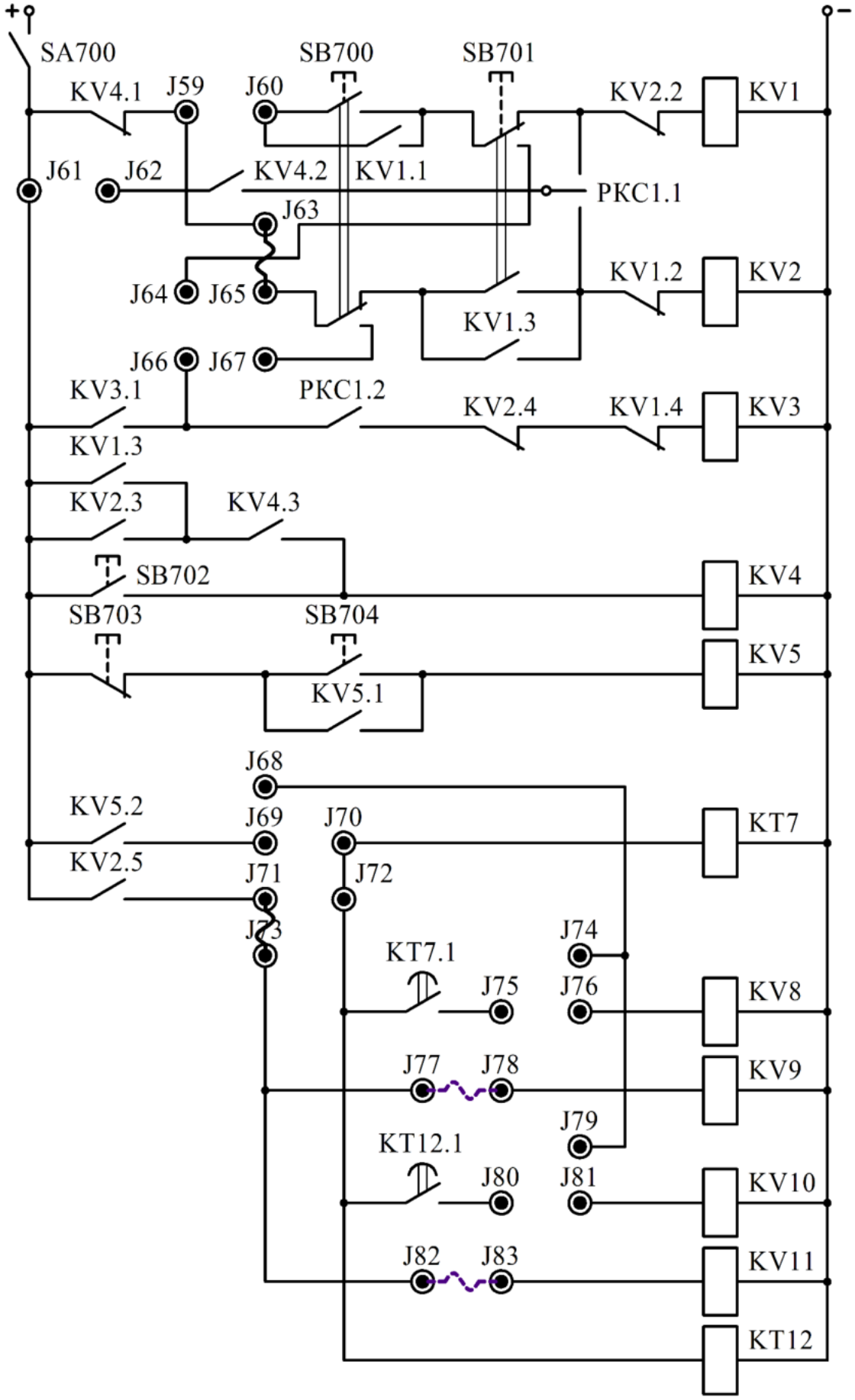


Рисунок 2.6 – Релейная схема управления лабораторного стенда

Паспортные данные ДА типа **МТН 011–6 У1**: f = 50 Гц; $P_н$ = 1,4 кВт (S3, ПВ 40 %); $U_{н\ Δ/Y}$ = 220/380 В; $I_{н\ Δ/Y=}$ = 8,5/4,9 А; $n_н$ = 890 об/мин; $η_н$ = 65 %; cosφ = 0,67; $U_{2н}$ = 114 В; $I_{2н}$ = 8,8 А; $μ_K$ = 2,6; R_1 = 4,55 Ом; R'_2 = 7,3 Ом; X_1 = 6,2 Ом; X'_2 = 6,1 Ом; $J_{дв}$ = 0,0213 кг·м^2; $m_{дв}$ = 60 кг; класс изоляции Н, $θ_{раб}$ = 115 °С. Обмотки статора соединены по схеме «звезда».

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Схемы, изображенные на рисунках 2.5 и 2.6.
2. Результаты опытов по снятию механических характеристик АД естественной и искусственных при различных способах регулирования.
3. Графические построения экспериментальных механических характеристик АД в одних осях координат по каждому из способов регулирования.
4. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется естественной механической характеристикой АД?
2. Перечислите способы регулирования угловой скорости АД.
3. Что такое перегрузочная способность асинхронного двигателя и какова её зависимость от питающего напряжения?
4. Различаются ли по значению максимальные моменты АД в двигательном и генераторном режимах?
5. Как меняется форма характеристики M=f(S) при увеличении активного сопротивления в цепи ротора?
6. Достоинства и недостатки реостатного регулирования.
7. Изобразите механические характеристики АД при изменении уровня питающего напряжения.
8. Достоинства и недостатки регулирования асинхронного двигателя изменением уровня напряжения.
9. Проиллюстрируйте способ регулирования асинхронного двигателя изменением частоты питающего напряжения на примере его механических характеристик.
10. Что такое пропорциональный закон регулирования?
11. От чего зависит выбор закона регулирования напряжения и частоты питающей сети?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ И МАХОВОГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕТОДОМ СВОБОДНОГО ВЫБЕГА

Цель работы: приобретение практических навыков определения момента инерции электропривода методом свободного выбега.

Общие сведения

В процессе проектирования рационального электропривода используют приводные характеристики сельскохозяйственных машин. Они учитывают все особенности работы электропривода. К приводным характеристикам относятся:

- технологическая;
- кинематическая;
- энергетическая;
- механические;
- нагрузочная;
- инерционная характеристики.

Остановимся более подробно на инерционной характеристике. Количественными показателями инерционной характеристики являются момент инерции электропривода $J_{пр}$ и коэффициент инерции F_J.

Момент инерции электропривода складывается из моментов инерции всех подвижных частей электропривода:

$$J_{пр} = J_{дв} + J_{передачи} + \frac{J_{рм}}{i^2}, \qquad (3.1)$$

где $J_{дв}$ – момент инерции двигателя, кг·м^2;

$J_{передачи}$ – момент инерции передаточного устройства, кг·м^2;

$J_{рм}$ – момент инерции рабочей машины, кг·м^2.

Величина момента инерции, махового момента необходима при решении ряда практических задач, например, при определении длительности механических переходных процессов, выборе мощности электродвигателя при пульсирующей или ударной нагрузке.

Коэффициент инерции определяется отношением момента инерции привода к моменту инерции двигателя:

$$F_J = \frac{J_{пр}}{J_{дв}} = \frac{J_{дв} + J_{передачи} + \frac{J_{рм}}{i^2}}{J_{дв}}. \qquad (3.2)$$

По величине коэффициента инерции электропривод сельскохозяйственных машин можно разделить на три группы:

- 5 – транспортеры, шнеки, нории, центробежные насосы;
- 5–15 – смесители, центробежные вентиляторы, измельчители кормов;
- >15 – дробилки, пневмотранспортеры, сепараторы.

Существуют практические методы определения момента инерции рабочей машины:

- с использованием кривой выбега;
- метод падающих грузов;
- метод затухающего вращения маховиков.

Сущность метода свободного выбега или самоторможения заключается в следующем. Если отключить приводной двигатель, работающий вхолостую от источника питания, то вращающиеся элементы (маховик, якорь и т.п.) будут продолжать вращаться за счет предварительно запасенной кинетической энергии, постепенно замедляясь из-за действия тормозящих сил, обусловленных потерями на трение.

Кинетическая энергия вращающихся частей привода определяется соотношением

$$A = \frac{J \cdot \omega^2}{2}, \tag{3.3}$$

где J – момент инерции привода, кг·м^2;

ω – угловая скорость, рад/с.

Очевидно, что энергия, запасенная приводом, при самоторможении будет израсходована на преодоление тормозящего действия сил трения, то есть мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения, должна быть равна уменьшению запаса кинетической энергии системы:

$$P_{тр} = -\frac{dA}{dt} = -J\omega\frac{d\omega}{dt}. \tag{3.4}$$

Отсюда

$$J = -\frac{P_{тр}}{\omega\frac{d\omega}{dt}}, \tag{3.5}$$

где $P_{тр}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения.

Для определения потерь на трение в системе «электродвигатель – рабочая машина» (в том случае, если привод осуществляется двигателем постоянного тока с параллельным возбуждением) вычисляют потери холостого хода и потери в меди:

$$P_0 = U \cdot I_0, \tag{3.6}$$

$$P_{мед} = I_0^2 \cdot R_a^{/}, \tag{3.7}$$

где U – напряжение на зажимах двигателя, В;

I_0 – ток якоря при холостом ходе привода, А;

$R_a^{/}$ – сопротивление обмотки якоря, добавочных полюсов и компенсационной обмотки, Ом.

Из соотношений (3.6) и (3.7) следует, что

$$P_{тр} = P_0 - P_{мед}. \tag{3.8}$$

Иногда вместо термина «момент инерции» используют термин «маховый момент». Маховый момент GD^2 есть произведение силы тяжести на

квадрат диаметра инерции. Момент инерции J и маховый момент GD^2 связаны между собой следующим соотношением:

$$J = \frac{GD^2}{4} \quad \text{или} \quad GD^2 = 4J \text{ кг·м}^2. \tag{3.9}$$

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. Изучить способы определения момента инерции.
2. Собрать электрическую схему, изображенную на рисунке 3.1.

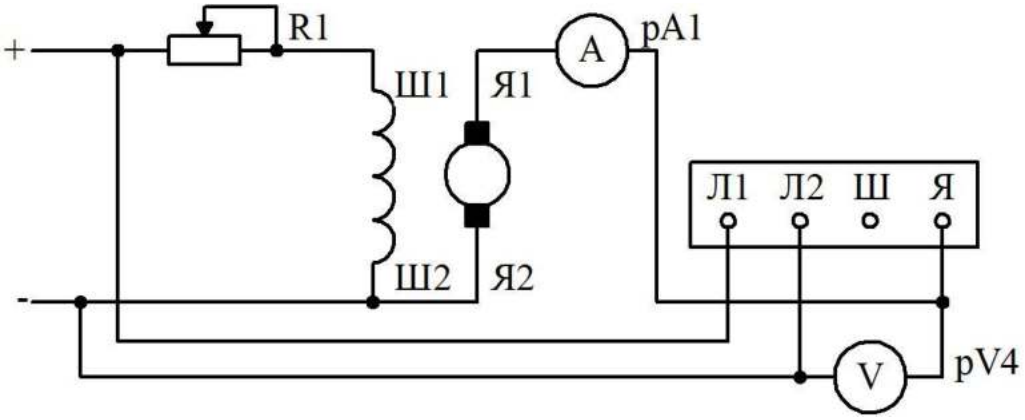


Рисунок 3.1 – Схема электрическая принципиальная для снятия кривой выбега

3. Провести опыт свободного выбега агрегата в трехкратной повторности. При этом система разгоняется до частоты вращения, несколько большей, чем номинальная, а затем якорь двигателя отключается от сети и через равные промежутки времени (например, 10 с), снимают значения частоты вращения агрегата по показаниям тахометра. Показания снимаются до полной остановки агрегата и записываются в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Данные к построению кривой выбега

t	с	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
n_1	об/мин											
n_2	об/мин											
n_3	об/мин											
$n_{ср}$	об/мин											
ω	рад/с											

По данным таблицы 3.1 в первом квадранте строится зависимость ω=f(t), а во втором квадранте – зависимость $\Delta P_{тр.}$=f (ω). Зависимость $\Delta P_{тр.}$=f(ω) может быть определена в соответствии с методикой, изложенной в разделе «Общие сведения» или пользуются кривой, приведенной на рисунке 3.2.

4. Определить момент инерции. Для этого на кривой выбега выбирается точка, например точка А (см. рисунок 3.3), к которой проводится касательная. Из точки касания проводится перпендикуляр к касательной [АС] и опускается нормаль на ось времени [АВ]. С учетом известных масштабов уг-

ловой скорости μ_ω и времени μ_t определяется масштаб поднормали ВС:

$$\mu_{BC} = \mu_\omega{}^2 / \mu_t = (1/c)^2 / (c/см). \quad (3.10)$$

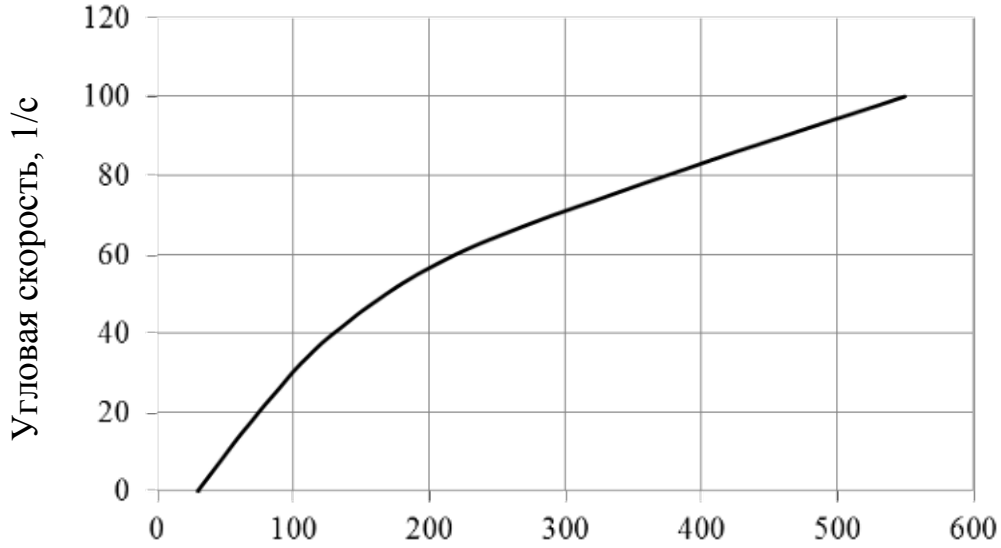


Рисунок 3.2 –Зависимость мощности потерь на трение от угловой скорости

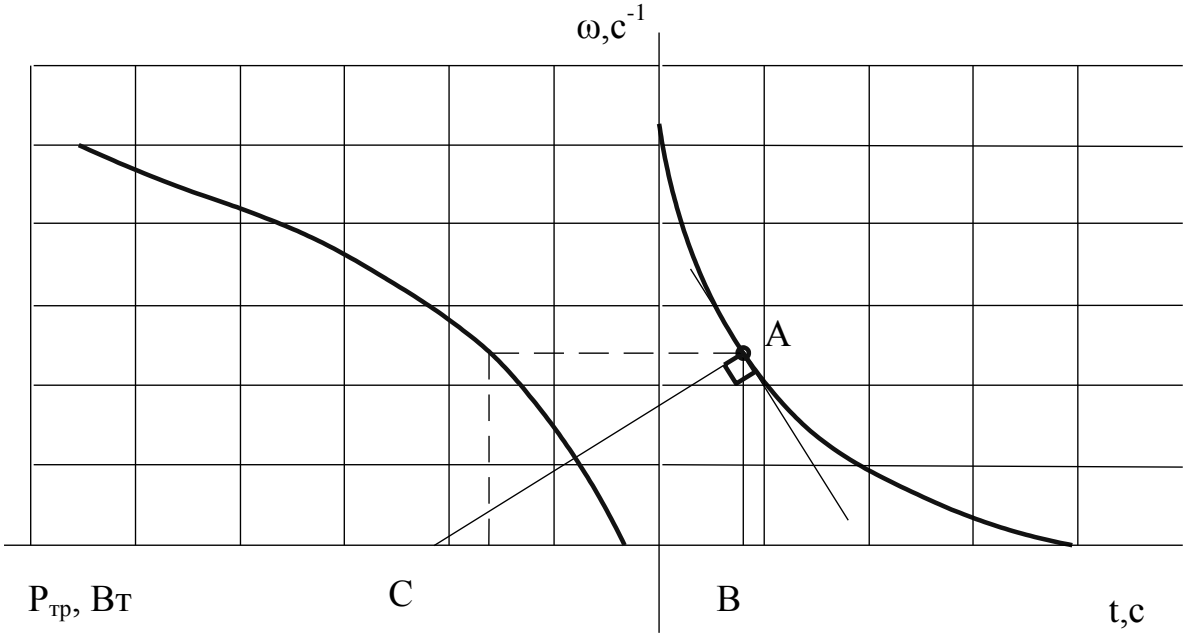


Рисунок 3.3 – К определению момента инерции по кривой выбега

Следовательно

$$\omega \frac{d\omega}{dt} = /BC/ \frac{\mu_\omega{}^2}{\mu_t}. \quad (3.11)$$

Тогда момент инерции системы будет равен:

$$J = \frac{P_{тр}}{/BC/ \frac{\mu_\omega{}^2}{\mu_t}}. \quad (3.12)$$

Для повышения достоверности результатов, момент инерции определяется для 3–4 точек кривой выбега и в расчет принимается среднее значение.

5. Оформить отчет по работе.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Схема, изображенная на рисунке 3.1.
2. Результаты опыта по снятию кривой выбега.
3. Графические зависимости $\omega=f(t)$ и $\Delta P_{тр.}=f(\omega)$.
4. Результаты расчетов момента инерции.
5. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Перечислите виды приводных характеристик.
2. Какие величины являются количественными показателями инерционной характеристики?
3. При решении каких задач используется момент инерции?
4. Перечислите методы определения момента инерции.
5. Поясните методику определения момента инерции по кривой выбега.
6. Дайте определение термину «маховый момент».
7. В каком соотношении между собой находятся маховый момент и момент инерции?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ МАШИН

Цель работы: приобретение практических навыков определения опытным путем механических характеристик рабочей машины.

Общие сведения

Механические характеристики рабочих машин $M_{мс}=f(\omega_м)$ необходимы для проведения анализа электропривода как механической системы. В частности, механические характеристики рабочих машин, рассматриваемые совместно с характеристиками двигателей, позволяют определить координаты электропривода – скорость и моменты – в установившемся (статическом) режиме. Также они позволяют оценить условия пуска двигателя и выполнить проверку по перегрузочной способности.

Механическая характеристика рабочей машины может быть определена следующими методами:

– при помощи тарированной машины постоянного тока независимого возбуждения;

– при помощи динамографа;

– по кривой выбега.

При известном моменте инерции рабочей машины её механическую характеристику удобно определять по кривой выбега (см. рисунок 4.1 *а*).

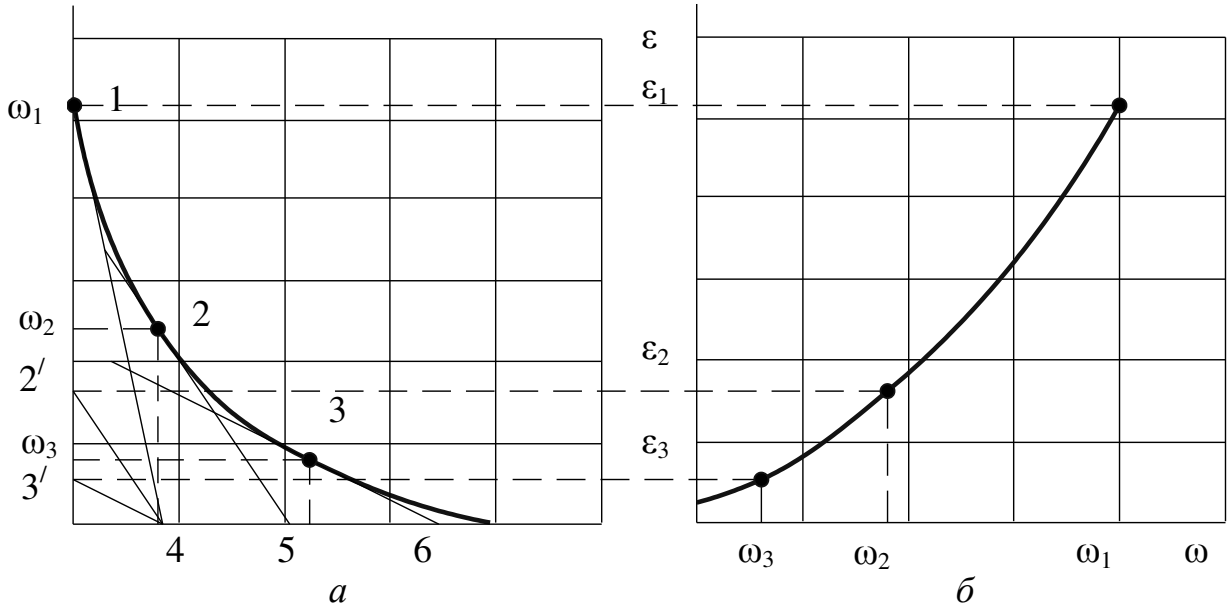


Рисунок 4.1 – К определению механической характеристики по кривой выбега

Для получения кривой выбега электропривод разгоняется до частоты вращения несколько большей, чем номинальная, а затем, отключив якорь двигателя от сети через равные промежутки времени, снимают значения частоты вращения агрегата по показаниям тахометра. Показания снимаются до

полной остановки агрегата. После получения кривой выбега проводят ее графическое дифференцирование.

На кривой ω=f(t) выбирают точки 1,2,3, через которые проводят касательные 1–4, 2–5, 3–6. Из точки 4 проводят линии $2^{/}$–4, $3^{/}$–4, параллельные касательным 2–5, 3–6 соответственно. Полученные в результате построений отрезки /1-0/, /$2^{/}$0/, /$3^{/}$0/ пропорциональны ускорениям в точках 1, 2, 3. Далее строят зависимость ε=f(ω), которая в определенном масштабе представляет собой механическую характеристику $M_{мс}=f(\omega_м)$. Данный вывод делается на основании анализа уравнения движения электропривода:

$$M_{изб} = M_{дв} - M_{мс} = J\frac{d\omega}{dt} = J\varepsilon, \qquad (4.1)$$

где $M_{дв}$ – момент двигателя, Н·м;

$M_{мс}$ – момент сопротивления рабочей машины, Н·м.

Так как после отключения двигателя $M_{дв}=0$, то выражение (4.1) принимает вид:

$$M_{мс} = J\frac{d\omega}{dt} = J\varepsilon, \qquad (4.2)$$

Для ряда машин момент сопротивления рабочей машины может быть найден аналитическим путем. Так, при постоянном моменте сопротивления угловая скорость изменяется линейно:

$$\omega = \omega_{нач} - \frac{\omega_{нач}}{t_{кон}} \cdot t, \qquad (4.3)$$

где $\omega_{нач}$ – начальная угловая скорость, $с^{-1}$;

$t_{кон}$ – время опыта, с.

При этом угловое ускорение постоянно и равно:

$$\varepsilon = \frac{\omega_{нач}}{t_{кон}}. \qquad (4.4)$$

Момент сопротивления при известном моменте инерции будет равен:

$$M_с = J\varepsilon. \qquad (4.5)$$

В соответствии с описанным выше методом для получения зависимости $M_{мс}=f(\omega_м)$ должен быть предварительно определен момент инерции машины. Этого недостатка лишен метод, основанный на использовании тарированной машины постоянного тока независимого возбуждения.

Для определения механической характеристики рабочей машины её соединяют с тарированной машиной и при различных значениях угловой скорости, изменяемой в пределах от нуля до $\omega_м = \omega_{мн}$, фиксируют ток якоря $I_а$. Различные значения скорости получают за счет изменения величины подводимого к якорю напряжения $U_а$. Момент сопротивления рабочей машины на каждой скорости рассчитывается по формуле

$$M_с = C \cdot I_а - M_{хтм}, \qquad (4.6)$$

где С – постоянная, обусловленная конструктивными особенностями и принятым значением магнитного потока Ф;

$M_{хтм}$ – момент холостого хода тарированной машины.

