МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ,
НАУКИ И КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ОРДЕНОВ ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

К. Л. Пузевич, С. И. Козлов

ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по аграрному техническому образованию
в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений высшего образования
по специальности 6-05-0812-01 Техническое обеспечение
производства сельскохозяйственной продукции*

Горки
Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия
2026

УДК 621.313(075.8)
ББК 31.26я76
П88

Рекомендовано методической комиссией
факультета механизации сельского хозяйства
27.05.2025 (протокол № 9)
и Научно-методическим советом
Белорусской государственной сельскохозяйственной академии
28.05.2025 (протокол № 10)

Авторы:
кандидат технических наук, доцент *К. Л. Пузевич*;
кандидат технических наук, доцент *С. И. Козлов*

Рецензенты:
кандидат технических наук, доцент *И. В. Дубень*;
кандидат технических наук, доцент *А. И. Филиппов*

Пузевич, К. Л.

П88 Электропривод и электрооборудование. Лабораторный практикум : учебно-методическое пособие / К. Л. Пузевич, С. И. Козлов. – Горки : Бел. гос. с.-х. акад., 2026. – 201 с.
ISBN 978-985-882-909-4.

Приведены рекомендации по изучению теоретического материала, описание лабораторных установок, порядок выполнения лабораторных работ, методика обработки опытных данных, список рекомендуемой литературы.

Для студентов учреждений высшего образования по специальности 6-05-0812-01 Техническое обеспечение производства сельскохозяйственной продукции.

УДК 621.313(075.8)
ББК 31.26я76

ISBN 978-985-882-909-4

© Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2026

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы, приведенные в данном пособии, преследуют цель глубокого изучения устройства, принципа действия и выбора электродвигателей для привода рабочих машин и установок, аппаратов управления и защиты, вопросов использования электрических установок по применению электрической энергии в технологических процессах сельскохозяйственного производства и получения практических навыков в их подключении к электрической сети, наладке и правильной эксплуатации. Пособие будет также полезным для самостоятельной учебной работы студентов и молодых специалистов.

Правила выполнения лабораторных работ. Приступая к выполнению цикла лабораторных работ, каждый студент обязан изучить правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ по электроприводу и электрооборудованию. Далее расписаться в журнале инструктажа по технике безопасности.

Предварительная подготовка к самостоятельному выполнению каждой лабораторной работы состоит в изучении методических указаний к данной лабораторной работе и соответствующего теоретического материала по конспекту и учебным пособиям. Необходимо понять физическую сущность исследуемых процессов, изучить аналитические или графические зависимости, характеризующие эти процессы, ознакомиться с конструкциями и схемами устройства установок, применяемых в производстве.

К выполнению лабораторной работы каждый студент должен тщательно подготовиться: внимательно ознакомиться с ее содержанием, методикой проведения опытов, оборудованием рабочих мест и измерительной аппаратурой, прочитать соответствующие разделы литературных источников. Рекомендуется заранее подготовить форму отчета, содержащую наименование и цель работы, необходимые электрические схемы, расчетные формулы, таблицы для записи наблюдений.

Приступая к выполнению лабораторной работы, необходимо подробно ознакомиться с оборудованием рабочего места, его назначением, основными паспортными данными всех применяемых машин и аппаратов, пределами измерения приборов и ценой деления их шкал. Лишь после знакомства с оборудованием рабочего места и после проверки преподавателем степени подготовленности к занятиям (путем собеседования) можно приступать к выполнению работы. Неподготов-

ленные к выполнению работы студенты к занятиям не допускаются и выполняют работу в срок, указанный преподавателем.

После этого следует проверить правильность сборки электрической схемы студентами, выполняющими данную работу. При необходимости сборки схем сначала следует собрать последовательные (токовые) цепи, а затем присоединить параллельные цепи: вольтметры, параллельные обмотки ваттметров и счетчиков, цепи управления и сигнализации. При этом необходимо обращать внимание на положение рукояток аппаратов управления (должны находиться в отключенном состоянии), целостность соединительных проводов, плотность контактов, соответствие приборов роду тока и пределам изменения измеряемых величин.

Включать собранную схему можно только после проверки ее преподавателем. Это правило необходимо соблюдать также в том случае, если в схеме произведены какие-либо изменения.