Коэффициент С может быть рассчитан или определен экспериментально. Так как

$$C = C_e \cdot \Phi = \frac{E}{\omega}, \qquad (4.7)$$

то для его экспериментального определения в режиме холостого хода при выбранном постоянном токе возбуждения $i_в$ и разных напряжениях на зажимах якоря фиксируют напряжение U_a, ток якоря I_{ax} и угловую скорость ω. Тогда

$$C = \frac{1}{k}\left(\frac{E_1}{\omega_1} + \frac{E_2}{\omega_2} + \ldots + \frac{E_k}{\omega_k}\right). \qquad (4.8)$$

Электродвижущая сила для каждого случая вычисляется по формуле

$$\Delta U_a = I_{ax} \cdot R_a + 2\Delta U_щ,$$

где R_a – сопротивление якоря, Ом;

$\Delta U_щ$ – потери напряжения в щеточном контакте.

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. Для определения зависимости $M_{мс}=f(\omega_м)$ по кривой выбега необходимо воспользоваться данными, полученными в предыдущей работе.
2. В соответствии с методикой, изложенной в разделе «Общие сведения», графическим путем получить зависимость $M_{мс}=f(\omega_м)$.
3. Оформить отчет по работе.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Графические зависимости $\omega_м=f(t)$ и $M_{мс}=f(\omega_м)$.
2. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Для решения каких задач используются механические характеристики рабочих машин $M_{мс}=f(\omega_м)$?
2. Перечислите способы получения механических характеристик рабочих машин.
3. Поясните методику получения механической характеристики по кривой выбега.
4. Поясните методику получения механической характеристики при помощи тарированной машины постоянного тока независимого возбуждения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАГРЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: исследовать параметры переходного процесса нагревания и охлаждения трехфазного асинхронного электродвигателя.

Общие сведения

В тепловом отношении электрическая машина – сложный объект: она неоднородна по материалу, имеет рассредоточенные внутренние источники теплоты, интенсивность нагрева которых зависит от режима работы. Направление тепловых потоков внутри машины также не остается постоянным. Чаще всего при холостом ходе тепло передается от более нагретой стали двигателя к менее нагретым его обмоткам, а при нагрузке обмотки по сравнению со сталью обычно бывают более нагретыми, чему отвечает обратное направление тепловых потоков. Все эти обстоятельства усложняют тепловые расчеты.

Таким образом, аналитическое определение превышения температуры обмоток и других частей электродвигателя над температурой окружающей среды в зависимости от времени представляет большие трудности. Поэтому для упрощения анализа принимают следующие допущения:

– отдельные части электрических машин однородны с бесконечно большой теплопроводностью, благодаря чему температура всех его точек одновременно достигает одинакового значения температуры;

– теплоту, отдаваемую излучением, ввиду малости не учитывают;

– нагрузка на валу электродвигателя, потери мощности и температура окружающей среды в момент рассмотрения неизменны;

– теплоотдача электродвигателя пропорциональна первой степени превышения температуры электродвигателя над температурой окружающей среды.

В электродвигателе в виде теплоты выделяется энергия $\Delta P dt$, одна часть которой $c d\tau$ будет затрачена на нагрев самого двигателя, а другая $A\tau dt$ будет отдана в окружающую среду. Таким образом, на основании закона сохранения энергии справедливо равенство

$$\Delta P dt = A\tau dt + c d\tau , \qquad (5.1)$$

где ΔP – потери мощности в электродвигателе, Вт;

A – теплоотдача двигателя, количество теплоты, выделяемое двигателем в окружающую среду в единицу времени при разности температур, равной 1 °С, Дж/(с·°С);

c – теплоемкость двигателя (количество тепла, необходимое для повышения температуры двигателя на 1 °С), Дж/°С;

τ – превышение температуры двигателя по сравнению с температурой окружающей среды, °С.

Разделим переменные:

$$(\Delta P - A\tau)dt = cd\tau, \tag{5.2}$$

отсюда

$$dt = \frac{cd\tau}{\Delta P - A\tau}. \tag{5.3}$$

После интегрирования получим:

$$t = -\frac{c}{A}\ln(\Delta P - A\tau) + K. \tag{5.4}$$

Постоянную интегрирования K получим из условия, что при t=0, $\tau=\tau_0$:

$$K = \frac{c}{A}\ln(\Delta P - A\tau_0). \tag{5.5}$$

Подставим полученное значение K в уравнение (5.4):

$$t = -\frac{c}{A}\ln(\Delta P - A\tau) + \frac{c}{A}\ln(\Delta P - A\tau_0) = -\frac{c}{A}\ln\frac{\Delta P - A\tau}{\Delta P - A\tau_0}. \tag{5.6}$$

Решим уравнение относительно τ:

$$-\frac{A}{c}t = \ln\frac{\Delta P - A\tau}{\Delta P - A\tau_0}. \tag{5.7}$$

Потенцируя левую и правую часть, получим:

$$e^{-\frac{A}{c}t} = \frac{\Delta P - A\tau}{\Delta P - A\tau_0}, \tag{5.8}$$

отсюда

$$(\Delta P - A\tau_0)e^{-\frac{A}{c}t} - \Delta P = -A\tau;$$

$$\tau = -\frac{\Delta P}{A}e^{-\frac{A}{c}t} + \frac{A\tau_0}{A}e^{-\frac{A}{c}t} + \frac{\Delta P}{A};$$

$$\tau = \frac{\Delta P}{A}\left(1 - e^{-\frac{A}{c}t}\right) + \tau_0 e^{-\frac{A}{c}t}. \tag{5.9}$$

Установившееся превышение температуры $\tau_у$ равно:

$$\tau_у = \frac{\Delta P}{A}. \tag{5.10}$$

Постоянная времени нагревания:

$$T_н = \frac{c}{A_н}. \tag{5.11}$$

Окончательно получим:

$$\tau = \tau_у\left(1 - e^{-\frac{t}{T_н}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T_н}}. \tag{5.12}$$

В номинальном режиме работы электродвигателя потери мощности $\Delta P_Н$ (кВт) равны:

$$\Delta P_н = \frac{P_н}{\eta_н} - P_н = P_н\frac{1-\eta_н}{\eta_н}, \tag{5.13}$$

где $P_н$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт;

$\eta_н$ – номинальный КПД электродвигателя, о.е.

Теплоотдача электродвигателя при нагрузке $P_н$:

$$A = \frac{\Delta P_Н}{\tau_н}, \qquad (5.14)$$

где $\tau_н$ – нормированное превышение температуры, зависящее от нагревостойкости изоляции электродвигателя, °С.

Величина $T_н$ характеризует скорость нагревания двигателя. Постоянную нагревания можно представить как время, в течение которого двигатель достиг бы установившегося значения температуры, если бы отдача теплоты в окружающую среду отсутствовала.

Постоянную времени нагревания $T_н$ электродвигателя можно определить тремя методами: по методу касательных, графическим методом, методом трех точек.

Метод касательных заключается в том, что к кривой нагревания проводится касательная до пересечения с асимптотой, соответствующей установившемуся значению $\tau_у$. Значение постоянной нагревания $T_н$ определяется по отрезку |АВ|, заключенному между точкой пересечения касательной с асимптотой и точкой пересечения перпендикуляра к асимптоте через точку касания с асимптотой (рисунок 5.1).

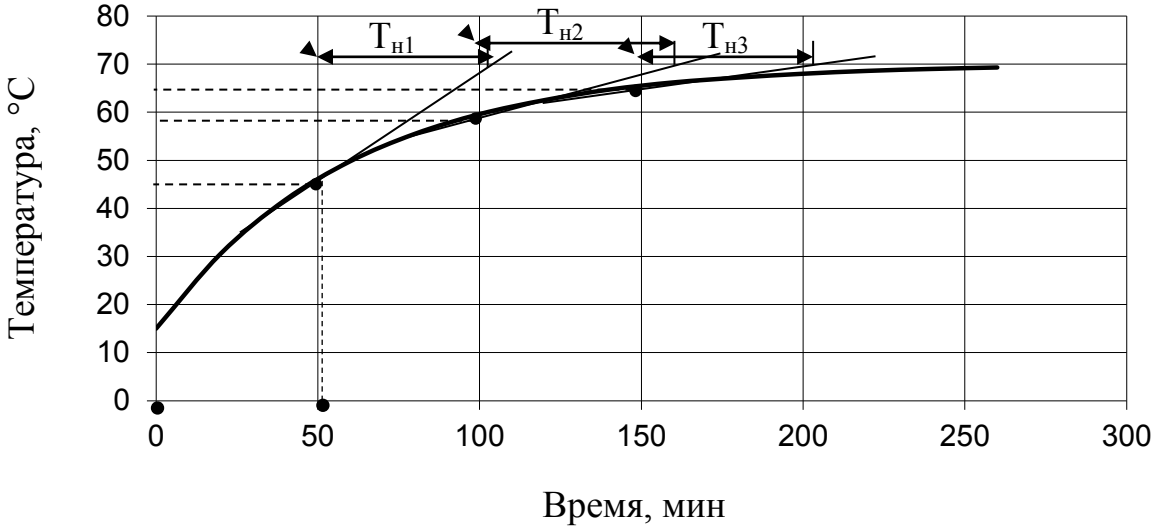


Рисунок 5.1 – Кривая нагревания электродвигателя

В реальных условиях, как и показывают многочисленные эксперименты, кривая нагревания электродвигателя отличается от теоретической, выведенной с рядом допущений. В начале процесса нагрева действительное превышение температуры электродвигателя несколько больше, чем это предусматривается теоретической кривой. Лишь при превышениях температуры $\tau=0{,}5\tau_у$ реальная кривая приближается к теоретической экспоненциальной.

Соответственно и постоянная времени реального процесса нагрева электродвигателя непостоянна. Она имеет наименьшее значение в начале

процесса и наибольшее в конце. Поэтому для получения большой точности расчета $T_н$ рекомендуется брать три точки на кривой нагревания: одну – в начале координат, другую – при температуре примерно $0{,}5\tau_у$ и третью при температуре примерно $0{,}7\tau_у$.

$$T_н = / AB / \mu_t, \tag{5.15}$$

где μ_t – масштаб времени.

Постоянная времени нагревания, определенная этим методом, равна среднеарифметическому значению по результатам трех вычислений:

$$T_н = \frac{T_{н1} + T_{н2} + T_{н3}}{3}. \tag{5.16}$$

В соответствии с графическим методом в уравнении (5.12) принимая $t=T_н$, получим $\tau=0{,}632\tau_у$. Постоянную времени нагревания указанным методом определяем по кривой нагревания, по которой определяется время, за которое двигатель достигнет превышения температуры, равное $0{,}632\tau_у$.

По методу трех точек на кривой нагревания берутся через равное приращение времени три точки: τ_1, τ_2, τ_3. Постоянная времени нагревания определяется по формуле

$$T_н = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_4}}, \tag{5.17}$$

где τ_1, τ_2, τ_3 – значения превышений температуры, полученные через равные промежутки времени;

Δt – промежуток времени.

Рассмотренные способы определения постоянной времени нагревания $T_н$ пригодны и для определения постоянной времени охлаждения $T_о$.

Примечание:

– при использовании метода касательных необходимо помнить, что при охлаждении $\tau_{уст}=0$;

– при использовании метода трех температур

$$\tau_2 = \tau_1 e^{-\Delta t / T_о} \qquad \Rightarrow \tag{5.18}$$

$$T_о = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_1}{\tau_2}}. \tag{5.19}$$

Постоянные времени нагревания и охлаждения могут быть рассчитаны с учетом параметров двигателя по соотношению

$$T_н = 6 \cdot \frac{m \cdot \tau_н \cdot \eta_н}{P_н \cdot (1 - \eta_н)}, \tag{5.20}$$

где m – масса выбранного электродвигателя, кг;

$\eta_н$ – номинальный КПД электродвигателя;

$P_н$ – номинальная мощность электродвигателя, Вт;

$\tau_н$ – номинальное превышение температуры обмотки статора электродви-

гателя над температурой окружающей среды.

Для типовых тепловых расчетов температуру окружающей среды принимают равной 40 °С.

Номинальное превышение температуры обмотки статора определяется классом нагревостойкости изоляции электродвигателя. Электродвигатели серии 4А, 4АМ с высотой оси вращения 50–132 мм имеют класс изоляции В, с высотой оси вращения 160–355 мм – F. Электродвигатели серий RA, 5АН, 6А выпускаются с классом изоляции F.

Для двигателей с независимой вентиляцией $T_н=T_о$, так как не изменяется величина теплоотдачи А. Но большинство двигателей является самовентилируемыми, поэтому обычно:

$$T_0 = \frac{T_H}{\beta_0}, \tag{5.21}$$

$$\beta_0 = \frac{A_0}{A_H}, \tag{5.22}$$

где β_0 – коэффициент, учитывающий ухудшение охлаждения после отключения двигателя.

Значение коэффициента β_0 в зависимости от исполнения двигателей принимается в диапазоне:

– β_0=0,45–0,55 – для электродвигателей закрытого исполнения с наружным охлаждением от собственного вентилятора;

– β_0=0,25–0,35 – для электродвигателей защищенного исполнения с самовентиляцией.

Для двигателей серии АИ и 5А значение β_0 приведено в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Значение коэффициентов β_0 для двигателей серии 5А

Высота оси вращения, мм	Коэффициент β_0			
	2p=2	2p=4	2p=6	2p=8
80	0,55	0,60	0,55	0,60
112	0,35	0,40	0,50	0,50
132	0,35	0,35	0,40	0,40
160–180	0,30	0,35	0,35	0,35
200–250	0,30	0,30	0,30	0,30
280–315	0,30	0,30	0,30	0,30

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. Изучить способы определения постоянных времени нагревания и охлаждения.

2. Ознакомиться с оборудованием рабочего места. Записать паспортные данные исследуемого двигателя.

3. Собрать схему, изображенную на рисунке 5.2.

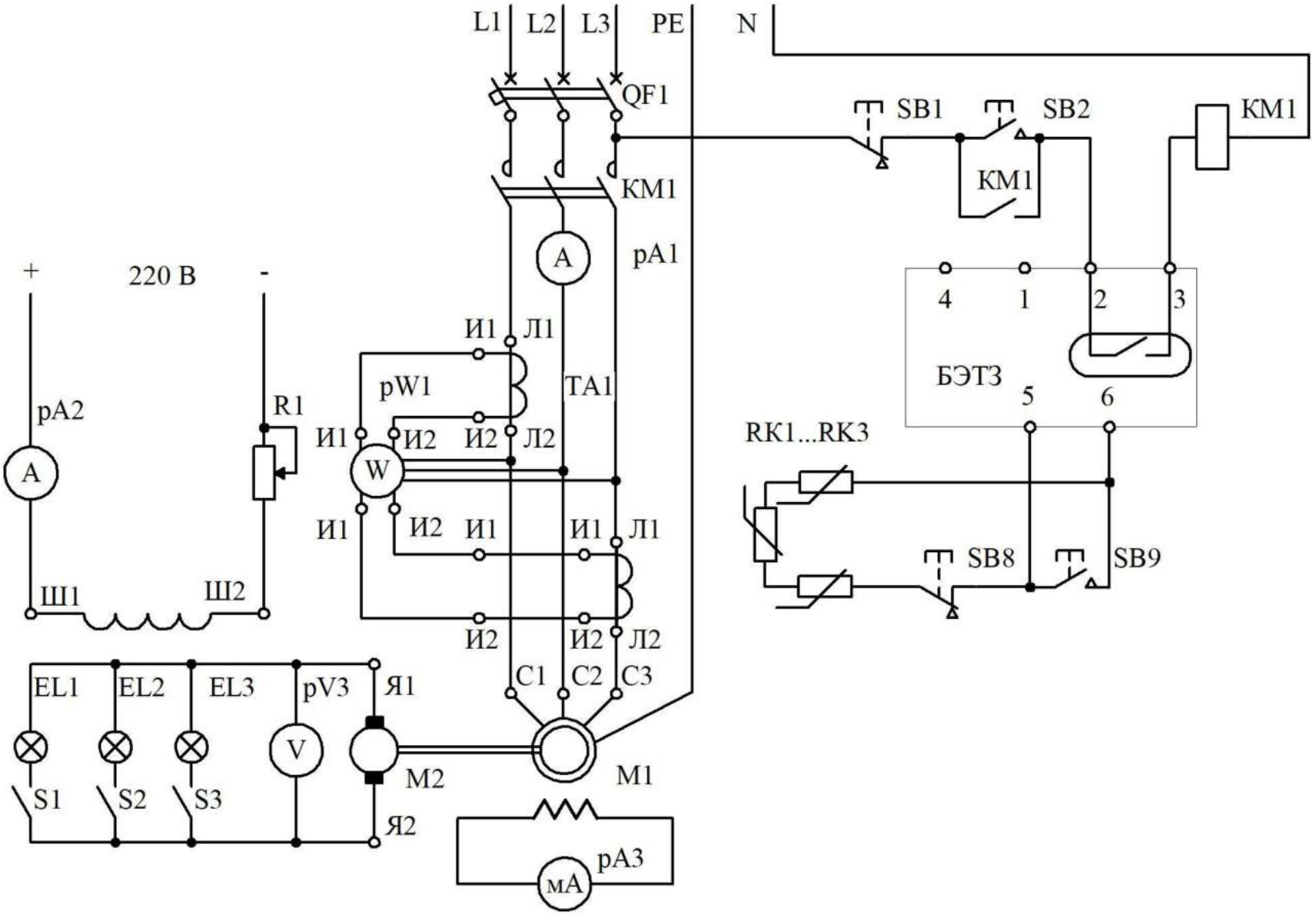


Рисунок 5.2 – Схема электрическая принципиальная для снятия кривой нагрева электродвигателя

4. Запустить электродвигатель, установить номинальную нагрузку на валу и снять зависимость $\tau_{нагр}=f(t)$. Замеры температуры производить через 1 мин в течение 30 мин. Результаты замеров занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты эксперимента

t,мин	0	1	2	3	4	5	6	…	26	27	28	29	30
τ,°C													

5. Отключить электродвигатель от сети и снять зависимость $\tau_{охл}=f(t)$. В течение первых десяти минут замеры производить через 1 мин, в течение следующих 30 мин – через 5. Результаты замеров занести в таблицу, аналогичную таблице 5.2.

6. По полученным данным построить кривые нагревания и охлаждения. Для определения постоянной времени нагревания необходимо предварительно определить значение установившейся температуры при данной нагрузке. Для этого находят приращения температуры $_{\Delta}\tau_1, _{\Delta}\tau_2, _{\Delta}\tau_3, _{\Delta}\tau_4$ за равные промежутки времени Δt (см. рисунок 5.1) и откладывают полученные значения влево от оси ординат. Через полученные точки *a, в, c, d* проводят прямую до пересечения с осью ординат в точке *e*. Отрезок *oe* в выбранном масштабе соответствует установившемуся превышению температуры $\tau_у$. Горизонтальная прямая, проведенная через точку *e*, является асимптотой для кривой нагревания.

7. Определить постоянные нагревания и охлаждения.

8. Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Электрическая схема, изображенная на рисунке 5.2.
2. Таблицы с результатами экспериментов.
3. Графические зависимости $\tau_{нагр}=f(t)$ и $\tau_{охл}=f(t)$.
4. Результаты расчетов $T_н$ и $T_о$.
5. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. От каких параметров зависит постоянная времени нагревания?
2. Каков физический смысл постоянной времени нагревания?
3. Пояснить способы определения постоянных времени нагревания и охлаждения электродвигателя.
4. От каких параметров зависит установившееся превышение температуры?
5. Почему для самовентилируемых двигателей постоянная времени нагревания и охлаждения не равны между собой?
6. В каком случае начальное превышение температуры двигателя не равно нулю?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ

Цель работы: ознакомление с конструкцией, принципом работы защитных аппаратов, приобретение практических навыков выбора аппаратов защиты и исследования их характеристик.

Общие сведения

Анализ работы асинхронных двигателей показывает, что в производственных условиях возникают разнообразные аварийные ситуации. К основным аварийным ситуациям относятся:

- перегрузка;
- короткое замыкание (режим заклинивания вала);
- несимметрия напряжения (частный случай несимметрии – неполнофазный режим);
- работа при пониженном напряжении;
- затяжной пуск;
- ухудшение охлаждения;
- увлажнение изоляции.



Рисунок 6.1 – Основные функциональные связи при аварийных режимах работы электродвигателей

Большинство из указанных аварийных режимов сопровождаются повышением тока во всех или двух фазах, что негативно сказывается на состоянии изоляции, происходит её тепловое старение. Согласно известному правилу Монзингера превышение температуры обмотки статора над номинальным значением на каждые 10 °С, 13 °С соответственно для классов изоляции B и F сокращает срок службы изоляции в два раза.

С точки зрения влияния длительных превышений тока на изоляцию следует различать сравнительно небольшие до 50% и большие более 50%. При больших перегрузках изоляция быстро разрушается под действием высокой температуры.

Для защиты электродвигателей от этих аварийных режимов используются различные аппараты защиты. К наиболее распространенным защитным аппаратам относятся автоматические выключатели, плавкие предохранители, тепловые реле.

Аппараты защиты выбирают по следующим основным параметрам:

– номинальному напряжению;

– номинальному току;

– по времени срабатывания при возникновении токов однофазного короткого замыкания;

– предельной коммутационной способности;

– селективности.

При этом должны выполняться условия:

$$U_{н.ап} \geq U_{н}; \tag{6.1}$$

$$I_{н.ап} \geq I_{расч}; \tag{6.2}$$

$$I_{откл.ап} > I_{к}^{(з)}, \tag{6.3}$$

где $U_{н\ ап}$, $U_{н}$ – соответственно, номинальные напряжения аппарата и сети, В;

$I_{н\ ап}$, $I_{расч}$ – соответственно номинальный ток аппарата и расчётный ток потребителей, А;

$I_{откл\ ап}$ – максимальное значение тока короткого замыкания, которое аппарат способен отключить несколько раз, оставаясь в исправном состоянии (это значение тока короткого замыкания называют предельной коммутационной способностью выключателя, ПКС), А;

$I_{к}^{(3)}$ – максимально возможное значение трёхфазного тока короткого замыкания в месте установки аппарата, А.

Величина расчетного тока одиночного потребителя определяется с учетом коэффициента загрузки. При $k_з<1$ расчетный ток для одиночного потребителя:

$$I_{расч} = I_{н}, \tag{6.4}$$

где $I_{н}$ – номинальный ток потребителя, А.

Расчетный ток для группы потребителей определяют исходя из условий одновременной их работы в технологическом цикле:

$$I_{расч} = \sum_{i=1}^{n} I_{н_i}, \tag{6.5}$$

где $\sum_{i=1}^{n} I_{н_i}$ – максимальная сумма номинальных токов одновременно работающих n электродвигателей, А.

Номинальный ток двигателя определяется по соотношению

$$I_н = \frac{P_н}{\sqrt{3} \cdot U_л \cdot \cos\varphi_н \cdot \eta_н}, \quad (6.6)$$

где $\eta_н$, $\cos\varphi_н$ – соответственно КПД и коэффициент мощности двигателя при номинальной нагрузке.

При $k_з>1$ расчетный ток для одиночного потребителя равен его рабочему току

$$I_{раб} = \frac{P_н \cdot k_з}{\sqrt{3} \cdot U_л \cdot \cos\varphi_з \cdot \eta_з}, \quad (6.7)$$

где $\eta_з$, $\cos\varphi_з$ – соответственно КПД и коэффициент мощности двигателя при загрузке $k_з$.

Выбор автоматических выключателей производится по следующим условиям:

$$U_{на} \geq U_{н,} \quad (6.8)$$

$$I_{на} \geq I_{расч}, \quad (6.9)$$

$$I_{н\,расц} \geq I_{расч}, \quad (6.10)$$

$$I_{со} \geq k_н I_{max}, \quad (6.11)$$

где $U_{на}$, $U_н$ – соответственно номинальное напряжение автоматического выключателя и сети, В;

$I_{на}$ – номинальный ток автоматического выключателя, А;

$I_{н\,расц}$ – номинальный ток расцепителя, А;

$I_{со}$ – ток срабатывания электромагнитного расцепителя, А;

I_{max} – максимальный ток в линии, А;

$k_н$ – коэффициент надежности.