При включении установки необходимо проверить направление вращения валов электрических и рабочих машин, правильность показаний измерительных приборов, четкость работы пускорегулирующей аппаратуры, приборов автоматического управления и т. д. Только убедившись в готовности установки к работе, можно приступать к проведению предусмотренных программой опытов.

Во время выполнения лабораторных работ студенты должны строго выполнять правила техники безопасности и соблюдать учебную дисциплину. Лица, нарушающие правила безопасности, отстраняются от выполнения работы, самостоятельно изучают правила электробезопасности и выполняют реферат по технике безопасности.

Во время исследований следует внимательно наблюдать за показаниями приборов и режимом работы всего оборудования. Отсчеты по приборам ведут в одном, заранее установленном порядке, записывая в первую очередь те параметры, которые при работе изменяются наиболее быстро. Проводить испытания нужно быстро. Следует помнить, что небрежность в отсчете показаний приборов и записях приводит к неправильным выводам о характеристиках испытываемого оборудования и машин. При наличии грубых ошибок в результатах измерений опыт необходимо повторить.

Проводя исследование, нужно сравнить полученные величины и зависимости с общими закономерностями, известными по литературным источникам. Если есть аналогия, то опыт прошел успешно, если нет – опыт следует повторить и попытаться самостоятельно разобраться в причинах ошибок, при необходимости – обратиться к преподава-

телю. Следовательно, после выполнения опыта необходимо приблизительно оценить его результаты и только при удовлетворенности ими переходить к следующему опыту.

На каждом рабочем месте должны быть организованы звенья из 2…3 человек. При выполнении лабораторной работы звеном студенты должны распределять обязанности между собой и в процессе работы меняться ими. При этом каждый студент обязан активно вникать в смысл проводимых исследований.

По окончании всех опытов лабораторной работы необходимо показать преподавателю полученные результаты и с его разрешения разобрать электрическую схему. Приборы и оборудование следует оставить на рабочем месте в том положении, в каком они находились перед началом занятий, затем привести в порядок свое рабочее место.

После этого необходимо приступить к оформлению отчета, который в дальнейшем подлежит защите. Уход из лаборатории до окончания занятий не разрешается. Время, отводимое студентам для выполнения лабораторной работы, равно двум академическим часам.

По каждой лабораторной работе студент составляет отчет. При составлении отчета рекомендуется следующая схема. На титульном листе отчета указываются: название кафедры, номер и наименование работы, фамилия и инициалы исполнителя, факультет, курс, группа, дата выполнения работы. На том же листе ниже пишется: «К работе допущен», «Работа выполнена», «Работа зачтена». В первой строчке преподаватель, ведущий занятия, ставит свою подпись после проверки теории выполняемой работы.

Внимание! ***Студент, не подготовленный к занятиям, к выполнению работы не допускается.***

Вторая и последующая страницы отчета должны содержать:

1) цель выполняемой работы;

2) электрическую схему лабораторной установки;

3) рабочие формулы;

4) таблицы результатов измерений и вычислений величин с указанием их единиц;

5) графики (при необходимости);

6) ответы на контрольные вопросы.

Произведя все необходимые вычисления и оформив отчет, студент отчитывается по лабораторной работе.

Для получения зачета по лабораторной работе необходимо знать цель работы, порядок ее выполнения, понимать процессы и явления, которые изучаются в данной работе, знать принципиальную схему эксперимента и принцип действия приборов.

Правила безопасности при выполнении лабораторной работы. При выполнении лабораторной работы необходимо строго выполнять правила техники безопасности. В электротехнической учебной лаборатории приходится иметь дело с открытыми схемами, вращающимися электрическими и рабочими машинами и при несоблюдении элементарных правил электробезопасности можно попасть под напряжение.

Внимание! Перед началом работы в лаборатории студент получает у преподавателя инструктаж по технике безопасности, обращая при этом внимание на возможные опасности при ее выполнении. После получения инструктажа по технике безопасности студент расписывается в журнале в том, что с правилами безопасности работ он ознакомлен и обязуется их выполнять.

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо внимательно ознакомиться с лабораторным заданием, правилами выполнения работ, оборудованием и материалами рабочего места, проверить исправность ограждений, предохранительных устройств. Перед сборкой схемы необходимо убедиться, что автоматический выключатель силового щитка, от которого подается напряжение на схему, находится в выключенном состоянии. Каждый студент группы должен знать, где находится аппарат, с помощью которого при необходимости можно отключить напряжение по всей лаборатории.