Для одного электродвигателя

$$I_{max} = I_n. \quad (6.12)$$

Для группы электродвигателей при определении максимального тока учитываются условия их запуска, то есть одновременность и очередность. Если двигатели запускаются одновременно, то

$$I_{max} = \sum_{i=1}^{m} I_{п_i}, \quad (6.13)$$

в общем случае

$$I_{max} = I_{n_{нб}} + \sum_{i=1}^{m} I_{н_i}, \quad (6.14)$$

где $I_{п\ нб}$ – пусковой ток электродвигателя наибольшей мощности в группе электродвигателей, А;

Предохранители выбираются по следующим условиям:

$$U_{н\,пр} \geq U_н, \quad (6.15)$$

$$I_{н\,пр} \geq I_{расч}, \tag{6.16}$$

$$I_{в} \geq \frac{I_{пуск}}{\alpha}, \tag{6.17}$$

где $U_{н\,пр}$– номинальное напряжение предохранителя, В;

$I_{н\,пр}$ – номинальный ток предохранителя, А;

α – коэффициент, зависящий от условий пуска.

При времени пуска 2–5 с (пуск легкий) и α=2,5, для тяжелых условий пуска (около 10 с) α=1,6–2.

Соотношение (6.17) соответствует прямому пуску двигателя. В том случае, если запуск двигателя производится с переключением при пуске со Y на Δ, либо применяется шунтирование предохранителей при пуске, либо используется двигатель с фазным ротором и для ограничения пускового тока в цепь ротора вводится добавочное сопротивление, ток плавкой вставки определяется по величине тока двигателя, соответствующей пусковым условиям.

При выборе теплового реле должно соблюдаться условие

$$I_{н\,т\,расц} \geq I_{расч}, \tag{6.18}$$

где $U_{нп}$ – номинальное напряжение, на которое рассчитан пускатель, А;

$I_{нп}$ – номинальный ток силовых контактов пускателя, А;

$I_{н\,т\,расц}$ – номинальный ток теплового расцепителя теплового реле, А.

Описанные выше средства защиты не обеспечивают всестороннюю защиту электродвигателей от основных аварийных режимов в сельском хозяйстве, поэтому часто рекомендуется применение специальных видов защит.

К таким видам защит могут быть отнесены температурные и фазочувствительные устройства защиты.

Встроенная температурная защита (УВТЗ) предназначена для отключения электродвигателей при любых аварийных режимах: длительной перегрузке, обрыве фазы, заклинивании ротора двигателя или механизма, повышении температуры окружающей среды, нарушении охлаждения, если температура обмотки статора достигает опасного значения.

При применении УВТЗ в лобовую часть статорной обмотки двигателя встраивают три терморезистора с положительным ТКС (позисторы) типа СТ1-17 (в каждую фазу по одному), соединяют их последовательно и подключают к устройству управления. При заданной температуре их сопротивление возрастает скачкообразно, что служит сигналом для устройства управления, которое отключает двигатель.

Несмотря на очевидные достоинства, температурные защиты обладают тем недостатком, что они не обеспечивают достаточной быстроты срабатывания при некоторых аварийных режимах (заклинивание вала, несимметричные режимы). Этого недостатка лишены УВТЗ-5 и УВТЗ-5М, которые являются комбинацией температурной и фильтровой защиты.

Фазочувствительная защита. В основе принципа работы фазочувствительной защиты лежит измерение угла сдвига фаз между токами нагрузки электродвигателя. Для измерения этого угла из трехфазных токов нагрузки

электродвигателя формируется два измеряемых напряжения при помощи фазовращательных трансформаторов.

Устройство ФУЗ-М надежно защищает электродвигатель от обрыва фазы, заклинивания ротора и перегрузок, однако не реагирует на некоторые косвенные аварийные режимы – это недостаточный теплообмен двигателя с окружающей средой, частые реверсы и пуски, снижение сопротивления изоляции.

В универсальном фазочувствительном устройстве защиты ФУЗ-У благодаря объединению фазового, токового и температурного принципов выявления аварийных режимов вышеуказанные недостатки частично устраняются, так как устройство ФУЗ-У снабжается позистором, устанавливаемым на корпусе.

Таким образом, защитные устройства, применяемые для защиты электродвигателя, способны защищать его только от определенных видов аварийных режимов:

- тепловые реле от длительной токовой перегрузки;
- автоматические выключатели с тепловыми расцепителями от токовых перегрузок, а с комбинированными расцепителями и от коротких замыканий, заклиниваний ротора двигателя;
- предохранители от коротких замыканий;
- температурные защиты хорошо работают при длительных токовых перегрузках, ухудшении охлаждения, они защищают двигатель также при асимметрии напряжения и обрыве фазы;
- токовые защиты отключают двигатель при несимметрии напряжения, токовой перегрузке, обрыве фазы, заклинивании ротора;
- комбинированные защиты позволяют защитить двигатель практически от всех аварийных режимов.

При выборе того или иного вида защиты необходимо принимать во внимание не только его возможности, но и экономическую сторону вопроса.

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. Изучить назначение, устройство и принцип действия аппаратов защиты.

2. Ознакомиться с оборудованием рабочего места. Собрать схему для исследования защитных характеристик плавких вставок, изображенную на рисунке 6.2.

3. Исследовать зависимость времени срабатывания плавкой вставки от тока $t = f(I / I_{в.})$. Испытания провести при 1,5-, 2-, 2,5-, 3-, 3,5-, 4-кратном превышении значении номинального тока. Приближенно для данного диаметра номинальный ток плавкой вставки можно определить по формуле

$$I_{н\ пл.вст} = m\sqrt{d^3}, \qquad (6.19)$$

где d – диметр проводника, мм;

m – коэффициент, зависящий от материала проводника (таблица 6.1).

Секундомер устанавливают в нулевое положение. Для проведения испытаний плавкая вставка подключается к клеммам 1 и 2. Нажимают на кноп-

ку SB1 и в положении, когда замыкающие контакты кнопки шунтируют плавкую вставку, устанавливают необходимое значение тока.

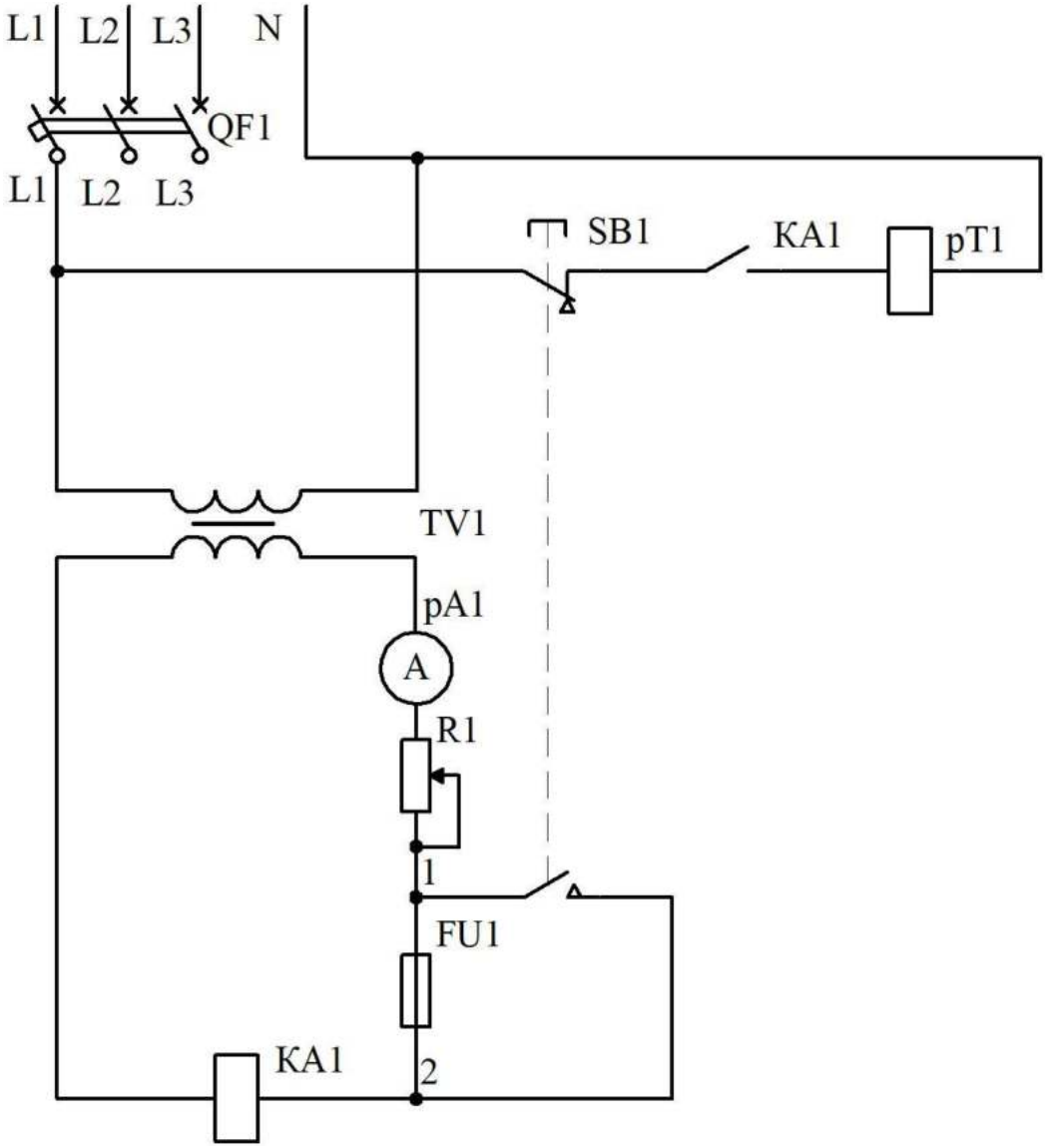


Рисунок 6.1 – Схема исследования защитных характеристик плавких вставок

Таблица 6.1 – Значение коэффициента m в зависимости от материала вставки

Материал	Коэффициент m
Алюминий	59,2
Железо	24,6
Медь	80
Никелин	40,8
Олово	12,8

При возврате кнопки в исходное состояние подключается секундомер pT1. После сгорания проволоки секундомер автоматически выключается. Кнопкой SB1 выключают магнитный пускатель. Значение тока и показания секундомера заносятся в таблицу 6.2. Затем проводятся опыты для других значений тока.

Таблица 6.2 – Время-токовая характеристика плавкой вставки

$I/I_{н.э.}$	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Ток, А						
Время, с						

4. По полученным данным построить время-токовую характеристику плавкой вставки.

5. Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Электрическая схема, изображенная на рисунке 6.2.
2. Таблица с результатами эксперимента.
3. Время-токовая характеристика плавкой вставки $I_в=f(t)$.
4. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные виды аварийных режимов.
2. Какие аппараты применяются для защиты от коротких замыканий?
3. Какие аппараты применяются для защиты от токовых перегрузок?
4. Опишите устройство и принцип действия предохранителя, теплового реле, автомата.
5. Назовите условия выбора предохранителя, теплового реле, автомата.
6. Какие бывают расцепители автоматов, какие функции выполняют и как они работают?
7. Назначение время-токовых характеристик защитных аппаратов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

УПРАВЛЕНИЕ ПУСКОМ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: изучение схем управления пуском двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Общие сведения

Пуск двигателя постоянного тока прямым включением его на напряжение сети допустим только для двигателей малой мощности, у которых падение напряжения в якоре представляет относительно большую величину и пик тока в начале пуска в 4–6 раз превышает номинальное значение.

Прямой пуск двигателей постоянного тока средней и большой мощности совершенно недопустим. Сопротивление якоря таких машин обычно очень мало. Оно рассчитывается так, чтобы падение напряжения на якоре не превышало 2–10% от напряжения сети, на которое рассчитан двигатель. Ток в якорной цепи определяется сопротивлением якорной цепи R_a, напряжением сети U, ЭДС E индуцированной в обмотках якоря.

$$I = \frac{U - E}{R_a}, \tag{7.1}$$

где R_a – сопротивление якоря.

В свою очередь величина ЭДС может быть определена по соотношению

$$E = C_e \cdot \Phi \cdot \omega, \tag{7.2}$$

где C_e – конструктивная постоянная ЭДС;

Φ – магнитный поток машины, Вб;

ω – угловая скорость, рад/с.

Так как в начальный момент угловая скорость $\omega=0$, приложенное напряжение U будет уравновешиваться только падением напряжения IR_a, поэтому начальный пик тока будет достигать $(10–50)I_н$. Такое превышение начального пускового тока недопустимо, так как это ведет к перегреву обмоток, появлению слишком большого пускового момента, который оказывает на якорь и подвижную часть электропривода ударное воздействие, что может привести к механическому повреждению движущихся частей электропривода. Но основным фактором, ограничивающим пусковой ток двигателя постоянного тока, является нарушение коммутации, опасность появления на коллекторе «кругового огня», что создает пожаропасность и может привести к оплавлению коллектора. Поэтому пуск двигателей средних и больших мощностей производят при помощи пускового реостата, который ограничивает ток при пуске до допустимых по условиям коммутации и механической прочности значений.

Сопротивление пускового реостата подбирают таким, чтобы при пуске вручную или автоматически ток изменялся от максимального значения, равного $(1,8–2,5)I_н$ – в начале работы, до минимального значения $(1,1–1,5)I_н$ –

в конце работы и перед переключением на другое положение пускового реостата. Ток якоря после включения двигателя при сопротивлении реостата $R_д$ составляет:

$$I = \frac{U}{R_а + R_д}. \qquad (7.3)$$

Пуск двигателя постоянного тока производится при последовательном уменьшении сопротивления реостата, обычно – путем перевода рычага реостата с одного неподвижного контакта реостата на другой и выключения секций; уменьшение сопротивления может производиться и путем замыкания накоротко секций контакторами, срабатывающими по заданной программе.

В зависимости от материала, из которого изготавливаются реостаты, они делятся на жидкостные и металлические. Последние получили наибольшее распространение.

Промышленностью выпускаются пусковые и пускорегулирующие реостаты типа РП, РЗП и РЗР для двигателей постоянного тока со встроенным контактором, который используется для защиты от понижения напряжения, и максимальным токовым реле для защиты от перегрузок по току. Реостаты РП, РЗП и РЗР выпускаются на напряжения постоянного тока 110, 220 и 440 В, на максимальную мощность двигателей при 110 В – до 19 кВт, при 220 и 440 В – до 42 кВт.

Резисторы пускового реостата выполняются на фарфоровых каркасах или в виде рамочных элементов. Переключающее устройство выполняется в виде плоского контроллера с самоустанавливающимся мостиковым контактом. Контроллер, малогабаритный контактор и максимальное реле мгновенного действия устанавливаются на общей панели.

Пусковые реостаты состоят из следующих основных систем: системы дугогашения, системы запуска двигателя и системы защиты. Схема включения двигателя параллельного возбуждения с помощью реостата РП-2522 с максимальной и минимальной защитой показана на рисунке 7.1.

Запуск двигателя постоянного тока параллельного возбуждения происходит в следующем порядке. При установке щетки реостата на 4-й контакт катушка реле KV1 получает питание, реле срабатывает и замыкает свои контакты. При этом якорь двигателя подключается к сети через полностью введенные пусковые сопротивления. Одновременно получает питание обмотка возбуждения.

После срабатывания реле KV1 и полного выведения пусковых сопротивлений катушка KV1 будет получать питание через экономическое сопротивление R2, которое снижает ток катушки до величины, достаточной для удержания реле KV1 во включенном положении. Это повышает коэффициент возврата реле KV1 и позволяет сократить размеры катушки и всего реле.

Для отключения двигателя от сети необходимо перевести щетку реостата против часовой стрелки из положения «ход» в положение «стоп». При этом катушка реле KV1 отключит двигатель от сети. В этом случае экономическое сопротивление R2 предотвращает короткое замыкание цепи управления.

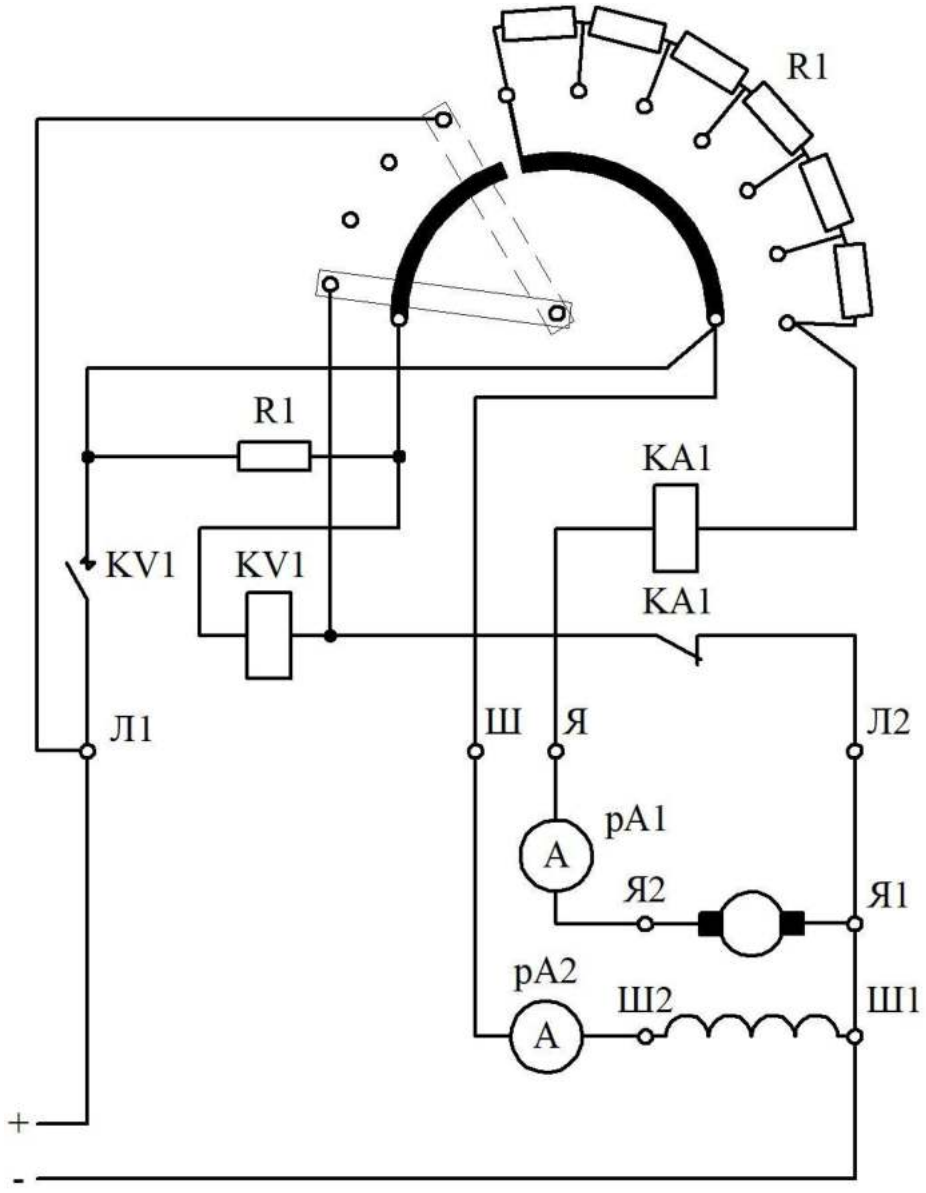


Рисунок 7.1 – Схема электрическая принципиальная пускового реостата РП-2522

При исчезновении напряжения или снижении его до 65% от номинального реле KV1 отключает двигатель от сети. Для повторного включения щетка реостата также переводится в положение «стоп» и затем в положение «ход».

Пусковой реостат снабжен следующими видами защит: нулевой, максимальной, максимально-нулевой, максимально-минимальной. Нулевую защиту в пусковых реостатах применяют для предотвращения включения двигателя на полное напряжение сети при выведенном пусковом сопротивлении в цепи якоря.

Минимальная защита по своему действию аналогична нулевой, но для нее устанавливают определенные пределы срабатывания. Например, срабатывание минимальной защиты должно происходить при снижении напряжения сети до 65–75% номинального. Заводская регулировка срабатывания минимальной защиты при выпуске составляет 50% номинального напряжения.

Максимальная токовая защита характеризуется тем, что при увеличении тока в силовой цепи сверх установленного значения эта цепь отключается под действием аппарата или комплекта аппаратов и не может самопроизвольно выключиться. Осуществляется максимальная защита двигателя токовым реле мгновенного действия. Это реле должно быть отстроено от пусковых токов:

$$I_{ср.р.м.} \geq 1{,}2 I_{м.п.}, \qquad (7.4)$$

где $I_{м.п.}$ – максимальный пусковой ток, А;

$I_{ср\ р.м.}$ – ток срабатывания реле максимального тока, А.

При пуске с полной нагрузкой

$$I_{м.п.} = (1{,}4 \ldots 2{,}5)\, I_н, \qquad (7.5)$$

где $I_н$ – номинальный ток электродвигателя, А;

Поэтому максимальное реле должно срабатывать при токах

$$I_{ср\ р.м.} = (1{,}7 \ldots 3) I_н. \qquad (7.6)$$

Для определения соотношений для расчета ступеней пускового реостата обратимся к рисункам 7.2 и 7.3.

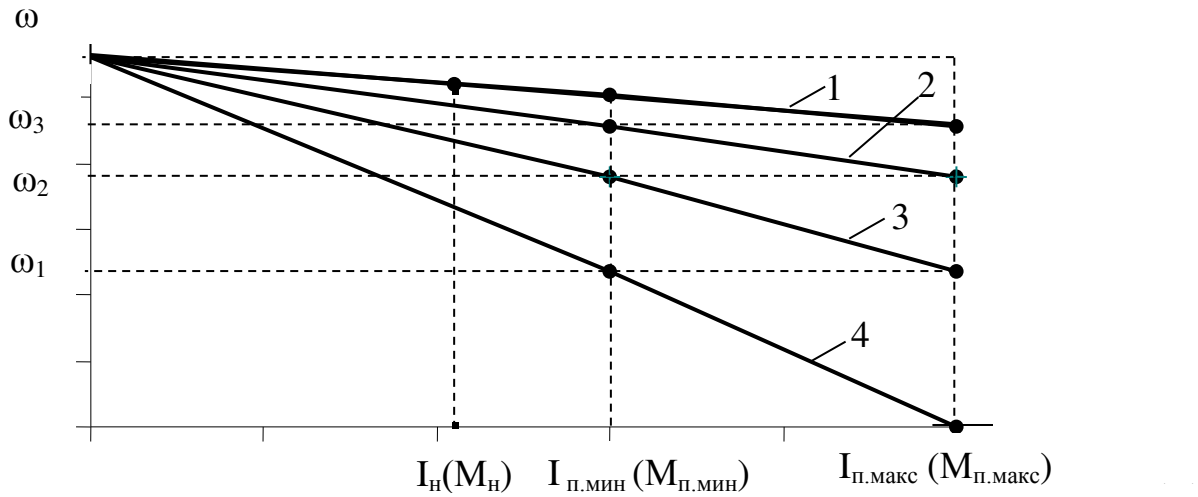


Рисунок 7.2 – Электромеханические (механические) характеристики ДПТ с параллельным возбуждением естественная (1) и реостатные (2–4)

Как видно из рисунка 7.2, для угловой скорости, равной ω_3, справедливы следующие соотношения:

$U = E_{ест} + I_{п макс} R_а$ – для естественной характеристики;

$U = E_1 + I_{п мин} R_1$ – для 1-ой реостатной характеристики.

$E_1 = E_{ест}$, так как $E_{ест} = C_e \Phi \omega_1;\ E_1 = C_e \Phi \omega_3 \Rightarrow$

$I_{п макс} R_а = I_{п мин} R_1;$

$$\frac{I_{п\ макс}}{I_{п мин}} = \frac{R_1}{R_а} = \lambda \Rightarrow$$

$$R_1 = R_а \cdot \lambda. \qquad (7.7)$$

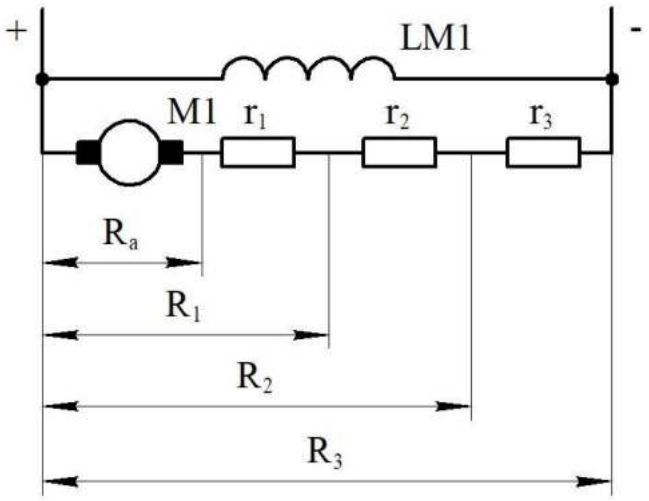


Рисунок 7.3 – Схема подключения ДПТ с параллельным возбуждением

Аналогично для ω_2:

$U = E_1 + I_{\text{п макс}} R_1$ – для 1-й реостатной характеристики;

$U = E_2 + I_{\text{п мин}} R_2$ – для 2-й реостатной характеристики.

Следовательно,

$$I_{\text{п макс}} R_1 = I_{\text{п мин}} R_2;$$

$$\frac{I_{\text{п макс}}}{I_{\text{п мин}}} = \frac{R_2}{R_1} = \lambda \Rightarrow$$

$$R_2 = R_1 \cdot \lambda = R_a \cdot \lambda^2. \qquad (7.8)$$

Очевидно, что для следующих характеристик будут справедливы соотношения:

$$R_3 = R_2 \cdot \lambda = R_a \cdot \lambda^3. \qquad (7.9)$$

Определим соотношения для определения сопротивления ступеней резисторов:

$$r_1 = R_1 - R_a = R_a \cdot \lambda - R_a = R_a \cdot (\lambda - 1); \qquad (7.10)$$

$$r_2 = R_2 - R_1 = R_a \cdot \lambda^2 - R_a \cdot \lambda = R_a \cdot \lambda \cdot (\lambda - 1); \qquad (7.11)$$

$$r_3 = R_3 - R_2 = R_a \cdot \lambda^2 \cdot (\lambda - 1). \qquad (7.12)$$

Если задан $I_{\text{п макс}}$, то сопротивление якорной цепи при полностью введенных всех Z ступенях пускового реостата будет равно:

$$R_Z = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{п макс}}} = R_a \cdot \lambda^Z, \qquad (7.13)$$

следовательно,

$$\lambda = \sqrt[Z]{\frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{п макс}} \cdot R_a}}, \qquad (7.14)$$

где Z – число ступеней пускового реостата.

Но так как $r_z = R_z - R_a$, то

$$r_z = R_a \cdot \lambda^{z-1} \cdot (\lambda - 1). \qquad (7.15)$$

При заданных условиях пуска можно определить число ступеней пускового реостата

$$Z = \frac{\ell g \dfrac{U_н}{I_{п\,макс} \cdot R_a}}{\ell g \lambda}. \qquad (7.16)$$

Условия пуска задаются в следующих пределах:

$$M_{п\,макс} = (1{,}8\ldots2{,}5)M_н; I_{п\,макс} = (1{,}8\ldots2{,}5)I_н;$$
$$M_{п\,мин} = (0{,}5\ldots1{,}5)M_н; I_{п\,мин} = (0{,}5\ldots1{,}5)I_н \ ,$$

где $M_{п\ мин}$, $M_{п\ макс}$ – соответственно минимальный и максимальный пусковые моменты двигателя;

$I_{п\ мин}$, $I_{п\ макс}$ – соответственно минимальный и максимальный пусковые токи двигателя.

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. Изучить конструкцию и назначение пусковых реостатов.
2. Ознакомиться со схемой пускового реостата. Собрать схему (рисунок 7.1) для запуска двигателя постоянного тока с пусковым реостатом.
3. Произвести запуск двигателя при помощи пускового реостата. Величину тока в якорной цепи при запуске необходимо контролировать по амперметру рА1. Скорость перемещения скользящего контакта по клеммам реостата выбирается такой, чтобы пусковой ток колебался в небольших пределах. Необходимо учесть, что длительная работа на промежуточной ступени реостата недопустима, так как в пусковых реостатах сопротивления ступеней реостата не рассчитаны на длительный режим.
4. По заданным условиям произвести расчет ступеней пускового реостата.
5. Оформить отчет о работе.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Электрическая схема, изображенная на рисунке 7.1.
2. Результаты расчетов ступеней пускового реостата.
3. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Поясните, почему не допускается прямой пуск двигателей постоянного тока.
2. В каких пределах поддерживается величина пускового тока?
3. Назначение, устройство и принцип действия пусковых реостатов.
4. Какие виды защит имеют реостаты и как они осуществляются?
5. Назначение экономического сопротивления в пусковом реостате.
6. На какой клемме происходит запуск пускового реостата? Почему?
7. На какой клемме происходит отключение пускового реостата? Почему?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПУСКОМ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: ознакомление с принципами построения схем автоматизированного управления пуском двигателя постоянного тока.

Общие сведения

Как уже отмечалось, прямой пуск двигателей постоянного тока недопустим ввиду больших значений пусковых, превышающих номинальные значения в десятки раз.

Процесс запуска двигателя постоянного тока может быть автоматизирован. Для выявления возможности автоматизации процесса пуска двигателя постоянного тока параллельного возбуждения рассмотрим электромеханические (механические) характеристики двигателя постоянного тока (см. рисунок 7.2) и пусковую диаграмму (рисунок 8.1).

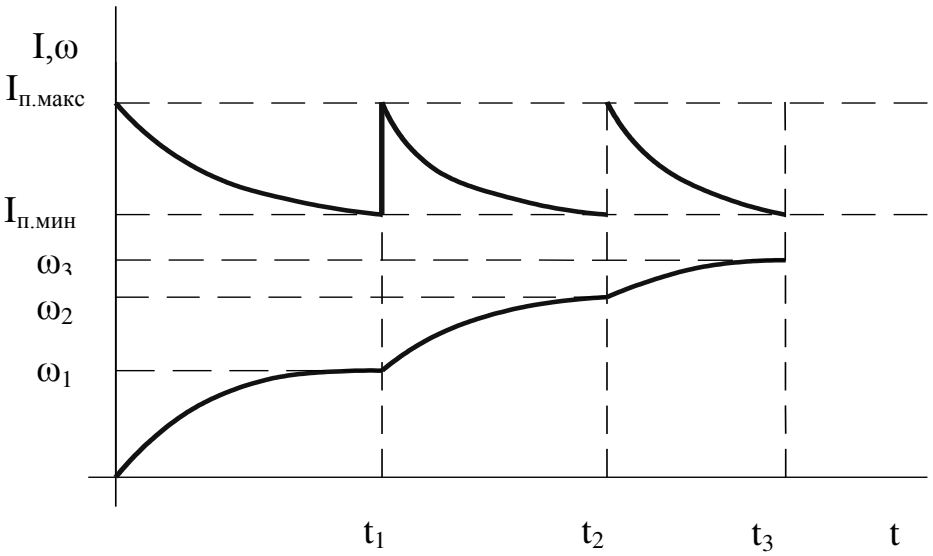


Рисунок 8.1 – Пусковая диаграмма двигателя с тремя ступенями

В процессе пуска за время, равное t_1, ток якоря изменяется от значения $I_{п.макс}$ до $I_{п.мин}$, при достижении которого происходит отключение ступеней пускового реостата. Также происходит изменение угловой скорости. Так, в момент пуска угловая скорость равна 0, а в момент отключения сопротивления r_3 она достигает значения ω_1. Кроме того, выражение (7.2) устанавливает прямо пропорциональную зависимость между ЭДС якоря Е и угловой скоростью. Таким образом, запуск двигателя постоянного тока можно осуществить в функции тока, угловой скорости и времени.

Управление в функции тока предусматривает изменение тока в якорной цепи двигателя в установленных пределах. Пределы регулирования тока устанавливаются токовым реле КА1 (рисунок 8.2). Схемой предусмотрен пуск двигателя в три ступени.

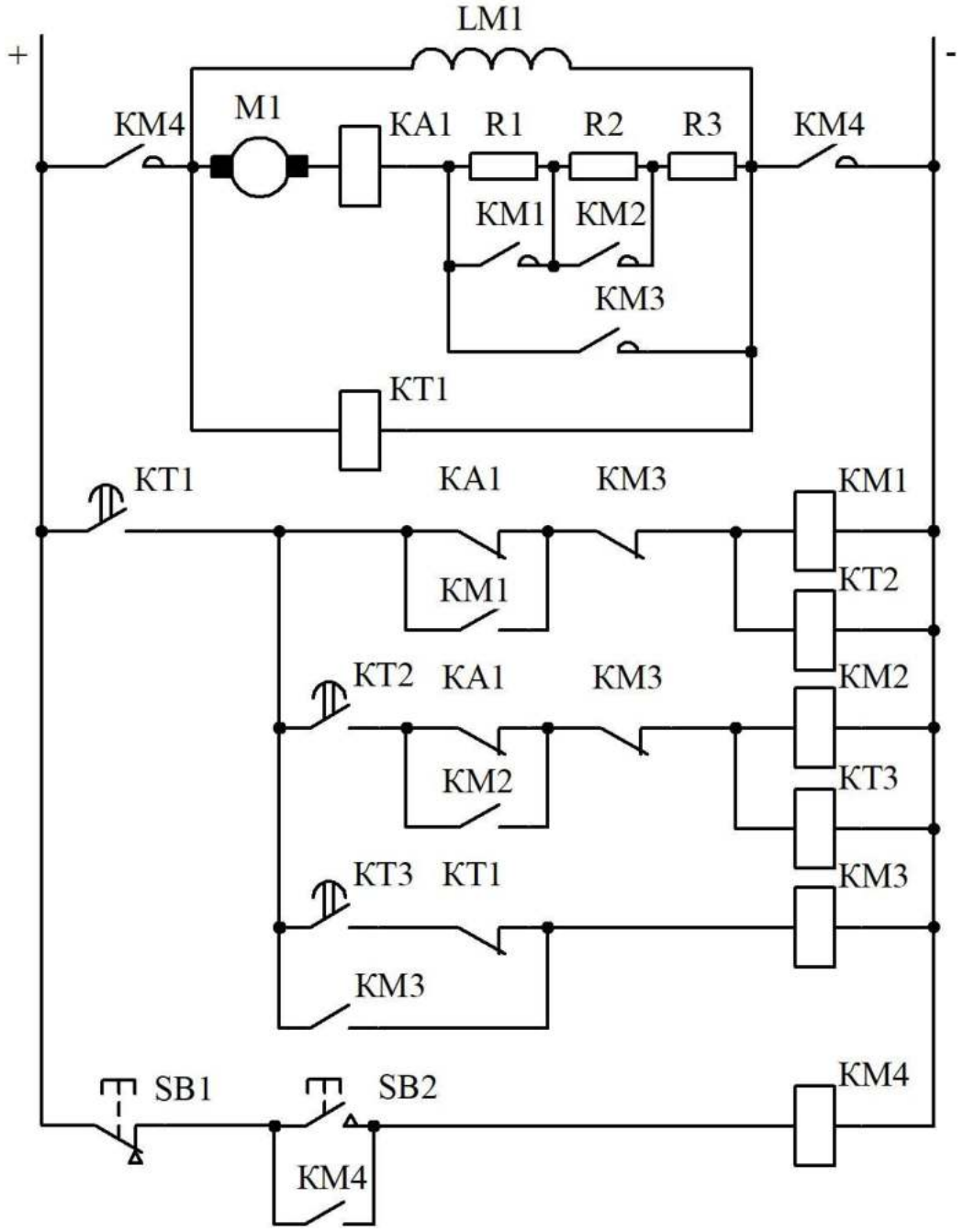


Рисунок 8.2 – Схема управления пуском ДПТ независимого возбуждения в функции тока

Запуск производится в следующем порядке. При нажатии кнопки SB2 получает питание катушка пускателя КМ4. Замыкающий контакт КМ4 шунтирует кнопку SB2, а силовые контакты подают питание в якорную цепь двигателя и на обмотку возбуждения. Пусковые сопротивления полностью введены. Одновременно подается питание на катушку реле тока КА1 и катушку реле времени КТ1. Так как в этот момент происходит резкое увеличение тока в якорной цепи двигателя до значения $I_{п.макс}$ (рисунок 8.1), реле КА1 размыкает свои контакты в цепи питания катушек магнитных пускателей КМ1, КМ2 и КМ3. Через 1–2 секунды после срабатывания КА1 замыкается контакт реле времени КТ1. При снижении тока до величины $I_{п.мин}$ (рисунок 8.2) реле

КА1 замыкает свои контакты в цепи питания пускателей КМ1, КМ2, КМ3, но получает питание только катушка пускателя КМ1, так как контакты реле времени КТ2 и КТ3 разомкнуты. Магнитный пускатель КМ1 замыкает свой контакт в якорной цепи двигателя, при этом из нее исключается пусковое сопротивление R1. Одновременно получает питание катушка реле времени КТ2. При закорачивании сопротивления R1 в якорной цепи ток опять возрастает до величины $I_{п.макс}$ и токовое реле КА1 размыкает свои контакты, однако, катушка пускателя КМ1 остается под напряжением, так как в ее цепи контакт КА1 зашунтирован блокирующим контактом КМ1. Через выдержку времени реле времени КТ2 замыкает свой контакт, и при снижении тока до величины $I_{п.мин}$ контакт реле КА1 замыкается и получают питание катушки магнитного пускателя КМ2 и реле времени КТ3. Шунтируется вторая ступень пусковых сопротивлений R2. Аналогично срабатывает система шунтирования третьей ступени.

Схема управления в функции скорости представлена на рисунке 8.3. Исходя из пусковой диаграммы, шунтирование первой ступени должно происходить при угловой скорости ω_1, второй ω_2, а третьей при угловой скорости ω_3 (см. рисунок 8.1). Этим значениям угловой скорости соответствуют величины ЭДС E_1, E_2 и E_3.

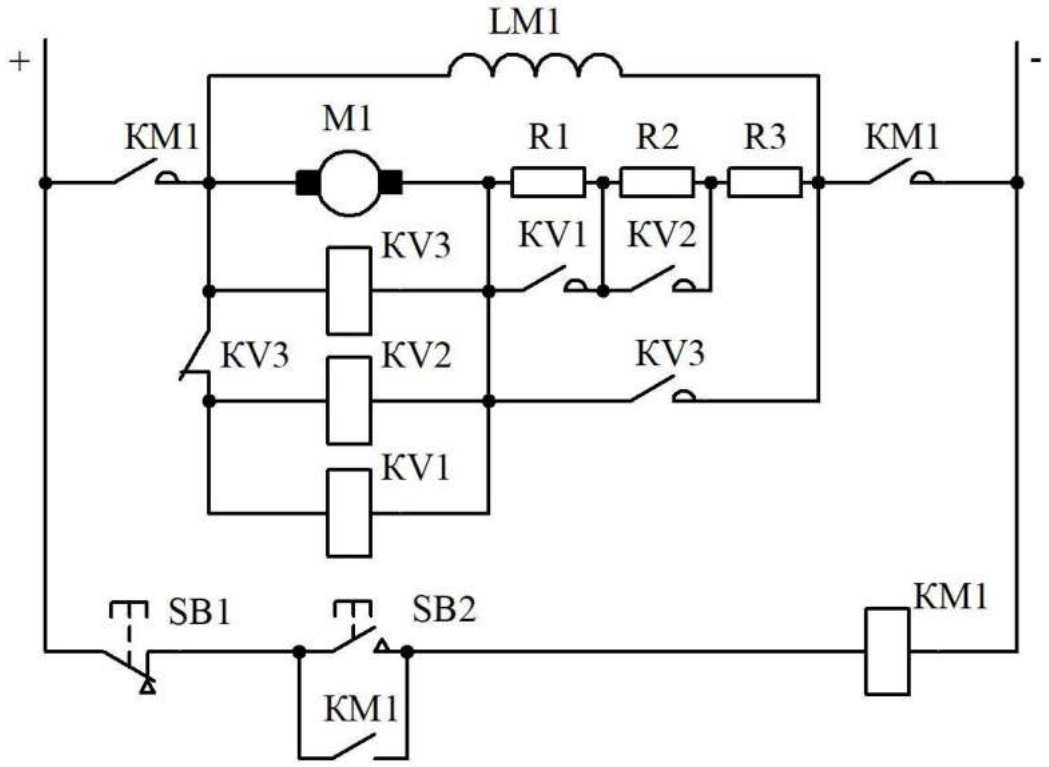


Рисунок 8.3 – Схема управления пуском ДПТ независимого возбуждения в функции скорости

При нажатии на кнопку SB2 получает питание катушка магнитного пускателя КМ1. Пускатель своим блокирующим контактом шунтирует кнопку SB1 и, замыкая силовые контакты, подключает двигатель к сети. Пусковые сопротивления введены. Реле напряжения KV1, KV2, KV3 включены та-

ким образом, что на них подается ЭДС якоря. При достижении якорем двигателя угловой скорости ω_3 ЭДС якоря достигает величины E_3, которая соответствует напряжению срабатывания реле напряжения KV1. При этом контакт KV1 замыкается, шунтируя первую ступень пусковых сопротивлений R1. Реле KV2 и KV3 не срабатывают, так как настроены на более высокое напряжение. Они срабатывают соответственно при достижении двигателем угловой скорости ω_2 и ω_1, которым соответствуют значения ЭДС E_2 и E_1.

При достижении угловой скорости ω_1 шунтируются все пусковые сопротивления. Якорь двигателя включается на сетевое напряжение. Размыкающие контакты KV3 отключают катушки реле напряжения KV1 и KV2.

Изменения угловой скорости и тока в процессе пуска происходят в течении определенного промежутка времени. Так, например, изменение угловой скорости от 0 до ω_1 происходит за время t_1, от ω_1 до ω_2 – за время t_2–t_1 и от ω_2 до ω_3 – за время t_3–t_2. Для управления пуском двигателем постоянного тока в три ступени используют программное реле времени (рисунок 8.4).

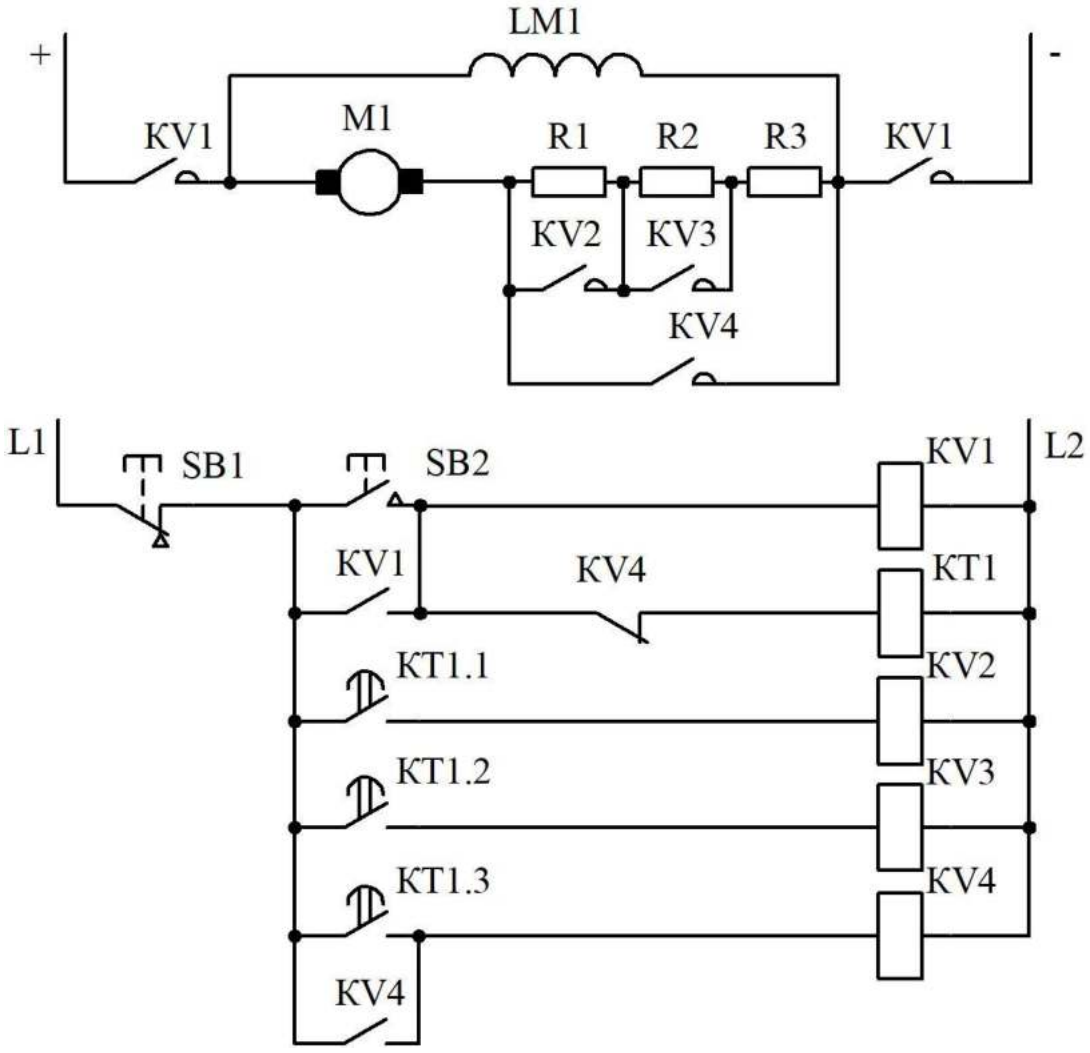


Рисунок 8.4 – Схема управления пуском двигателя постоянного тока в функции времени

Схема управления пуском двигателя постоянного тока в функции времени работает следующим образом. При нажатии на кнопку SB2 получают питание катушки реле KV1 и KT1. Реле KV1 своим блокирующим контактом мгновенно шунтирует кнопку SB1, одновременно через замкнувшиеся силовые контакты питание поступает на якорь и обмотку возбуждения двигателя. Происходит запуск двигателя при полностью введенных ступенях пускового реостата. Через выдержку времени t_1 замыкаются контакты реле времени KT1.1, питание получает реле KV2, из цепи якоря выводится сопротивление R1. Аналогичным образом питание получают реле KV3 и KV4. При срабатывании реле KV4 якорь двигателя включается на сетевое напряжение.

Выбор схемы управления пуском ДПТ производится с учетом конкретных условий работы электропривода, мощности двигателя, условий его пуска и т.д.

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. Изучить принципы автоматизированного пуска двигателя и схемы запуска в функциях тока, скорости и времени.
2. Для ознакомления со способами автоматизации пуска двигателя постоянного тока собрать схему электрическую принципиальную управления пуском двигателя в функции времени, представленную на рисунке 8.4. Произвести запуск двигателя по этой схеме.
3. Оформить отчет по работе.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Электрические схемы, изображенные на рисунках 8.2–8.4.
2. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. По каким параметрам можно автоматизировать процесс управления пуском двигателя постоянного тока?
2. Поясните, как происходит запуск двигателя по схеме в функции времени.
3. Поясните, как происходит запуск двигателя по схеме в функции тока.
4. Поясните, как происходит запуск двигателя по схеме в функции скорости.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПУСКОМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Цель работы: ознакомление с принципами построения схем автоматизированного управления пуском асинхронного двигателя с фазным ротором, приобретение умений и навыков профессиональной деятельности.

Общие сведения

К пусковым свойствам асинхронных двигателей, как и к двигателям постоянного тока, предъявляется ряд требований:

– двигатель должен создавать пусковой момент, превышающий статический момент сопротивления;

– пусковой ток не должен достигать значений, вызывающих повреждения двигателя, и не создавать в сети значительного падения напряжения, нарушающего работу других потребителей;

– схема пуска должна быть по возможности простой, экономичной, удобной в обслуживании.

В двигателях постоянного тока предельные значения пусковых параметров ограничиваются, главным образом, условиями коммутации. В асинхронных двигателях предельные значения пусковых параметров (тока и момента) ограничиваются электродинамическим и тепловым воздействием на вращающиеся части двигателя и рабочего механизма, значительным падением напряжения в питающей сети. Но асинхронные двигатели имеют физический предел пускового момента, который не может быть больше максимального момента $M_{макс}$.

Пусковой ток асинхронного двигателя определяется по следующему соотношению:

$$I_{пуск} = \frac{U_1}{Z_к}, \tag{9.1}$$

где U_1 – линейное напряжение, В;

$Z_к$ – полное сопротивление обмотки статора двигателя в начальный момент пуска, Ом;

Полное сопротивление обмотки статора двигателя:

$$Z_к = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + X_к{}^2}, \tag{9.2}$$

где R_2 – полное сопротивление обмотки ротора двигателя, Ом;

$X_к = X_1 + X'_2$ – индуктивное сопротивление обмоток двигателя в режиме короткого замыкания, Ом.