Работая в лаборатории, нужно быть внимательным и выполнять следующие правила безопасности:

1. Нельзя применять провода с поврежденной изоляцией, а также приборы с неисправными клеммами.

2. Крепление проводов к контактам аппаратов и щитков должно быть достаточно плотным, наконечники проводов при сборке цепи должны надежно зажиматься клеммами.

3. Провода в схеме нужно располагать таким образом, чтобы они как можно меньше перекрещивались и запутывались и легко можно было установить, к какому аппарату присоединен каждый провод. Необходимо, чтобы провода не попадали на подвижные части машин и аппаратов.

4. После сборки схемы с рабочего места нужно убрать все лишние провода, аппараты и приборы.

5. Включение цепи или установки можно производить только после проверки ее преподавателем и с его разрешения.

6. Студент, включающий схему под напряжение, должен предупредить об этом членов своего звена и проверить, не прикасается ли кто-нибудь к токоведущим или вращающимся частям машин.

7. Перед включением вращающихся электрических и рабочих машин необходимо убедиться в том, что они защищены от прикосновений.

8. Нельзя прикасаться рукой или ногой к вращающимся частям электрических и рабочих машин или производить их торможение.

9. При высокой температуре нагрева деталей, колб ламп накаливания, открытых нагревательных элементов и поверхностей резисторов запрещается прикасаться к ним даже после отключения нагрева, так как это может привести к ожогам, а разрушение стеклянной колбы – к поражению осколками стекла.

10. Во время проведения испытаний нужно быть внимательным и осторожным, не отвлекаться на посторонние дела и разговоры.

11. Всякие переключения в схемах можно производить только после отключения от сети, а при работе с электрической установкой, имеющей вращающиеся части, – только после полной их остановки. Категорически запрещается исправлять схему при включенном напряжении и вращающихся машинах.

12. При обнаружении каких-либо признаков ненормальной работы оборудования (посторонний шум в машинах, дым, запах гари, искрение в местах соединения проводов, обрыв проводов и т. п.) следует немедленно отключить схему и доложить о случившемся преподавателю.

13. Повторное включение схем и установок под напряжение после внесенных изменений можно выполнять только с разрешения преподавателя и после предупреждения об этом студентов, работающих на данном рабочем месте.

14. Запрещается облокачиваться на элементы схемы, оборудование и приборы, перешагивать через вращающиеся части машин.

15. Запрещается выполнять лабораторную работу одному. Обязательно присутствие второго лица – для оказания помощи при несчастном случае, пожаре и т. д.

16. Запрещается загромождать рабочее место посторонними предметами (особенно металлическими), а также шапками, пальто, портфелями и сумками. Запрещается в аудитории находиться в пальто и головном уборе, а также вешать их на лабораторное оборудование.

17. Результаты опытов нужно показать преподавателю и только с его разрешения разбирать схему, предварительно отключив ее.

18. Следует предупреждать нарушения требований безопасности со стороны товарищей.

19. Включение главного рубильника на силовом шкафу производится только преподавателем или лаборантом.

20. Студент должен бережно относиться к оборудованию лаборатории и государственному имуществу.

21. При несчастном случае следует немедленно оказать первую помощь пострадавшему.

22. После окончания работы студенты должны привести в порядок их рабочее место.

При нарушении указанных правил безопасности или требований преподавателя студент отстраняется от проведения работ и вновь допускается лишь с разрешения деканата. О всякой порче приборов, аппаратов, машин и другого оборудования лаборатории студент обязан сообщить преподавателю. Неумышленные, легко устранимые повреждения или засорение рабочего места студенты должны устранить самостоятельно. За порчу инвентаря и оборудования лаборатории, вызванную несоблюдением указанных правил безопасности, студенты несут материальную ответственность.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный электропривод технологического оборудования пищевой промышленности и АПК : учеб. пособие / М. М. Кожевников, О. В. Понталев, К. Л. Пузевич [и др.] ; под общ. ред. В. А. Шаршунова. – Мн. : Мисанта, 2019. – 436 с.

2. Бородин, И. Ф. Автоматизация технологических процессов : учеб. / И. Ф. Бородин, Ю. А. Судник. – М. : КолосС, 2007. – 344 с.

3. Дайнеко, В. А. Электрооборудование сельскохозяйственного производства : учеб. пособие / В. А. Дайнеко, А. И. Ковалинский. – Мн. : Новое знание, 2008. – 319 с.