Пусковой момент асинхронного двигателя

$$M_{пуск} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot R_2 \cdot p}{2\pi \cdot f_1 Z_к^2}, \tag{9.3}$$

где m_1 – число фаз;

p – число пар полюсов;

f_1 – частота питающей сети, Гц.

Исходя из требований к пусковым свойствам двигателя, желательно ослабление пускового тока и усиление пускового момента. Однако анализ выражений (9.1) и (9.3) показывает, что эти требования противоречивы, так как обычно средства, способствующие повышению пускового момента, вызывают возрастание пускового тока, и наоборот.

Пусковые свойства и средства их улучшения в асинхронных двигателях с фазным и короткозамкнутым роторами различны, поэтому целесообразно их рассматривать раздельно. Рассмотрим вопросы пуска асинхронных двигателей с фазным ротором.

Особенность конструкции этих двигателей позволяет включить в цепь ротора пусковой реостат, представляющий добавочный резистор с переменным активным сопротивлением. Благодаря этому, появляется возможность воздействовать на пусковые свойства двигателя.

Как следует из выражений (2.3) и (2.4), максимальный момент двигателя не зависит от активного сопротивления роторной цепи, а критическое скольжение с увеличением активного сопротивления в цепи ротора увеличивается. Пусковой момент с ростом R_2 сначала растет, а затем снижается (рисунок 9.1).

Наибольший пусковой момент достигается при условии

$$R'_2 = X_1 + X'_2. \qquad (9.4)$$

Пусковой момент при (9.4) достигает наибольшего значения, равного $M_{макс}$. Увеличение сопротивления роторной цепи ведет к увеличению $Z_к$, а следовательно, способствует уменьшению пускового тока.

При реостатном пуске асинхронного электродвигателя с контактными кольцами поочередное закорачивание ступеней пускового сопротивления может производиться автоматически при помощи контакторов, управление включением которых может осуществляться в функции времени, частоты вращения, тока или частоты тока ротора.

Для обеспечения заданной диаграммы пуска необходима фиксация моментов подачи команд на включение контакторов. Это может осуществляться следующими способами:

– путем отсчета промежутков времени Δt1, Δt2, Δt3, для чего используются реле времени (управление в функции времени);

– посредством контроля значения скорости двигателя или ЭДС ротора, что может быть сделано при помощи датчиков скорости или ЭДС (управление в функции скорости);

– применением датчиков тока, дающих командный импульс при снижении тока ротора в процессе пуска (управление в функции тока);

– посредством контроля частоты тока ротора (управление в функции частоты тока).

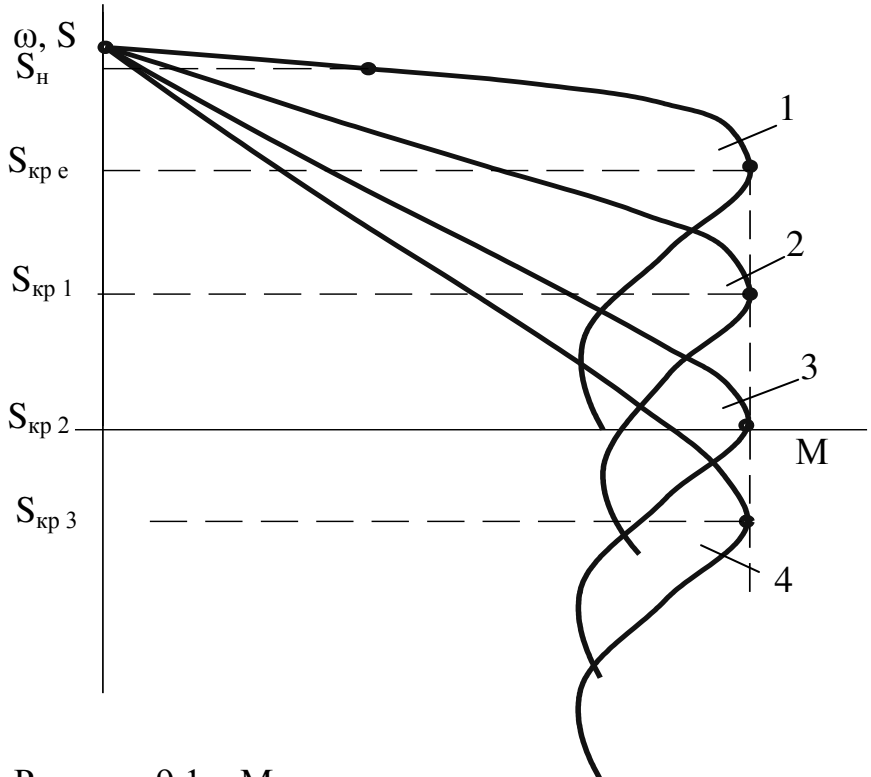


Рисунок 9.1 – Механические характеристики асинхронного двигателя: естественная (1) и при реостатном регулировании (2–4)

Наиболее часто применяются схемы автоматического пуска в функции времени. Расчет величин пусковых сопротивлений асинхронного двигателя с фазным ротором и времени пребывания на каждой ступени пускового реостата производится по следующей методике.

Строится участок рабочей ветви естественной механической характеристики по трем характерным точкам: холостого хода, номинальной и критической (рисунок 9.2). Наносятся границы пуска. При этом значение момента пускового максимального момента, называемого начальным пусковым моментом, принимается равным $M_{п\ макс}=(0{,}7–0{,}85)\ M_{макс}$, а момента пускового минимального, называемого моментом переключения – $M_{п\ мин}=(1{,}0–1{,}3)M_{н}$.

Через точки пересечения d и d_1 естественной механической характеристики, соответствующие значениям моментов $M_{пуск.макс}$ до $M_{пуск.мин}$, проводится прямая до пересечения с линией, проходящей через точку идеального холостого хода, параллельно оси моментов. Полученная точка t соединяется с точкой а с координатами $M=M_{п\ макс}$, $\omega=0$. Линия at соответствует реостатной характеристике при полностью введенных ступенях пускового реостата. При уменьшении момента до значения $M_{п\ мин}$ выводится первая ступень пускового реостата. Момент увеличивается до значения $M_{п\ макс}$, этому соответствует точка b. Линия bt – вторая реостатная характеристика. Аналогичным образом строится и третья реостатная характеристика.

Отрезок [de] пропорционален величине активного сопротивления одной фазы ротора. Соответственно отрезок [ab] в относительных единицах пропорционален сопротивлению первой ступени пускового реостата, отрезок [bc] – второй ступени и [cd] – третьей ступени. Измерив длины этих отрезков, определяют величины сопротивления каждой ступени пускового реостата:

$$R_1 = \frac{[ab]}{[de]} \cdot R_{рот};\ R_2 = \frac{[bc]}{[de]} \cdot R_{рот};\ R_1 = \frac{[cd]}{[de]} \cdot R_{рот},$$

где $R_{рот}$ – сопротивление ротора, Ом.

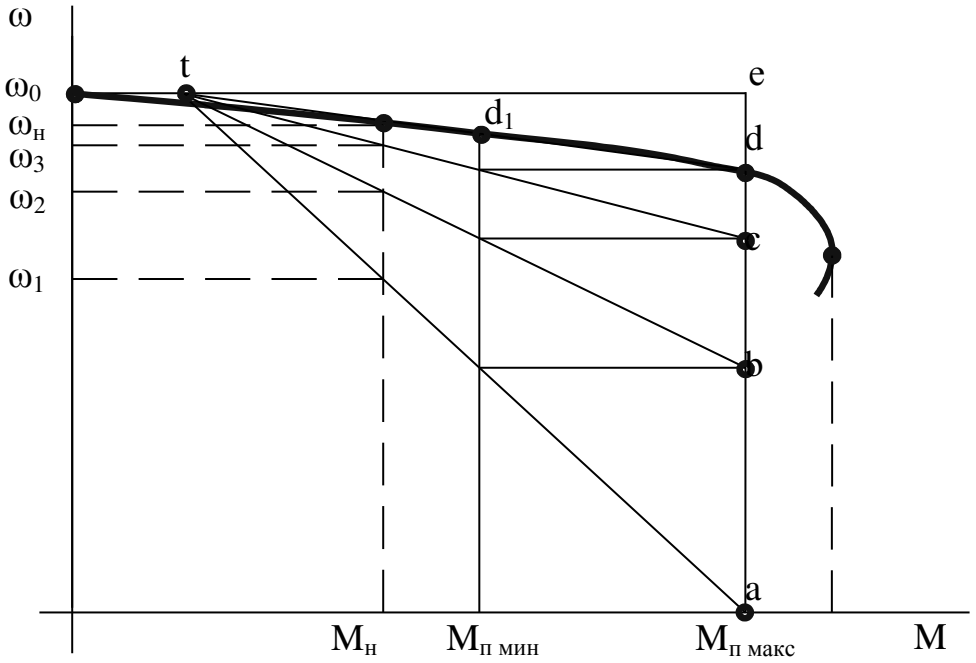


Рисунок 9.2 – К расчёту ступеней пускового реостата и времени пребывания на каждой ступени

Сопротивление ротора может быть определено с учетом паспортных данных двигателя по соотношениям:

$$R_{рот} = \frac{U_{2н} \cdot S_н}{\sqrt{3} I_{2н}}, \qquad (9.5)$$

$$R_{рот} = \frac{P_н \cdot S_н}{\sqrt{3} \cdot I_{2н}{}^2 \cdot \eta_н}, \qquad (9.6)$$

где $P_н$ – номинальная мощность двигателя, Вт;

$S_н$ – номинальное скольжение;

$I_{2н}$ – номинальный ток в цепи ротора, А.

Для определения времени пребывания на каждой ступени пускового реостата определяется угловая скорость, а затем и величина скольжения, соответствующая номинальному моменту двигателя на каждой ступени пускового реостата. Время пребывания определяется по соотношению

$$t_i = J \cdot \frac{\omega_o \cdot S_{нi}}{M_н} \cdot \ln \frac{M_{дин1i}}{M_{дин2i}}, \qquad (9.7)$$

где J – момент инерции электропривода, приведенный к валу электродвигателя, кг·м^2;

ω_0 – синхронная угловая скорость, с$^{-1}$;

$S_{нi}$ – скольжение, соответствующее номинальному моменту на каждой ступени пускового реостата;

$M_{дин1i}$, $M_{дин2i}$ – момент динамический, разница между моментом двигателя и моментом сопротивления рабочей машины на каждой ступени пускового реостата соответственно в начале и в конце ступени.

Момент динамический определяется как:

$$M_{дин1i}=M_{пуск\ макс}-M_{ci}, \quad (9.8)$$

$$M_{дин2i}=M_{пус\ мин}-M_{ci}. \quad (9.9)$$

Схема управления пуском асинхронного двигателя с фазным ротором в функции времени представлена на рисунке 9.3.

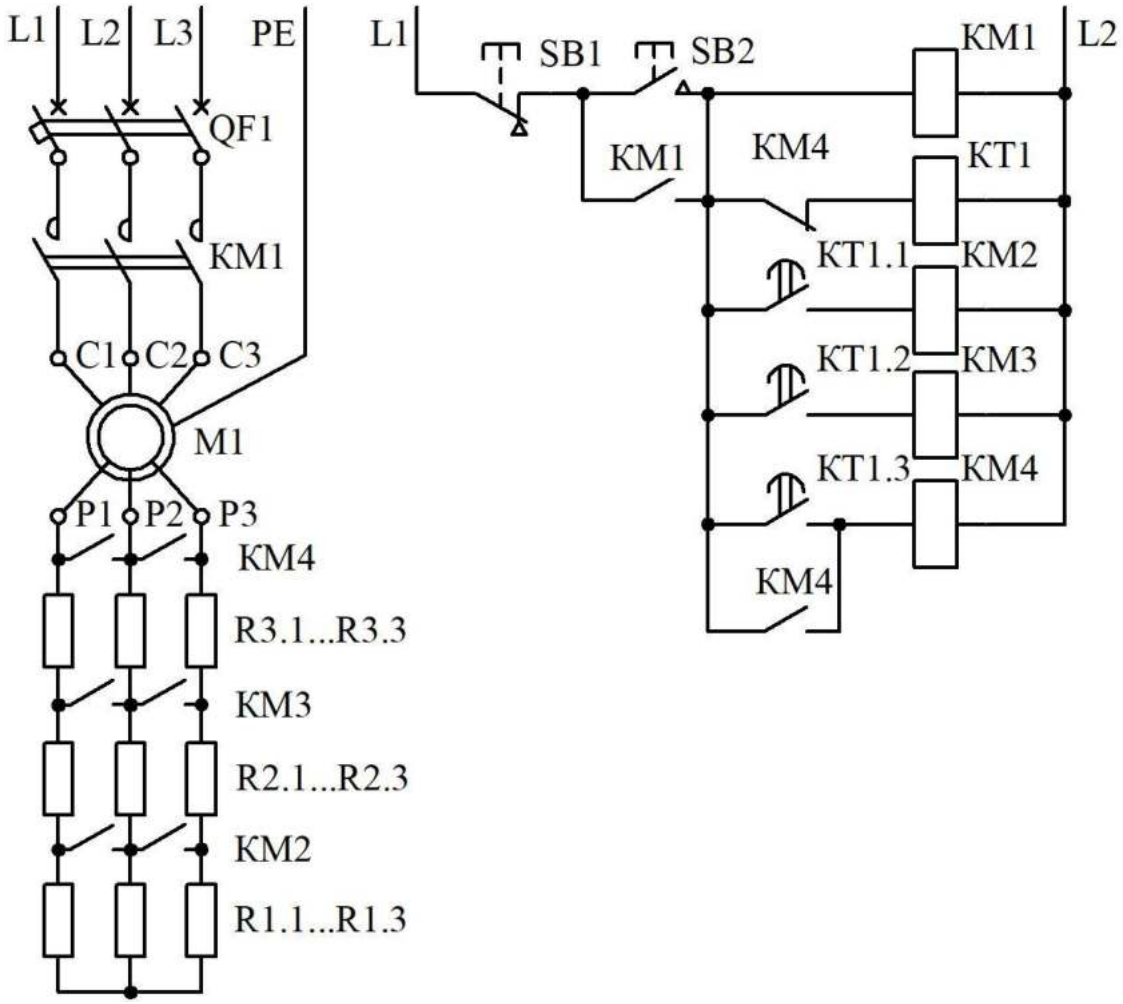


Рисунок 9.3 – Схема электрическая принципиальная управления пуском асинхронного двигателя с фазным ротором в функции времени

Схема работает следующим образом. При нажатии на кнопку SB2 питание получают магнитный пускатель КМ1 и реле времени КТ1. Через замкнувшиеся силовые контакты КМ1 питание поступает на двигатель. Двигатель запускается при полностью введенных ступенях пускового реостата. Через выдержку времени Δt1 замыкаются контакты КТ1.1 в цепи магнитного пускателя КМ2. Замыкающие контакты КМ2 закорачивают первую ступень пускового реостата R1.1…R1.3. Аналогичным образом выводятся из цепи ротора вторая и третья ступени реостата после замыкания контактов КТ1.2 и КТ1.3 и срабатывания магнитных пускателей КМ3 и КМ4.

Для пуска асинхронных двигателей с фазным ротором возможно применение пусковых устройств с дросселями (реакторами) L. Дроссели выполняют функцию автоматических регуляторов силы пускового тока.

В начале пуска скольжение s = 1 и частота тока в роторе равна частоте тока в сети:

$$f_{2п} = f_1 \cdot S. \qquad (9.10)$$

При этом индуктивное сопротивление дросселей равно:

$$x_L = 2\pi f_1 \cdot L \ . \qquad (9.11)$$

Это в значительной степени ограничивает начальный пусковой ток. По мере роста частоты вращения ротора (снижения скольжения) частота тока в обмотке ротора уменьшается, а следовательно, снижается индуктивное сопротивление дросселей x_L. По окончании процесса пуска частота тока в роторе составляет обычно 2–5 Гц, при этом индуктивное сопротивление дросселей

$$x_{Lр} = (0{,}02\ldots0{,}l)x_{Lп}. \qquad (9.12)$$

Таким образом, ограничение тока происходит за счет индуктивного сопротивления, что способствует снижению электрических потерь в двигателе во время пуска. Однако следует помнить, что дроссели дороже резисторов. Если же предъявляются повышенные требования к плавности пуска электропривода, то применение дросселей в пусковом устройстве оправдано.

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. Изучить схемы автоматизированного запуска асинхронного двигателя с фазным ротором.

2. По паспортным данным двигателя рассчитать параметры характерных точек рабочей ветви асинхронного электродвигателя с фазным ротором. По полученным данным построить участок рабочей ветви естественной характеристики, а также пусковые реостатные характеристики с учетом заданных границ пуска. Графическим способом произвести расчет ступеней пускового реостата и времени пребывания на каждой ступени.

Исходные данные для расчета: $P_н$ = 2,6 кВт; $U_н$ = 220/380 В; $\mu_п$ = 1,7; $\mu_{кр}$ = 2,2; $I_н$ = 13,2/7,7 А; $n_н$ = 920 об/мин; $\eta_н$ = 0,75; cosφ = 0,74; $M_{пус\ макс} = 1{,}7M_н$; $M_{пуск\ мин} = 1{,}3M_н$; $M_с$ = 8 Нм; $GD^2_{двиг}$ = 0,5 кгм^2; U_2 = 91 В; $I_н$ = 21,2 А.

3. Настроить реле времени на рассчитанные уставки, собрать электрическую схему, представленную на рисунке 9.3, и произвести запуск двигателя.

4. Оформить отчет по работе.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Электрическая схема, изображенная на рисунке 9.3.

2. Естественная и реостатные механические характеристики АД. Результаты расчета сопротивлений ступеней пускового реостата и времени пребывания на каждой ступени.

4. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Назначение пускового реостата в цепи ротора асинхронного двигателя с фазным ротором.
2. Методы управления пуском асинхронного двигателя с фазным ротором.
3. Поясните работу электрической схемы пуска асинхронного двигателя с фазным ротором в функции времени.
4. Поясните порядок определения времени нахождения двигателя на отдельных ступенях пускового реостата.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ В ОДНОФАЗНУЮ СЕТЬ

Цель работы: изучить способы и схемы включения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в однофазную сеть, приобрести навыки маркировки обмоток АД.

Общие сведения

В сельскохозяйственном производстве часто возникает необходимость применять трехфазные асинхронные двигатели в таких условиях, когда нет трехфазной, но есть однофазная сеть. В этом случае электродвигатель можно включать в однофазную сеть, применив специальную схему соединения обмоток. Следует учитывать, что при работе от однофазной сети трехфазный электродвигатель может длительно развивать мощность, равную 60–65% его мощности в трехфазном номинальном режиме.

Для пуска от однофазной сети трехфазный электродвигатель должен быть включен по соответствующей схеме. В качестве фазосдвигающих элементов могут быть использованы активные, индуктивные или емкостные сопротивления. На рисунке 10.1 показаны наиболее рекомендуемые схемы включения трехфазного электродвигателя в однофазную сеть, где в качестве фазосдвигающего элемента используется активное сопротивление. Из схем видно, что две фазные обмотки являются рабочими, а третья – пусковой. Они вместе с активным сопротивлением R1 и пусковой кнопкой SB1 и образуют пусковую ветвь электродвигателя.

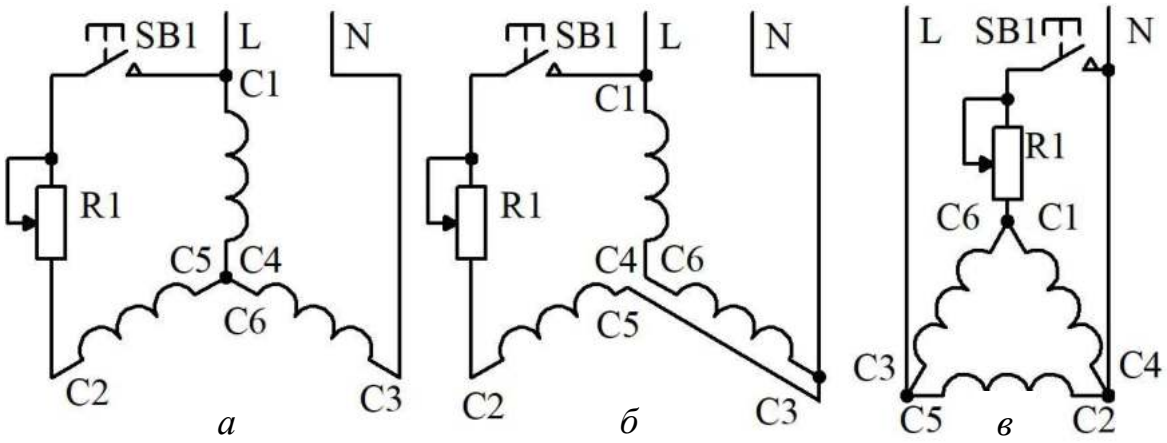


Рисунок 10.1 – Схема включения трехфазного электродвигателя в однофазную сеть с помощью сопротивления

Наилучшие эксплуатационные показатели имеют трехфазные электродвигатели, которые включаются в однофазную сеть при помощи конденсаторов. В этом случае можно получить вращающееся магнитное поле, близкое к круговому. Начальный вращающийся момент электродвигателя при пуске с

конденсатором в цепи пусковой обмотки значительно превосходит момент, получаемый при включении активного сопротивления или индуктивности. Схемы включения электродвигателей в однофазную сеть при помощи конденсаторов представлены на рисунке 10.2.

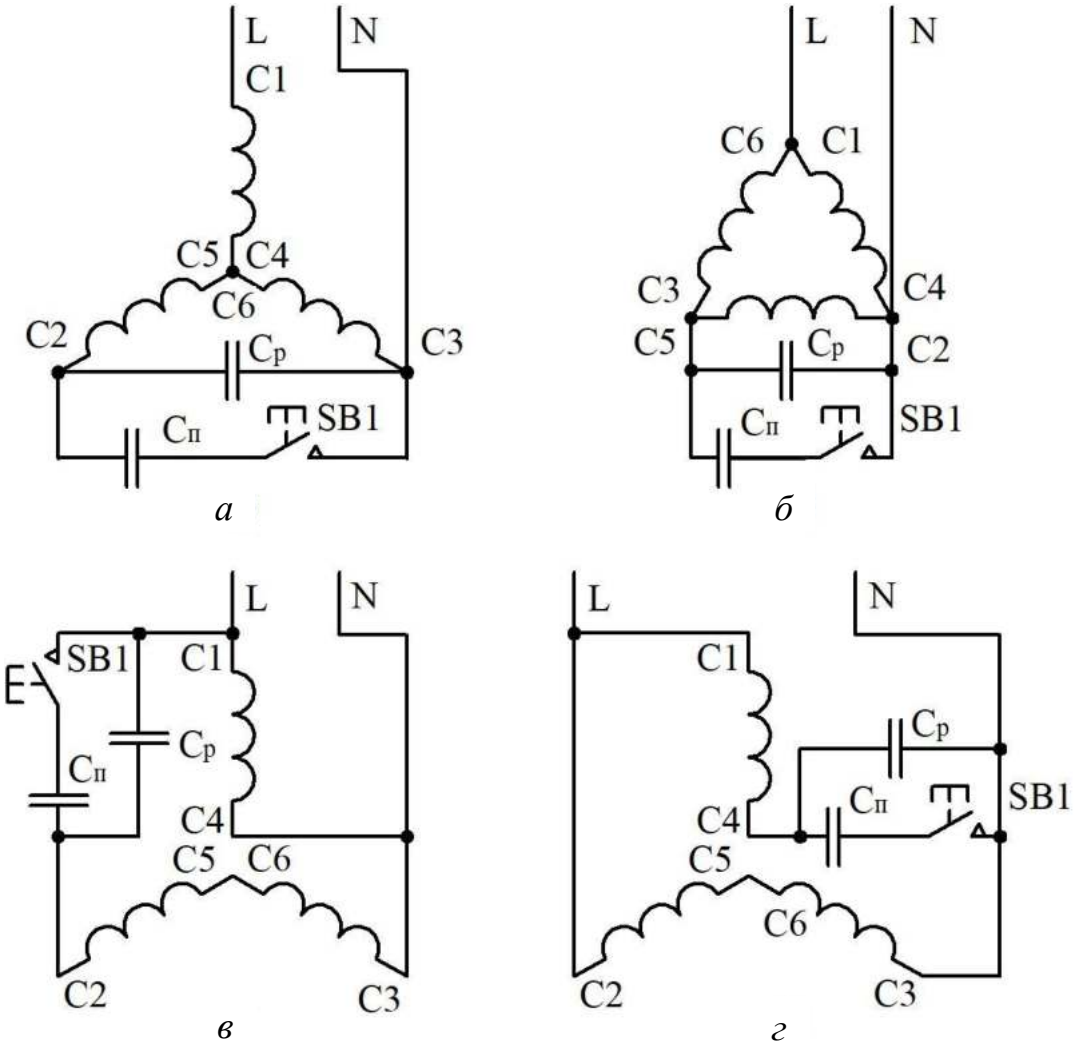


Рисунок 10.2 – Схемы включения асинхронных электродвигателей в однофазную сеть с помощью конденсаторов

Необходимость применения дополнительных средств для работы трехфазного двигателя в однофазном режиме объясняется тем, что однофазный режим работы является режимом, в котором один из фазных проводов оборван. Остановив трехфазный двигатель, работающий в однофазном режиме, легко убедиться в том, что пустить его в ход непосредственно включением в сеть однофазного тока невозможно. Вращающий момент при пуске оказывается равным нулю. Это обусловлено характером магнитного поля статора.

Поле статора может быть представлено в виде двух полей, вращающихся с одной и той же синхронной скоростью в противоположных направлениях. Взаимодействие вращающихся полей с токами ротора приводит к образованию вращающихся моментов, направленных в противоположные стороны. Неподвижный ротор по отношению к этим полям находится в одинаковых условиях, вращающие моменты полностью уравновешивают друг

друга. Таким образом, трехфазный двигатель в однофазном режиме не имеет начального пускового момента.

Если провернуть ротор, то прямое поле (то, которое совпадает с направлением вращения ротора) наводит в его обмотке токи небольшой частоты (2…3 Гц) и создает момент $M_{пр}$. Встречному полю соответствуют токи повышенной частоты (около 100 Гц) и тормозной момент $M_{обр}$. Это объясняется тем, что частота тока в роторе пропорциональна скольжению:

$$f_2 = S \cdot f_1, \tag{10.1}$$

где f_1 – частота питающей сети, Гц;

S – скольжение.

В таком случае величина скольжения $S_{пр}$ меньше $S_{обр}$, так как:

$$S_{пр} = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1}, \tag{10.2}$$

$$S_{обр} = \frac{(n_1 - (-n_2))}{n_1} = \frac{n_1 + n_1 - n_1 + n_2}{n_1} = 2 - S_{пр}. \tag{10.3}$$

Таким образом, индуктивное сопротивление обмотки ротора току $I'_{2обр}$ во много раз больше ее активного сопротивления и ток $I'_{2обр}$ является почти чисто индуктивным. Он оказывает сильное размагничивающее действие на обратное поле $Ф_{обр}$. В результате обратное поле и обусловленный им момент $M_{обр}$ оказываются значительно ослабленными и ротор однофазного двигателя вращается в направлении прямого поля под действием момента М.

Каждое из вращающихся магнитных полей является круговым. Вид результирующего магнитного поля обусловлен рядом условий. Для получения кругового вращающегося магнитного поля посредством двух обмоток на статоре необходимо, чтобы:

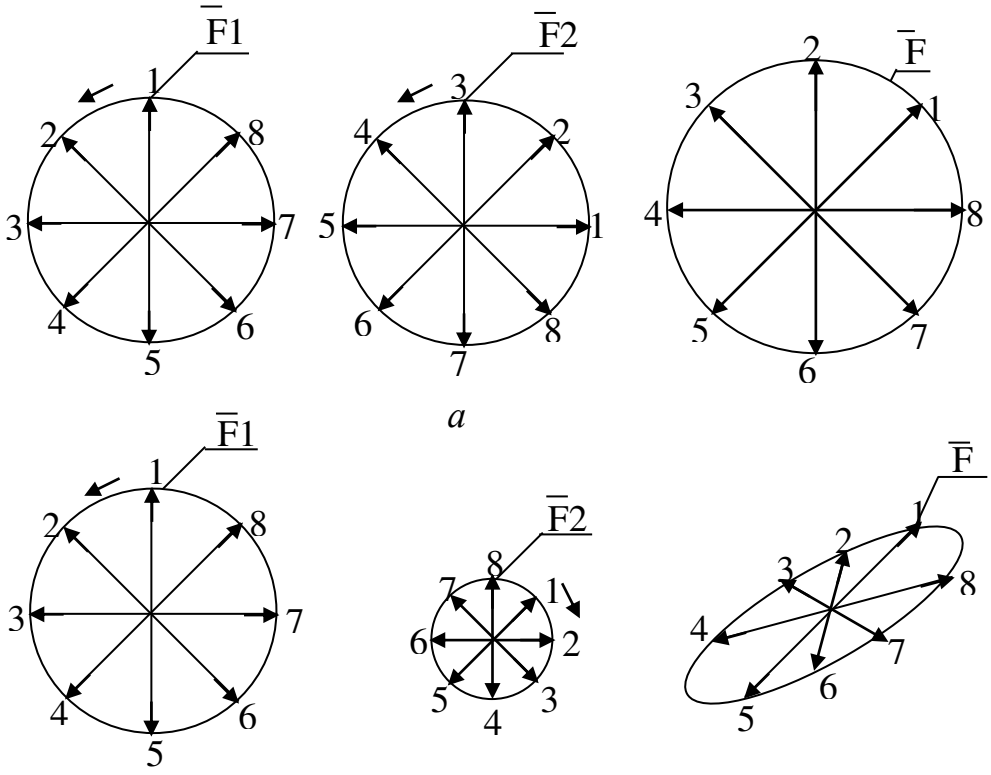
– МДС рабочей и пусковой обмоток быть равны и сдвинуты в пространстве относительно друг друга на 90 электрических градусов;

– токи в рабочей и пусковой обмотках статора должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга на 90^0.

МДС (магнитодвижущая сила) является одной из характеристик магнитного поля. МДС между концами цилиндрической катушки есть произведение напряженности магнитного поля на длину катушки.

При соблюдении указанных выше условий вращающееся поле статора становится круговым, что соответствует наибольшему вращающему моменту двигателя (рисунок 10.3 *а*). При частичном нарушении какого-либо из условий поле статора становится эллиптическим (рисунок 10.3 *б*), содержащим обратную составляющую. Обратная составляющая поля создает тормозной момент и ухудшает пусковые свойства двигателя.

В отличие от однофазного двигателя у трехфазного нет деления на пусковую и рабочую обмотки, поэтому, чтобы запустить трехфазный двигатель в однофазном режиме, одна обмотка статора, например, образованная фазой С2-С5 (рисунок 10.1 *б*), используется как пусковая, другая состоит из двух последовательно соединенных обмоток: С1-С4, С3-С6 (рабочая).



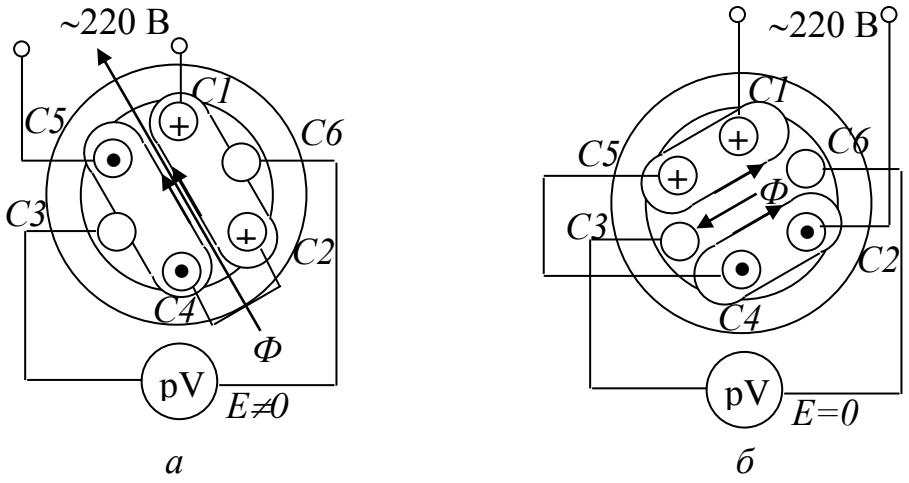
а – суммарное магнитное поле – эллиптическое;
б – суммарное магнитное поле – круговое
Рисунок 10.3 – Диаграммы вращающихся магнитных полей

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. В случае отсутствия маркировки произвести определение «начала» и «конца» обмоток статора. Для этого при помощи мультиметра определяют принадлежность выводов обмоткам статора. Определение «начала» и «конца» обмоток статора выполняют одним из двух способов: методом проб или методом трансформации.

В соответствии с методом проб, после того как определены выводы отдельных обмоток, по одному из выводов от каждой обмотки соединяют в общую точку, а другие выводы включают в сеть. Если двигатель будет работать нормально, то есть он развивает необходимые обороты и не гудит, то в общей точке оказались все три «конца» С4, С5, С6, а к сети подсоединены «начала» С1, С2, С3. Если двигатель работает ненормально (сильно гудит, вибрирует, идет рывками, ротор вращается с малой скоростью), то в общей точке оказались либо два «начала» и один «конец», либо одно «начало» и два «конца». В этом случае не следует долго держать двигатель включенным в сеть. После этого меняют местами выводы одной из обмоток и снова подключают статор к сети. Если и на этот раз двигатель работает ненормально, то возвращают на прежнее место выводы этой обмотки и меняют местами выводы следующей и т.д. Максимальное число «проб» при этом способе – три.

По методу трансформации одну из обмоток подключают к вольтметру с малым пределом измерения (30–60 В), две другие обмотки соединяют последовательно и включают в сеть 220 В. Если «конец» одной обмотки оказался соединенным с «началом» другой, то вольтметр покажет напряжение. Это значит, что суммарный магнитный поток Ф, образуемый этими обмотками, будет пересекать третью обмотку и наводить в ней ЭДС (рисунок 10.4 *а*). Если же в общей точке соединенных последовательно двух обмоток окажутся два «конца» или два «начала», то общий магнитный поток будет направлен вдоль плоскости третьей обмотки, ЭДС в ней не наводится, и вольтметр покажет ноль (рисунок 10.4 *б*). Таким образом, если вольтметр покажет напряжение на третьей обмотке, то помечают «концы» и «начала» последовательно соединенных обмоток. Аналогичным способом определяют «начало» и «конец» третьей обмотки.



а *б*

Рисунок 10.4 – Маркировка концов обмоток по методу трансформации

2. Изучить способы пуска трехфазного двигателя в однофазном режиме.

3. Произвести запуск по схеме с реостатом. Для этого предварительно выбрать схему включения электродвигателя при использовании в качестве фазосдвигающего устройства активного сопротивления в зависимости от номинального напряжения двигателя и сети. Собрать выбранную схему. Рассчитать значение пускового сопротивления.

Значения пускового сопротивления R1 для схем 10.1 *а* и 10.1 *в* определяют по формуле

$$R_{п} = 1{,}5Z_{к}, \qquad (10.4)$$

где $Z_{к}$ – полное сопротивление короткого замыкания фазы электродвигателя, Ом.

Полное сопротивление короткого замыкания определяется:

− при соединении обмоток электродвигателя по схеме «звезда»:

$$Z_{к} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}k_{i}I_{нY}}; \qquad (10.5)$$

– при соединении обмоток электродвигателя по схеме «треугольник»:

$$Z_к = \frac{U_л \sqrt{3}}{k_i I_{нΔ}}, \quad (10.6)$$

где $U_л$ – линейное напряжение, В;

k_i – кратность пускового тока;

$I_{нY}, I_{нΔ}$ – номинальный ток двигателя при соединении обмотки статора в «звезду» и «треугольник», А.

Значение пускового сопротивление для схемы 10.1 *б* определяется по формуле

$$R = 0{,}866 \cdot \frac{U_л}{k_i I_н}. \quad (10.7)$$

Произвести пуск двигателя. При пуске электродвигателя необходимо нажать на кнопку SB1. Когда ротор электродвигателя разгонится до частоты вращения, близкой к номинальной, кнопку SB1 нужно отпустить. После этого электродвигатель продолжает работать, развивая соответствующую мощность.

3. Выбрать схему включения асинхронного электродвигателя для работы в однофазном режиме с использованием в качестве фазосдвигающего устройства конденсаторов. Величина емкости для выбранной схемы определяется по соотношениям (10.8)–(10.11).

Для схемы рисунка 10.2 *а*:

$$C_р = 2800 \frac{I_н}{U_н}; U_{р.к.} \approx U_н. \quad (10.8)$$

Для схемы рисунка 10.2 *б*:

$$C_р = 4800 \frac{I_н}{U_н}; U_{р.к} \approx U_н. \quad (10.9)$$

Для схемы рисунка 10.2 *в*:

$$C_р = 1600 \frac{I_н}{U_н}; U_{р.к.} \approx 1{,}15 U_н. \quad (10.10)$$

Для схемы рисунка 10.2 *г*:

$$C_р = 2740 \frac{I_н}{U_н}; U_{р.к.} \approx 2U_н, \quad (10.11)$$

где $I_н; U_н$ – номинальные фазный ток и напряжение.

Значение пусковой емкости выбирают в 2–3 раза больше рабочей. Осуществить реверс двигателя, используемого в однофазном режиме. Для этого необходимо изменить порядок чередования фаз подводимого напряжения на обмотках статора. Например, в схеме, изображенной на рисунке 15.2 *а*, можно питающий провод отключить от С3 и подключить к С2 или цепь с конденсаторами подключить к клеммам двигателя С1 и С2.

4. Оформить отчет по работе.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Результаты маркировки обмоток двигателя.
2. Электрические схемы, изображенные на рисунках 10.1 и 10.2.
3. Результаты расчетов сопротивления и емкости конденсатора для выбранных схем включения трехфазного АД в однофазную сеть.
4. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Какую мощность может длительно развивать трехфазный электродвигатель при работе в однофазной сети?
2. Почему при включении трехфазного двигателя в однофазную сеть требуются фазосдвигающие устройства?
3. Сформулируйте условия создания кругового вращающегося магнитного поля.
4. Какие устройства могут использоваться в качестве фазосдвигающих? Какие из них наиболее предпочтительны и почему?
5. Как осуществить реверсирование трехфазного двигателя в однофазной сети?
6. Поясните порядок определения «начала» и «концов» обмоток методом «проб».
7. Поясните порядок определения «начала» и «концов» обмоток методом «трансформации».

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПУСКОМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы: ознакомление с принципами построения схем автоматизированного управления пуском асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, приобретение умений и навыков управления пуском асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Общие сведения

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, по сравнению с двигателями других видов, являются наиболее дешевыми и надежными. Поэтому они составляют основу электроприводов рабочих машин во всех отраслях производства. Их надежность обусловлена отсутствием скользящих контактов (щеток и контактных колец). В зависимости от мощности двигателя пусковой ток двигателя может превышать номинальный ток от 3 до 7,5 раз.

Благодаря кратковременности процесса пуска, двигатель не успевает перегреваться. Исключение составляют приводы, работающие в режимах с частыми пусками или реверсированием. В остальных случаях основной причиной, ограничивающей прямое включение двигателя в сеть, являются недостаточная мощность этой сети и ударное механическое воздействие на подвижные части двигателя и рабочей машины.

Пуск непосредственным включением в сеть применяется для асинхронных двигателей малой и средней мощности. Предельная мощность двигателя для прямого включения в сеть определяется в каждом конкретном случае в зависимости от допустимой нагрузки для этой сети и условий пуска двигателя (пуск в режиме холостого хода или под нагрузкой). Включение двигателей в сеть, питающую другие силовые и осветительные устройства, не должно вызывать падения напряжения, превышающее допустимое значение.

Схема управления асинхронными двигателями, допускающими их прямое включение в сеть, представлена на рисунке 11.1. При нажатии кнопки SB2 «Пуск» замыкается цепь питания катушки магнитного пускателя КМ1, который срабатывает и своими силовыми контактами КМ1 подключает к сети двигатель М1. Одновременно замыкаются контакты КМ1, шунтирующие кнопку SB2 «Пуск», чем обеспечивается питание обмотки контактора при отпускании этой кнопки.

Отключение двигателя выполняется нажатием кнопки SB1 «Стоп». При этом размыкается цепь питания катушки магнитного пускателя КМ1, что приводит к размыканию всех его силовых контактов КМ1, отключающих двигатель от сети, и контактов, шунтирующих кнопку SB1. При отпускании кнопки SB1 её контакты замыкаются, но цепь катушки пускателя КМ1 остается разомкнутой.

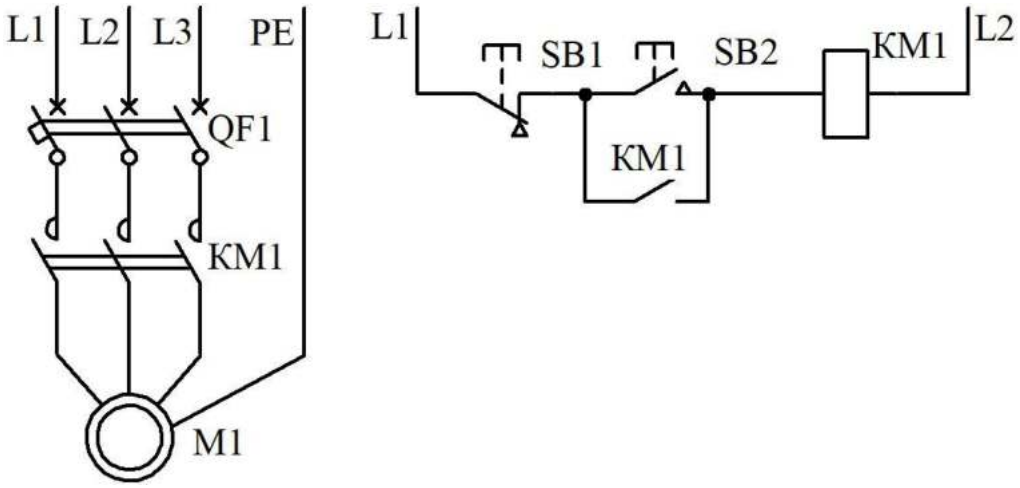


Рисунок 11.1 – Нереверсивная схема пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Как отмечалось ранее, в ряде случаев возникает необходимость в уменьшении пусковых токов. Но конструкция асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором не допускает введения добавочных сопротивлений в цепь ротора. Поэтому основным средством уменьшения пускового тока в соответствии с выражением (9.1) является временное (на время пуска) понижение напряжения U_1, подводимого к обмотке статора. На этом основаны все специальные способы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Однако следует помнить, что с понижением напряжения U_1 уменьшается пусковой момент двигателя, который пропорционален квадрату этого напряжения (выражение 2.4). Поэтому пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении допускается лишь для случаев пуска без нагрузки или с небольшой нагрузкой на валу. При больших инерционных массах, приводимых в движение двигателем, снижение пускового момента может привести к тому, что момент окажется недостаточным для пуска механизма. В этом случае такой пуск двигателя неприемлем.

Для пуска асинхронных двигателей средней и большой мощности, работающих при соединении обмотки статора «треугольником», для снижения пускового тока обычно применяют метод пуска переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник» (рисунок 11.2).

При нажатии на кнопку SB2 питание получают катушки магнитных пускателей КМ1, КМ2 и реле времени КТ1. Блок-контакты КМ1 шунтируют пусковую кнопку. Замкнувшиеся силовые контакты КМ1 и КМ2 обеспечивают запуск двигателя по схеме «звезда». Через выдержку времени контакты КТ1.1 разомкнутся, обесточится пускатель КМ1, а КТ1.2 замкнутся, питание получит катушка магнитного пускателя КМ2. Тем самым будет обеспечен переход со схемы «звезда» на схему «треугольник».

Благодаря включению обмотки статора при пуске по схеме «звезда» вместо соединения в «треугольник» при том же линейном напряжении линейный ток уменьшится в три раза, что вытекает из следующих соотношений:

− линейный ток при соединении треугольником:

– $I_л = I_ф\sqrt{3} = \dfrac{U_л\sqrt{3}}{Z_{дв}}$, здесь $U_ф = U_л$; (11.1)

– линейный ток при соединении звездой:

$$I_л = I_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}Z_{дв}}, \text{ здесь } U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}}. \quad (11.2)$$

Следовательно, ток при соединении звездой меньше тока при соединении треугольником в три раза. Пусковой момент при рассматриваемом способе пуска также уменьшается в три раза.

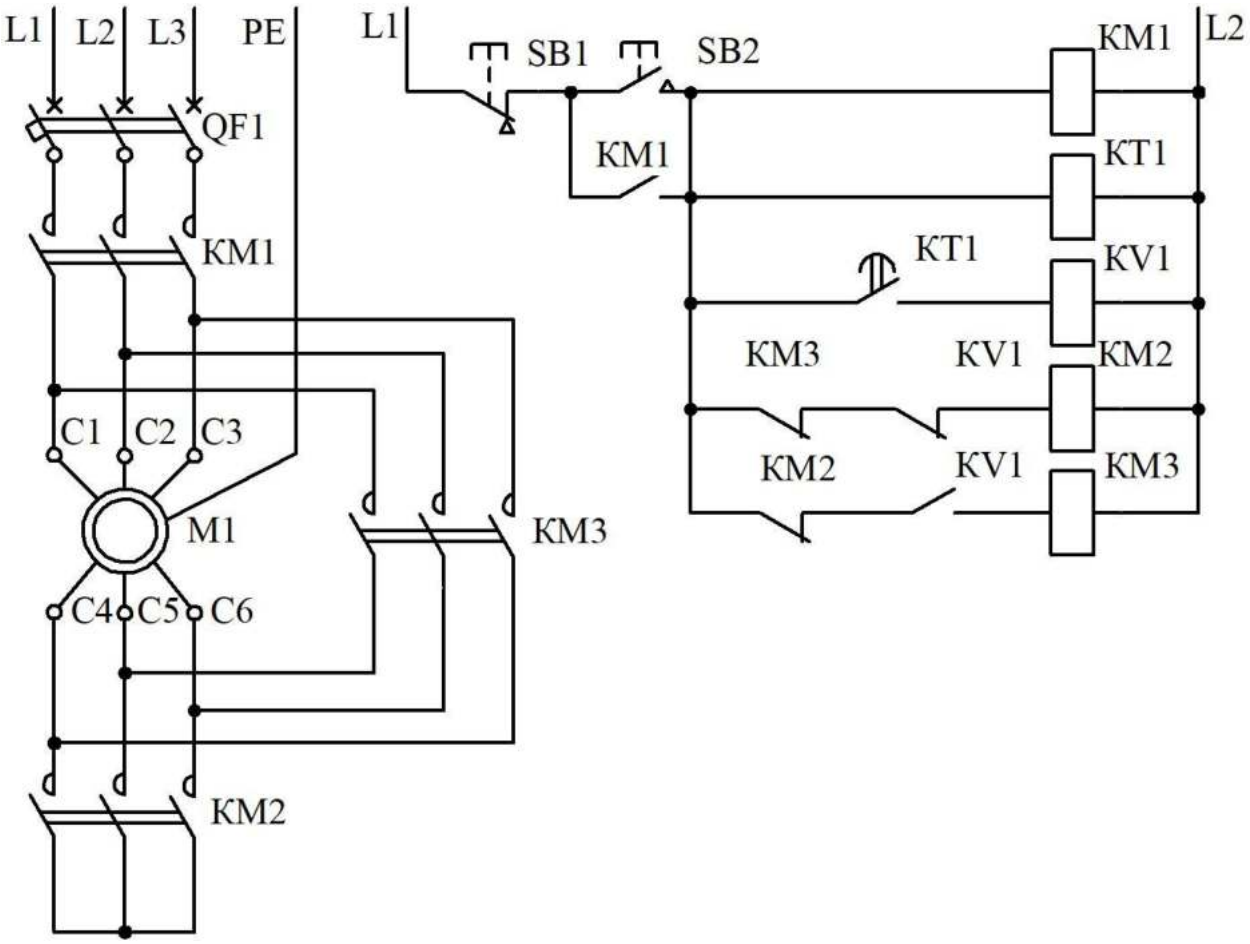


Рисунок 11.2 – Схема пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с переключением со «звезды» на «треугольник»

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться со схемами пуска асинхронного двигателя с короткозамкнтуым ротором.

2. Произвести прямой пуск двигателя по схеме, представленной на рисунке 11.1.

3. Ознакомиться со способами уменьшения пусковых токов у асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

4. Собрать схему (рисунок 11.2) и произвести запуск двигателя по схеме с переключением обмоток при пуске со «звезды» на «треугольник».