4. Дайнеко, В. А. Электрооборудование сельскохозяйственного производства : пособие / В. А. Дайнеко, И. Н. Шаукат. – Мн. : Беларусь, 2011. – 286 с.

5. Дайнеко, В. А. Электрооборудование сельскохозяйственного производства. Практикум : пособие / В. А. Дайнеко, И. Н. Шаукат, Т. Г. Базулина. – Мн. : Беларусь, 2011. – 271 с.

6. Гайшун, И. А. Основы теории сельскохозяйственного электропривода : курс лекций : в 3 ч. / И. А. Гайшун. – Горки : БГСХА, 2010. – Ч. 3. – 52 с.

7. Ерошенко, Г. П. Эксплуатация электрооборудования : учеб. / Г. П. Ерошенко. – М. : Колос, 2008. – 344 с.

8. Электропривод и электрооборудование : учеб. / А. П. Коломиец, Н. П. Кондратьева, И. Р. Владыкин [и др.]. – М. : КолосС, 2007. – 328 с.

9. Кленин, Н. И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины : учеб. / Н. И. Кленин, В. Г. Егоров. – М. : КолосС, 2007 – 464 с.

10. Радченко, Г. Е. Автоматизация сельскохозяйственной техники : учеб. пособие / Г. Е. Радченко. – Мн. : Технопринт, 2005. – 362 с.

11. Радченко, Г. Е. Автоматизация сельскохозяйственной техники : учеб. пособие / Г. Е. Радченко. – Мн. : Технопринт, 2011. – 496 с.

12. Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий : практикум / В. С. Сергеев, А. В. Кузьмицкий, И. А. Гайшун, И. В. Дубень. – Мн. : Техноперспектива, 2005. – 224 с.

Лабораторная работа 1.
ПОДГОТОВКА К ПУСКУ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ВКЛЮЧЕНИЕ ЕГО В РАБОТУ

Цель работы:

1. Изучить конструкцию трехфазного асинхронного электродвигателя и получить практические навыки его разборки и сборки.

2. Изучить основные приемы подготовки к пуску трехфазного асинхронного двигателя.

3. Ознакомиться с эксплуатационными способами обнаружения электрических повреждений в двигателях и маркировкой выводов обмоток.

4. Ознакомиться со схемами ручного включения электродвигателя в сеть.

При выполнении работы необходимо:

1. Изучить устройство трехфазных асинхронных электродвигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором серий 4А и АИР.

2. Ознакомиться с техническими данными электрических двигателей, имеющихся на рабочем месте.

3. Изучить основные приемы подготовки к пуску трехфазного асинхонного электродвигателя переменного тока.

4. Ознакомиться и выполнить проверку электрической части двигателя: отсутствие обрыва, состояние изоляции двигателя – и маркировку выводов фазных обмоток методами подбора (пробного включения) и трансформации.

5. Изучить эксплуатационные способы обнаружения электрических повреждений в электродвигателе.

6. Ознакомиться со схемами ручного включения электродвигателя в сеть и пустить его в ход (вхолостую) по схеме звезда.

Объект и средства исследования. На рабочем месте расположена лабораторная установка, в которой ***объектом изучения и исследования***[1] является трехфазный асинхронный электродвигатель переменного тока с короткозамкнутым ротором серии АИР. Основные технические данные электродвигателя: тип – АИР90L4У3; номинальная мощность – 2,2 кВт, соединение фаз – треугольник/звезда; номинальное

[1]В лабораторных установках могут быть использованы объекты и средства исследования с иными параметрами при соблюдении необходимой точности измерений. Это относится ко всем лабораторным работам.

напряжение – 220/380 В; номинальный ток – 8,6/5,0 А; коэффициент полезного действия $\eta_н = 81$ %; коэффициент мощности cos φн = 0,83; частота вращения $n_н = 1\,400$ об/мин; режим работы – *S*1; класс изоляции – *F*; степень защиты – *IP*54.

Средствами исследования служат: мегаомметр типа М4100/3 магнитоэлектрической системы на 500 В с диапазонами измерений 0…1 000 кОм и 0…∞ МОм; контрольная лампочка накаливания мощностью 40 Вт и напряжением 245…255 В; вольтметр типа Э545 электромагнитной системы с пределами измерения 75, 150, 300, 450, 600 В.