5. Оформить отчет по работе.

Контрольные вопросы

1. Чем характеризуется прямой пуск двигателя?
2. В каких случаях целесообразно использовать способ уменьшения пусковых токов за счет уменьшения подводимого к статору напряжения? Какие ограничения накладываются на применение этого способа?
3. В каком соотношении находятся пусковые моменты электродвигателя при схемах соединения в «звезду» и «треугольник»?
4. Поясните работу схемы, изображенной на рисунке 11.1.
5. Поясните работу схемы, изображенной на рисунке 11.2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: ознакомление с принципами построения схем управления работой асинхронного двигателя, приобретение умений и навыков управления работой асинхронного двигателя.

Общие сведения

Электропривод ряда рабочих машин в сельскохозяйственном производстве работает в кратковременном режиме. Кроме того, в процессе работы возникает необходимость в изменении направления движения рабочей машины. К таким рабочим машинам относятся, например, навозоуборочные транспортеры, транспортеры, входящие в состав стационарных систем раздачи кормов, мобильные кормораздатчики.

Заданная продолжительность работы нереверсивного электропривода может быть обеспечена при использовании схемы автоматического ограничения времени работы двигателя (рисунок 12.1). Данная схема обеспечивает работу потребителя в течении заданного промежутка времени с его последующим отключением.

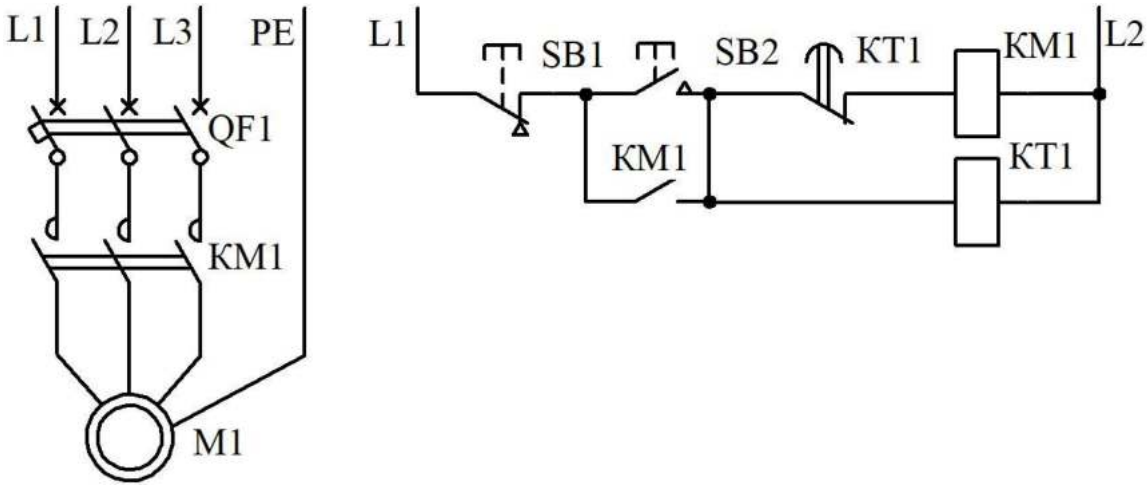


Рисунок 12.1 – Схема управления асинхронным двигателем с автоматическим ограничением времени работы

Схема работает следующим образом. При нажатии на кнопку SB2 питание получают катушки магнитного пускателя KM1 и реле времени KT1. Блок-контакты магнитного пускателя KM1 шунтируют пусковую кнопку SB2, а через замкнувшиеся силовые контакты KM1 питание поступает на двигатель M1, он начинает работать.

Через выдержку времени, задаваемую реле KT1, его контакты разомкнутся в цепи катушки KM1. Катушка пускателя обесточится, её замыкающие контакты разомкнутся, двигатель M1 отключится.

Изменение направления вращения асинхронного двигателя осуществляется путем изменения чередования фаз обмотки статора. Реверсирование

электропривода может обеспечиваться по сигналам кнопок управления, конечных выключателей и переключателей, реле времени и т.д.

Схема реверсирования асинхронного двигателя с помощью кнопок управления представлена на рисунке 12.2. Для того чтобы обеспечить вращение вала по часовой стрелке, нажимают на кнопку SB2 (рисунок 12.2). Питание получает катушка магнитного пускателя КМ1.1 Замкнувшиеся силовые контакты КМ1.1 подключают обмотку статора двигателя М1 к сети. Размыкающие контакты КМ1.1 размыкаются в цепи катушки КМ1.2, тем самым исключают возможность одновременного замыкания силовых контактов КМ1.1 и КМ1.2, а следовательно, возникновения короткого замыкания в силовой цепи. Для отключения двигателя нажимают кнопку SB1. Обратное вращение двигателя обеспечивается при нажатии на кнопку SB3.

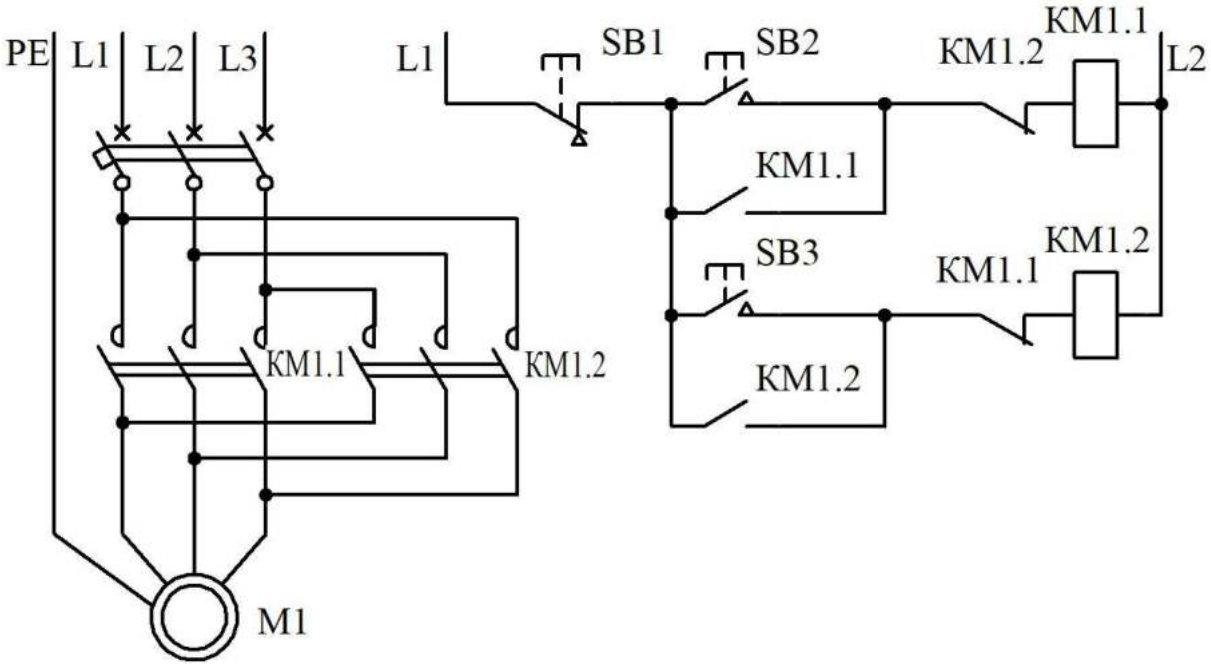


Рисунок 12.2 – Схема реверсирования асинхронного двигателя с помощью кнопок управления

В том случае, если транспортер имеет большую протяженность, для удобства управления используют несколько кнопочных станций, устанавливаемых вдоль транспортера с определенным интервалом (рисунок 12.3).

Реверсирование транспортирующих устройств может быть обеспечено конечными выключателями (рисунок 12.4). В том случае, если транспортирующее устройство воздействует на шток конечного выключателя SQ1, его замыкающие контакты замыкаются в цепи катушки магнитного пускателя КМ1.1, а размыкающие размыкаются в цепи катушки КМ1.2. Катушка КМ1.1 получает питание. Блок-контакты КМ1.1 шунтируют цепь конечного выключателя SQ1. Также замыкаются силовые контакты КМ1.1. Они подключают двигатель М1 к сети, тем самым обеспечивают прямое движение транспортирующего устройства. Транспортирующее устройство съезжает с конечного выключателя SQ1, воздействие на его шток прекращается и контакты возвращаются в исходное положение, но питание на КМ1.1 сохраняется по цепи блок-контактов.

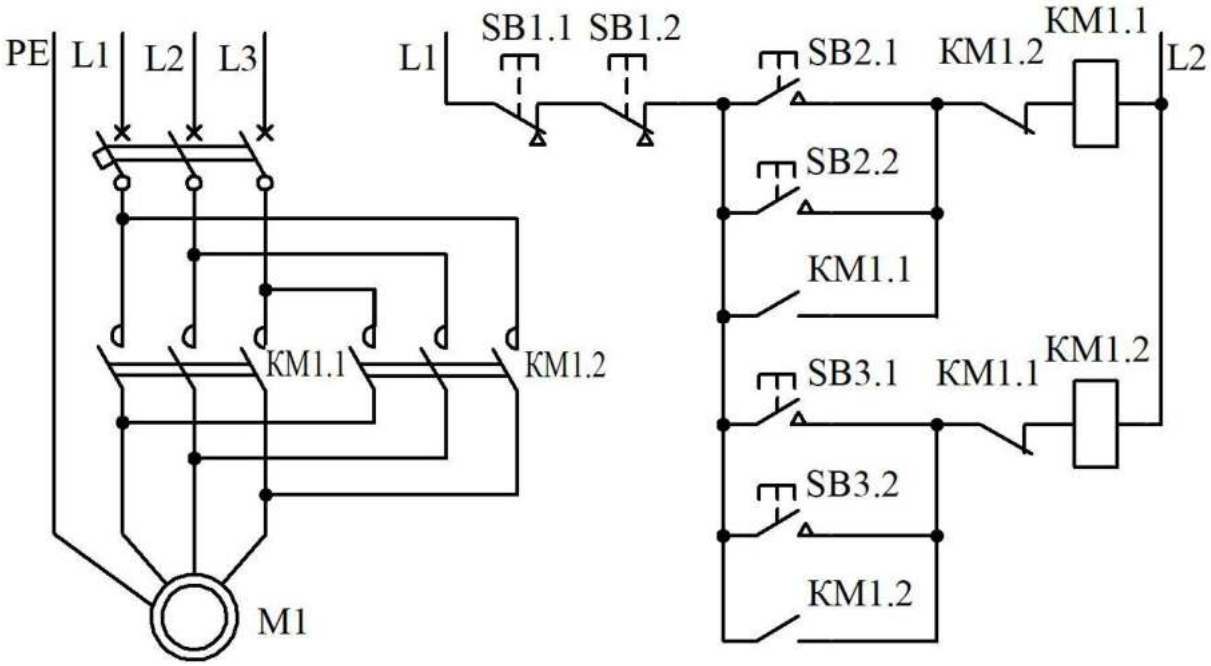


Рисунок 12.3 – Схема реверсирования двигателя
с помощью двух кнопочных постов

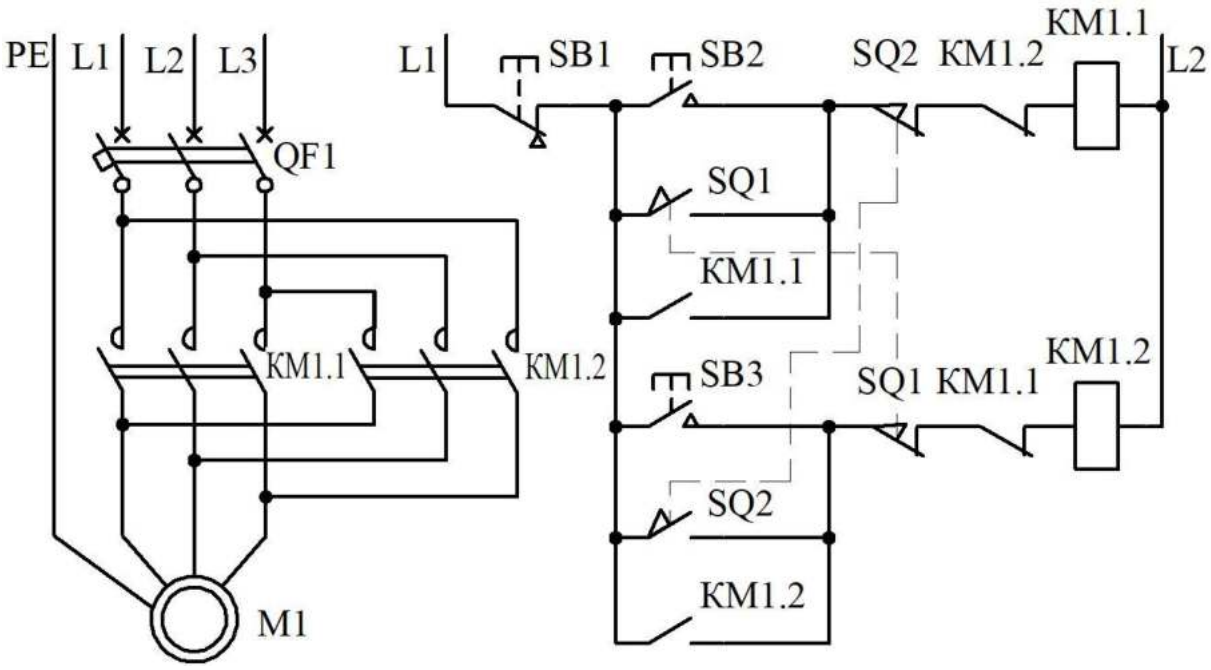


Рисунок 12.4 – Схема реверсирования двигателя
с помощью конечных выключателей

Питание катушки КМ1.1 прекращается либо при нажатии на кнопку SB1, либо при наезде на конечный выключатель SQ2. При этом катушка КМ1.1 обесточивается, а питание получает катушка КМ1.2. Замыкаются силовые контакты КМ1.2, начинается обратное движение, которое продолжается до тех пор, пока не сработает конечный выключатель SQ1.

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться со схемами управления работой асинхронных двигателей (рисунки 12.1–12.4).

2. Собрать схему, представленную на рисунке 12.1, установить заданную выдержку времени и произвести пуск двигателя. Убедиться в том, что отключение двигателя происходит через заданный промежуток времени.

3. Собрать схему (рисунок 12.2) и произвести запуск нажатием кнопки SB2. Отключить двигатель, нажав кнопку SB1. Обеспечить реверсивное движение двигателя нажатием кнопки SB3, отключить двигатель.

4. Оформить отчет по работе.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Электрические схемы, изображенные на рисунках 12.1–12.4.

2. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Поясните работу схемы, представленную на рисунке 12.1.

2. Применение каких устройств позволяет обеспечить реверсирование привода?

3. В каком случае для управления приводом используется несколько кнопочных постов? Как в этом случае включаются пусковые кнопки и кнопки отключения?

4. Поясните работу схемы, представленную на рисунке 12.2.

5. Поясните работу схемы, представленную на рисунке 12.4.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТОРМОЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЛЕ КОНТРОЛЯ СКОРОСТИ

Цель работы: изучение режима торможения противовключением и способов его автоматизации, приобретение умений и навыков управления процессом торможения асинхронного двигателя.

Общие сведения

Торможение противовключением позволяет получать большие тормозные моменты, поэтому его применяют при необходимости быстрой остановки электропривода.

Режим торможения противовключением асинхронного электродвигателя достигается двумя путями:

- изменением порядка чередования фаз;
- введением реостата в цепь ротора.

Ротор электродвигателя вращается против направления вращения поля статора, поэтому:

$$S = \frac{\omega_1 - (-\omega_2)}{\omega_1} \rangle\ 1. \qquad (13.1)$$

Рассмотрим процесс торможения противовключением сменой порядка чередования фаз. Пусть электродвигатель работает на характеристике 1 (рисунок 13.1) с угловой скоростью $\omega_н$ и моментом $M_н$, что соответствует точке А. После отключения двигателя и смене чередования фаз изменяется направление вращения магнитного поля. Ротор по инерции продолжает вращаться. При этом создается момент, противоположный по знаку первоначальному, и так как скорость двигателя мгновенно измениться не может, и электродвигатель переходит в точку B_1 и оказывается в режиме противовключения на характеристике 2. Под действием тормозного момента скорость ротора уменьшается до нуля (точка $К_1$). Если в этот момент не отключить двигатель, произойдет его реверсирование.

В асинхронных двигателях с фазным ротором момент и ток торможения противовключением можно регулировать введением в цепь ротора реостата $r_т$. (характеристика 3 на рисунке 13.1).

Торможение противовключением возможно в подъемном устройстве с активным статическим моментом сопротивления $M_с$. Если при подъеме груза с угловой скоростью вращения ω_1 в цепь ротора включить достаточное по величине сопротивление $R_{д2}$ (рисунок 13.2), возникает новая характеристика 3. Статический момент сопротивления, создаваемый грузом, превысит наибольшее значение вращающего момента двигателя $M_к$ и под действием избыточного статического момента начнется опускание груза со скоростью $\omega_с$.

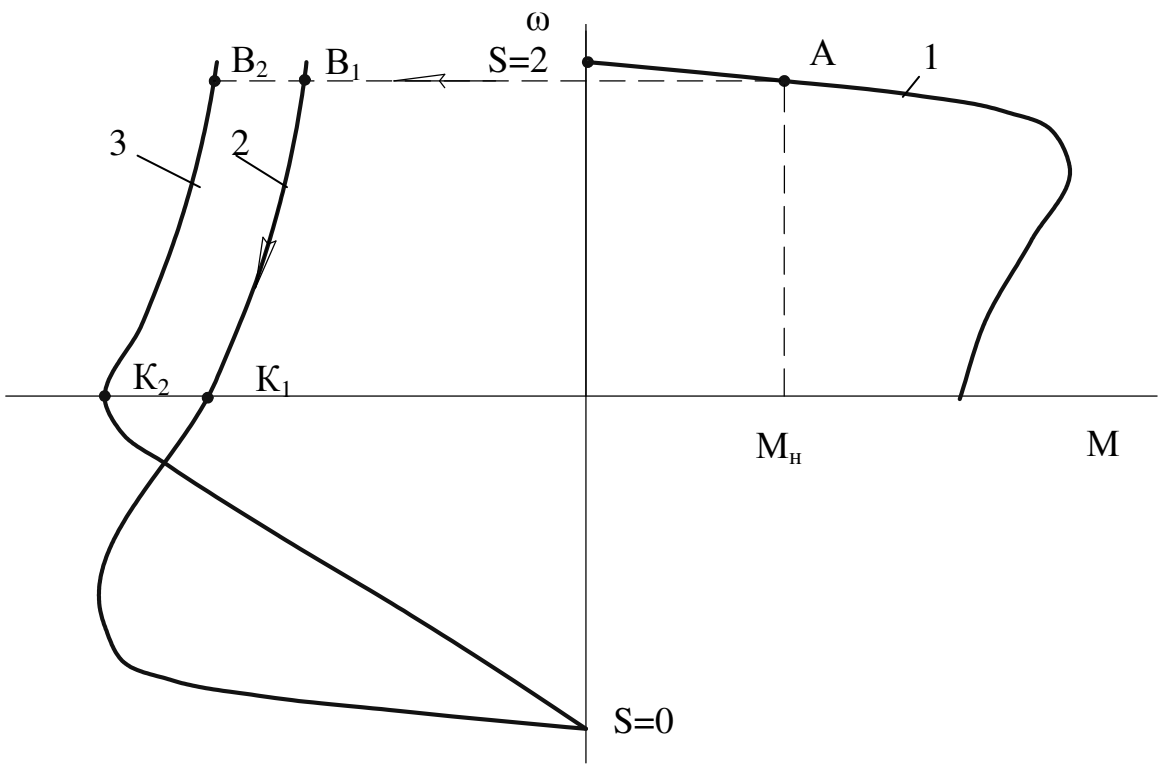
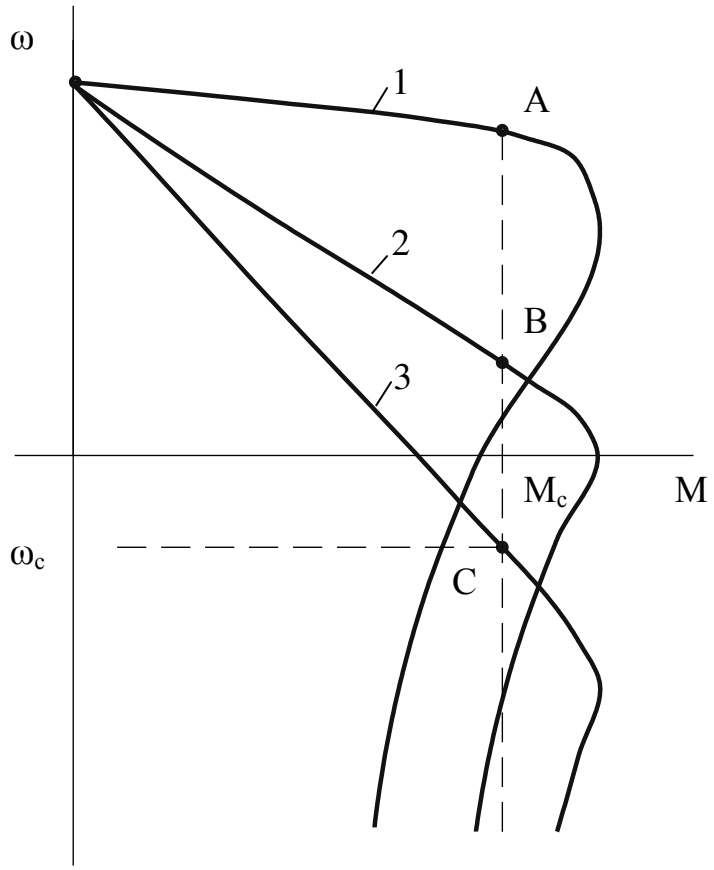


Рисунок 13.1 – Торможение противовключением изменением порядка чередования фаз



1 – естественная; 2, 3 – тормозные при введении добавочных сопротивлений

Рисунок 13.2 – Механические характеристики АД

Так как при скорости, равной нулю, момент электродвигателя меньше статического момента сопротивления M_c, груз увлекает ротор в направление против поля, при этом ЭДС и ток ротора нарастают.

Изменением сопротивления в цепи фазного ротора можно регулировать скорость опускания груза. С увеличением тормозного сопротивления скорость опускания груза возрастает.

В схемах управления электроприводами в тормозных режимах целесообразно использовать реле контроля скорости (РКС). Рассмотрим конструкцию и принцип работы РКС.

Основными элементами реле контроля скорости являются постоянный магнит 1 (рисунок 13.3) и короткозамкнутая клетка 2, аналогичная короткозамкнутой обмотке ротора асинхронного двигателя.

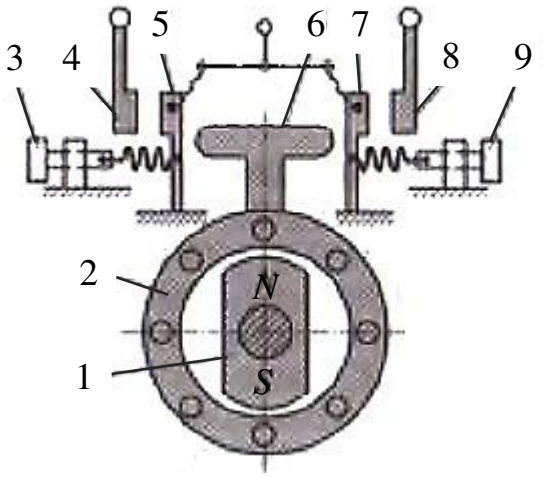


Рисунок 13.3 – Конструкция РКС

Вал постоянного магнита 1 соединен с валом двигателя и вращается внутри беличьей клетки 2, в стержнях которой индуцируются токи. Эти токи взаимодействуют с вращающимся магнитным полем постоянного магнита и создают электромагнитный момент. Короткозамкнутая клетка под действием этого момента поворачивается и упором 6 воздействует на контакты 5 или 7, вызывая их замыкание с контактами 4 или 8 (в зависимости от направления вращения ротора двигателя).

При торможении двигателя частота вращения постоянного магнита 1 уменьшается и при достижении значения, равного 5–10% от номинальной частоты вращения двигателя, электромагнитный момент, действующий на подвижную часть реле скорости, уменьшается до значения, при котором замкнутая пара контактов под действием пружин, соединенных с винтами 3 или 9, размыкается. При этом процесс торможения прекращается, исключая возможность реверсирования двигателя.