1.1. Основные теоретические сведения

Асинхронный электродвигатель является наиболее широко применяемой электрической машиной. Только низковольтные электродвигатели, имеющие мощность от 0,12 до 400 кВт, потребляют в стране более 40 % электрической энергии, вырабатываемой всеми входящими в энергосистемы электрическими станциями.

Наибольшее применение асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором для привода разнообразных машин и механизмов в мелиоративно-строительном производстве объясняется простотой их конструкции, высокой надежностью в эксплуатации и простотой обслуживания. Выборочные обследования отдельных электрифицированных зон показывают, что средняя мощность одного двигателя – 5,5 кВт, при этом среднее количество электродвигателей до 1,0 кВт на предприятиях составляет 10 %, от 1,1 до 3,0 кВт – 45 %, от 3 до 5 кВт – 14,5 %, от 5 до 10 кВт – 19 %, более 10 кВт – 11,5 %.

Технический уровень асинхронных электродвигателей в стране непрерывно повышается. Это обусловливает периодическую замену электродвигателей одних серий другими, более совершенными. Выборочные обследования показывают, что удельный вес электродвигателей старых серий в мелиоративно-строительном производстве все еще достаточно высокий. Если ранее использовались электродвигатели первой единой серии (А, АО), затем второй серии (А2, АО2) и серии 4А, то в настоящее время внедрена новая серия – АИР. Двигатели закрытого обдуваемого исполнения составляют 90,8 % от общего числа установленных электродвигателей, а защищенного – 9,2 %.

Для удовлетворения требований мелиоративно-строительного производства в электродвигателях специализированных исполнений в отдельных диапазонах используются электродвигатели химовлагостойко-

го исполнения мощностью от 0,25 до 4 кВт серии Д (Да...С). Они малошумны, в них применена тропикостойкая изоляция с использованием тепло- и влагостойких материалов. Смазка подшипников заполняется без разборки. Электродвигатели серии Д могут иметь основное исполнение (Да...С), быть с повышенным скольжением (ДаС...С) и многоскоростные.

Для привода осевых вентиляторов в системах автоматического управления микроклиматом выпущены электродвигатели мощностью 0,25, 0,37 и 1,1 кВт типа Д...П.

В настоящее время в мелиоративно-строительное производство поступают электродвигатели новой единой серии АИР, спроектированные с учетом последних достижений науки и техники в рамках международной организации «Интерэлектро». Электродвигатели этой серии по сравнению с серией 4А более совершенны, обладают улучшенными энергетическими показателями, меньшей массой, пониженным уровнем шума и вибрации, более компактные и надежные. Отдельные модификации асинхронных электродвигателей, кроме основного исполнения, охватывают модификации с повышенным скольжением, многоскоростных узкоспециализированных для привода осевых вентиляторов, а также для регулируемых электроприводов.

Установлено, что электродвигателей основного исполнения требуется 33 %, влагоморозостойкого – 10 %, пылезащищенного – 15 % от общего количества. Весьма высокую эксплуатационную надежность должны иметь электродвигатели, используемые для привода технологических машин в мелиоративно-строительном производстве в условиях больших колебаний внешней температуры, наличия пыли, влаги, аммиака, сероводорода, а также особых режимов работы с возможными резкими перегрузками, колебаниями напряжения и т. п.

В настоящее время электротехнической промышленностью выпускается электрооборудование, охватывающее различные условия его использования по характеру окружающей среды, которые определены в ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70. В соответствии с этими стандартами электротехнические изделия, предназначенные для эксплуатации, выпускаются в следующих климатических исполнениях для следующих районов:

У – с умеренным климатом;

ХЛ – с холодным климатом;

ТВ – с влажным тропическим климатом;

ТС – с сухим тропическим климатом;

Т – как с сухим, так и с влажным тропическим климатом;

О – всех на суше (общеклиматическое исполнение).

Кроме того, электрооборудование, выпускаемое промышленностью, предназначается для определенного места размещения при эксплуатации.