Частоту вращения, при которой срабатывает реле, можно устанавливать посредством регулировочных винтов пружин 3 и 9.

Торможение противовключением нереверсивного электропривода можно осуществить по схеме, изображенной на рисунке 13.4. Схема работает следующим образом. Пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки SB2. При этом получает питание катушка магнитного пускателя КМ1.1. Замыкающие контакты КМ1.1 шунтируют пусковую кнопку, а размыкающие размыкаются в цепи магнитного пускателя КМ1.2. Через замкнувшиеся силовые контакты КМ1.1 питание поступает на двигатель, ротор двигателя начинает вращаться. Одновременно с ним начинает вращаться и постоянный магнит РКС. Когда скорость вращения постоянного магнита достигает величины, при которой момент становится достаточным для преодоления сил упругости

пружины, короткозамкнутая клетка проворачивается по направлению вращения ротора, упор воздействует на контакты. Контакты SR1.1 замыкаются, тем самым подготавливают к работе цепь питания магнитного пускателя КМ1.2.

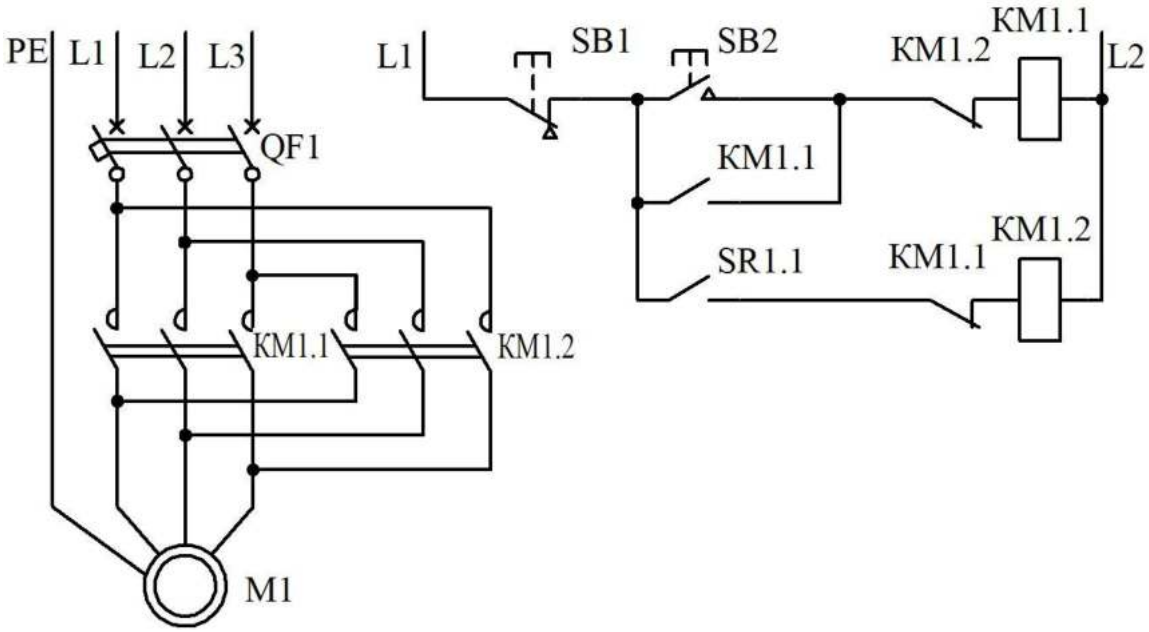


Рисунок 13.4 – Схема управления торможением противовключением нереверсивного электропривода

Для остановки двигателя необходимо нажать на кнопку SB1. При этом катушка КМ1.1 обесточится и ее размыкающие контакты замкнутся в цепи катушки КМ1.2. Так как скорость мгновенно измениться не может, контакты SR1.1 будут оставаться замкнутыми, катушка КМ1.2 получит питание. Это приведет к тому, что замкнутся силовые контакты КМ1.2, на двигателе изменится чередование фаз. Будет происходить процесс торможения двигателя. При приближении скорости к нулю, момент воздействующий на беличью клетку РКС также уменьшится. Упор установится в нейтральное положение, контакты SR1.1 разомкнутся. Таким образом, реверсирования двигателя не произойдет.

Схема управления торможением противовключением реверсивного электропривода осуществляется по схеме 13.5. Скорость вращения ротора двигателя при прямом и обратном вращении контролируется соответственно контактами SR1.1 и SR2.1.

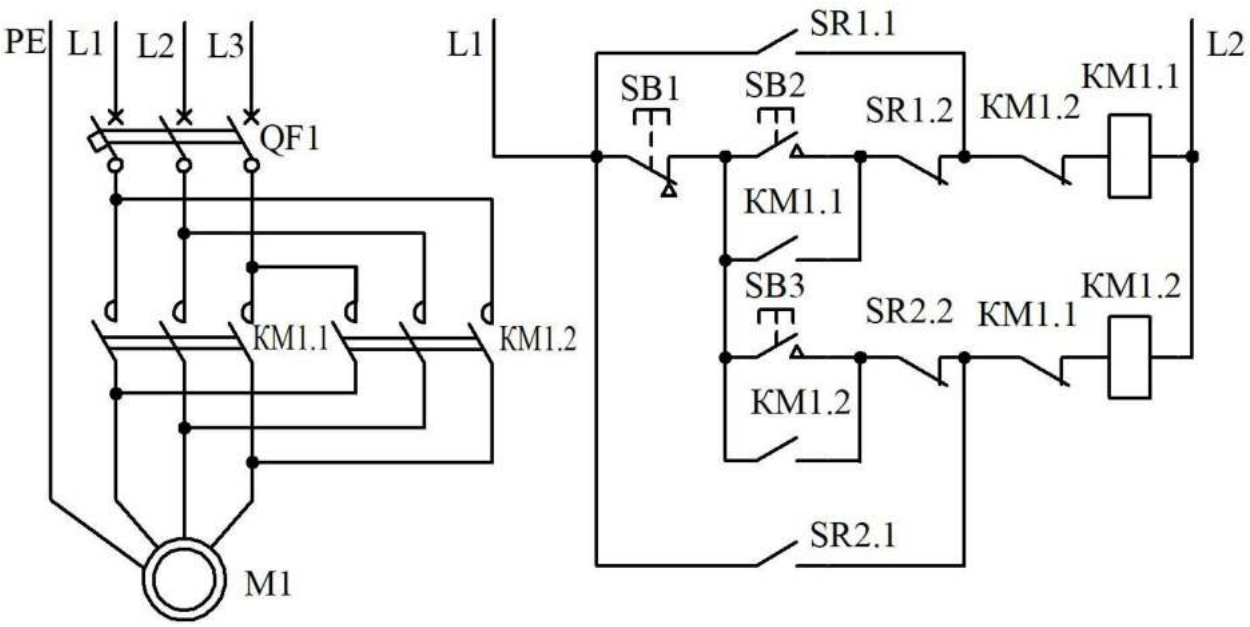


Рисунок 13.5 – Схема управления торможением противовключением реверсивного электропривода

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. Изучить возможные способы торможения противовключением.
2. Изучить конструкцию и принцип действия реле контроля скорости.
3. Собрать схему, изображенную на рисунке 13.4. Произвести пуск и торможение электропривода по этой схеме.
4. Собрать схему управления торможением противовключением реверсивного электропривода (рисунок 13.5). Произвести пуск и торможение по этой схеме.
5. Оформить отчет по работе.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Электрические схемы, изображенные на рисунках 13.4 и 13.5.
2. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Перечислите способы торможения противовключением. Поясните, как они осуществляются.
2. Изобразите механические характеристики в двигательном и тормозном режимах.
3. Каким образом можно регулировать момент и ток торможения двигателей с фазным ротором?
4. Поясните конструкцию и принцип работы реле контроля скорости.
5. Какая точка механической характеристики соответствует моменту срабатывания реле контроля скорости?
6. Поясните работу схемы управления, изображенную на рисунке 13.4.
7. Поясните работу схемы управления, изображенную на рисунке 13.5.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

АВТОМАТИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: изучение режима динамического торможения асинхронного двигателя и способов его автоматизации, приобретение умений и навыков управления процессом торможения асинхронного двигателя.

Общие сведения

Одним из способов электрического торможения является динамическое торможение. Оно осуществляется отключением обмотки статора от сети трехфазного переменного тока и её подключением к сети постоянного тока. На рисунке 14.1 показана принципиальная электрическая схема, позволяющая осуществить режим динамического торможения электропривода.

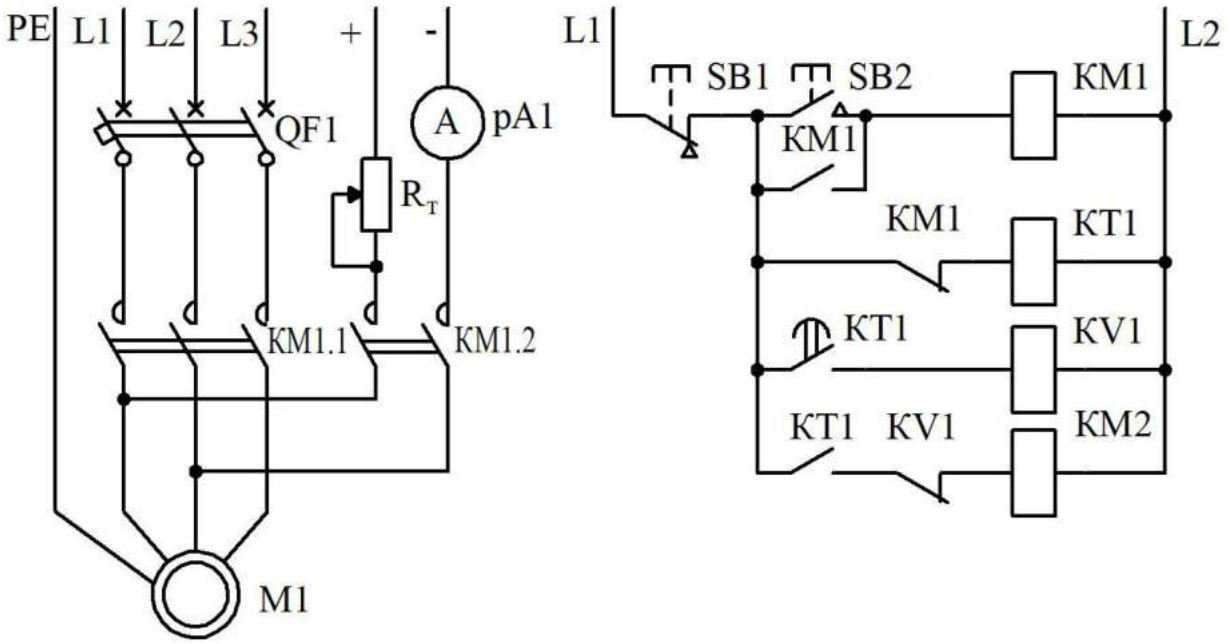


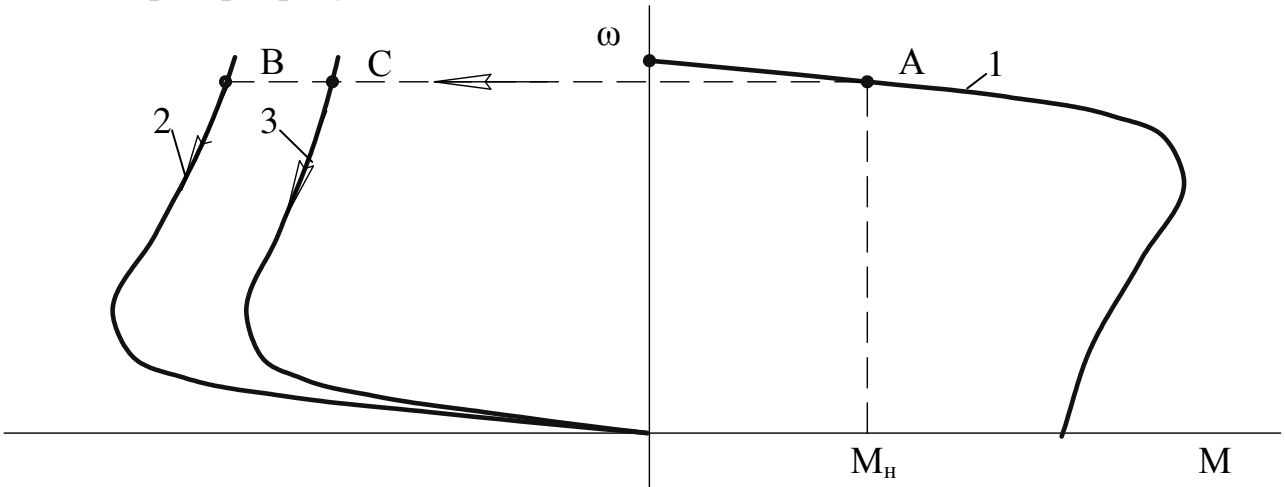
Рисунок 14.1 – Схема электрическая принципиальная автоматического управления процессом динамического торможения

Схема работает следующим образом. При нажатии на кнопку SB2 питание получает катушка магнитного пускателя KM1. Блок-контакты KM1 шунтируют пусковую кнопку, а силовые контакты KM1 подключают двигатель к сети переменного напряжения. Двигатель начинает работать. Размыкающие контакты KM1 исключают возможность подачи питания на реле времени KT1.

Для отключения двигателя необходимо нажать на кнопку SB1. Катушка магнитного пускателя KM1 обесточится, двигатель отключится от клемм L1, L2, L3. Кроме того, размыкающие контакты KM1 замкнутся в цепи реле KT1. Его контакты мгновенно сработают в цепи катушки магнитного пускателя KM2. KM2 получит питание и подключит двигатель к сети постоянного напряжения. По статору будет протекать постоянный ток торможения $I_т$.

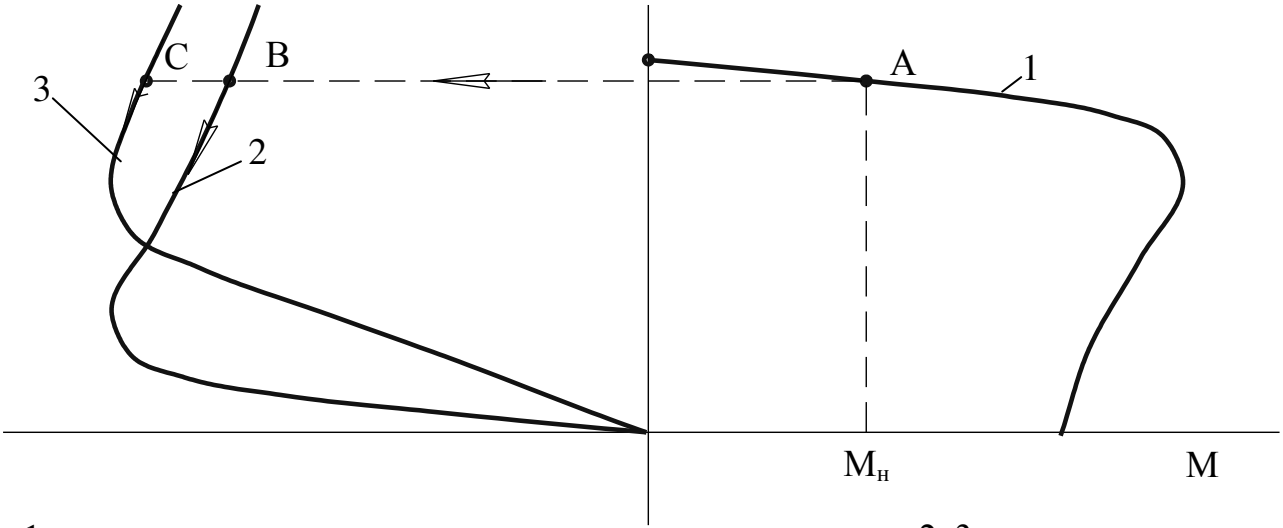
Возникает тормозной момент, который является результатом взаимодействия переменного тока ротора с неподвижным полем статора. Через выдержку времени замкнутся контакты КТ1 в цепи промежуточного реле KV1, которое своими размыкающими контактами отключит магнитный пускатель КМ2. Двигатель будет отключен от сети постоянного напряжения.

Для регулирования тока и момента торможения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором используется сопротивление торможения $R_т$, включаемое в цепи статора. Механические характеристики, иллюстрирующие данный способ регулирования тормозного момента, изображены на рисунке 14.2. У двигателей с фазным ротором момент торможения может регулироваться также за счет введения дополнительного сопротивления в цепь ротора (рисунок 14.3).



1 – естественная характеристика в двигательном режиме; 2, 3 – характеристики в режиме динамического торможения при регулировании тока торможения

Рисунок 14.2 – Механические характеристики АД



1 – естественная характеристика в двигательном режиме; 2, 3 – характеристики в режиме динамического торможения при введении дополнительного сопротивления в цепь ротора

Рисунок 14.3 – Механические характеристики АД

Для осуществления динамического торможения обмотки статора включаются по одной из схем, изображенной на рисунке 14.4. При выборе схемы соединения обмоток статора в процессе динамического торможения руководствуются следующим. Схемы, изображенные на рисунке 14.4 *а*, *б*, *в*, *г* просты, однако ток по фазам распределен неравномерно. В схеме рисунка 14.4 *д* по фазам протекает одинаковый по величине постоянный ток. Её недостатком является сложность схемы переключения обмоток, что ведет к её удорожанию. На практике чаще всего используются схемы рисунка 14.4 *а* и 14.4 *г*.

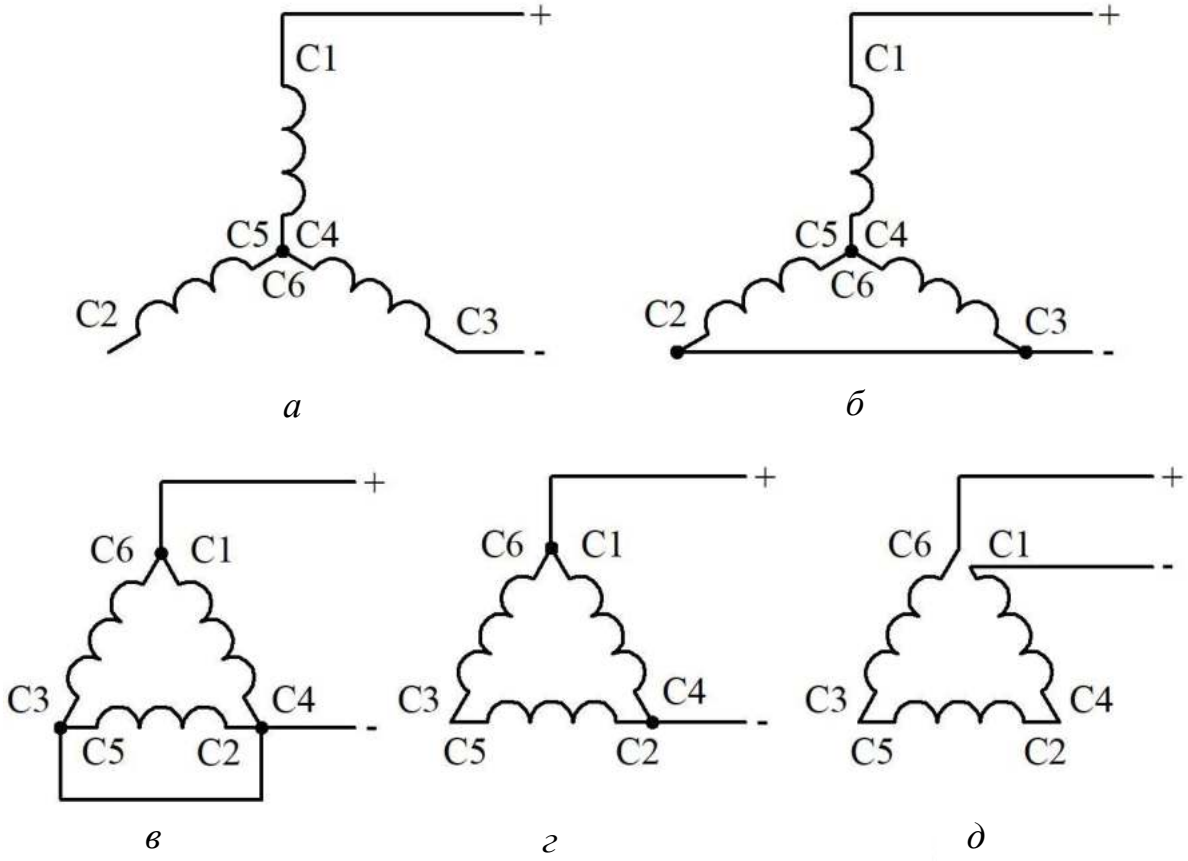


Рисунок 14.4 – Схемы подключения обмоток статора при динамическом торможении

Программа и методика выполнения лабораторной работы

1. Изучить возможные схемы динамического торможения электродвигателя и схемы включения статорных обмоток при динамическом торможении.

2. Собрать схему автоматического управления динамическим торможением асинхронного электродвигателя, представленную на рисунке 14.1. Произвести пуск двигателя и его торможение по этой схеме.

3. С помощью реостата $R_т$ подобрать величину тормозного тока. Тормозной ток должен быть по величине таким, чтобы процесс торможения заканчивался в момент отключения обмотки статора от сети постоянного тока. Повторить пуск двигателя и его торможение.

4. Оформить отчет по работе.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Электрические схемы, изображенные на рисунках 14.1 и 14.4.
2. Краткие выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Поясните, как осуществляется процесс динамического торможения.
2. Каким образом можно регулировать момент торможения у двигателей с короткозамкнутым ротором?
3. Каким образом можно регулировать момент торможения у двигателей с фазным ротором?
4. Поясните работу схемы, изображенной на рисунке 14.1.
5. Приведите примеры схем включения обмоток статора при динамическом торможении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов А.П. Электропривод в сельском хозяйстве: учебное пособие / А.П. Епифанов, А.Г. Гущинский, Л.М. Малайчук. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 224 с. – ISBN 978-5-8114-1020-0. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/130484.

2. Епифанов А.П. Электропривод: учебник / А.П. Епифанов, Л.М. Малайчук, А.Г. Гущинский. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 400 с. – ISBN 978-5-8114-1234-1. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/168426.

3. Никитенко Г.В. Электропривод производственных механизмов: учебное пособие / Г.В. Никитенко. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 208 с. – ISBN 978-5-8114-1468-0. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/211193.

4. Фролов Ю.М. Проектирование электропривода промышленных механизмов: учебное пособие / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. – Санкт-Петербург: Лань, 2014. – 448 с. – ISBN 978-5-8114-1571-7. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/44843.

5. Оськин С.В. Электрический привод: учебник для вузов / С.В. Оськин, Н.И. Богатырев. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – 490 с.

6. Методические указания по выполнению лабораторных работ на лабораторном стенде НТЦ-24 «Электропривод». – Могилев: НТП «Центр», 2011. – 81 с.

7. Электропривод: практикум / Е.А. Шабаев, Н.Е. Пономарева, Д.М. Таранов, А.А. Бабенко, О.П. Болтрик. – Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2013. – 94 с.

8. Электрический привод. Исследование электропривода постоянного тока и асинхронного электропривода: лабораторный практикум / Е.А. Шабаев, Н.Е. Пономарева, О.П. Болтрик Д.М. Таранов, А.А. Бабенко. – Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2013. – 129 с.

9. ГОСТ 2.702-2011. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения электрических схем. – М.: Стандартинформ, 2011. – 23 с.

Учебное издание

Пономарёва Наталья Евдокимовна
кандидат технических наук, доцент

Шабаев Евгений Адимович
кандидат технических наук, доцент

Беленов Виталий Николаевич
кандидат технических наук

Романовец Михаил Михайлович

Электропривод

Лабораторный практикум

Редактор Н.П. Лучинкина
Компьютерная верстка Н.В. Гвоздик
Художественный редактор С.П. Вдовикина

Подписано в печать 15.04.2024 г.
Формат 60×84/16. Усл. п. л. 5,2. Тираж 50 экз. Заказ № 23.

Отдел информационных технологий и издательской деятельности
Азово-Черноморского инженерного института – филиала
ФГБОУ ВО Донской ГАУ
347740, г. Зерноград Ростовской области, ул. Советская, 15.