Предусмотрено 5 основных категорий размещения:

1-я – для работы на открытом воздухе;

2-я – для работы в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе и имеют сравнительно свободный доступ наружного воздуха (отсутствует прямое воздействие солнечной радиации и атмосферных осадков);

3-я – для работы в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры, влажности и воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе (существенное уменьшение воздействия солнечной радиации, ветра, атмосферных осадков, отсутствие росы);

4-я – для работы в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями (отсутствие прямого воздействия солнечной радиации и отсутствие атмосферных осадков, ветра, а также воздействия песка и пыли наружного воздуха);

5-я – для работы в помещениях с повышенной влажностью, в которых возможно длительное наличие воды или частая конденсация влаги на стенах и потолке.

Электрооборудование, используемое в мелиоративно-строительном производстве, в зависимости от конкретных условий эксплуатации должно иметь определенную степень защиты от соприкосновения с токоведущими и движущимися частями, находящимися внутри оболочки, а также степень защиты встроенного в оболочку оборудования от попадания посторонних тел и проникновения влаги. Степень защищенности серийно выпускаемого электрооборудования определяется по условному буквенному обозначению IP (International Protection) и соответствующим условным цифровым обозначениям, состоящим из двух цифр (например, IP23). Условное обозначение степени защиты оболочек электрического оборудования, согласно ГОСТ 14254-69, содержит следующие данные в указанной ниже последовательности:

а) условные буквы – IP;

б) первая цифра – условное цифровое обозначение степени защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или движущимися частями, находящимися внутри оболочки, а также степени защиты встроенного в оболочку оборудования от попадания твердых посторонних тел (0, 1, 2, 3, 4, 5 или 6);

в) вторая цифра – условное цифровое обозначение степени защиты электрического оборудования, расположенного внутри оболочки, от проникновения воды (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8).

На паспортной табличке (рис. 1.1) асинхронного короткозамкнутого электродвигателя указывается его тип и номинальные данные:

- мощность на валу (кВт);
- линейное напряжение на зажимах (В);
- линейный ток (А);
- частота тока (Hz);
- число оборотов (об/мин);
- КПД (%);
- коэффициент мощности cos φ (косинус угла между векторами напряжения и тока фазы обмотки статора).

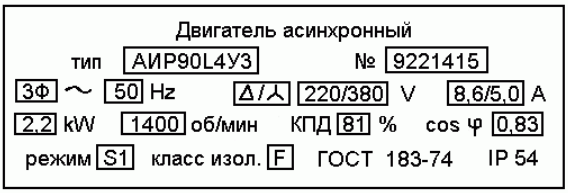


Рис. 1.1. Заводской щиток асинхронного электродвигателя серии АИР с техническим паспортом

Для двигателя с фазным ротором, кроме того, указывается напряжение на контактных кольцах (при неподвижном роторе) и ток обмотки ротора (при номинальном режиме). На паспортной табличке также указаны схема соединения обмотки статора, режим работы, для которого предназначен двигатель, степень защиты, полная его масса (кг), класс изоляции.

Обозначение типа электродвигателя серии АИР (например, АИР90L4У3): А – асинхронный; И – унифицированная серия «Интерэлектро»; Р – привязка мощности к установочным размерам по РС3031-71; С – с повышенным скольжением (если двигатель с нормальным скольжением, то буква отсутствует); 90 – высота оси враще-

ния, мм (50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200 мм); L – установочный размер по длине станины (S, M, L); А – длина сердечника статора (В); 4 – число полюсов (2, 4, 6, 8); У – для умеренного климата (УХЛ, ХЛ, Т, ТОМ, ОМ); 3 – категория размещения (4, 5).

Обозначение типа электродвигателя серии АО2 (например, АО2-42-6СХ): расшифровывается следующим образом (в скобках приведены возможные варианты параметров и условных обозначений): АО – закрытое обдуваемое исполнение, Л – алюминиевый корпус с подшипниковыми щитами; П – с повышенным пусковым моментом (С – с повышенным скольжением); 2 – обозначение новой серии; 4 – порядковый номер наружного диаметра сердечника статора (1…9); 2 – порядковый номер длины сердечника (1, 2); 6 – число полюсов (1, 2, 4, 6, 8); СХ – сельскохозяйственное исполнение.

Обозначение типа электродвигателя серии 4А (например, 4АНА90LВ8У3 или 4АР160S6У3: А – асинхронный; Р – с повышенным пусковым моментом; Н – защищенное исполнение (кроме закрытого обдуваемого, для которого обозначение не дается); А – алюминиевые станина и щиты (Х – алюминиевая станина и чугунные щиты; если станина и щиты чугунные, то буквы отсутствуют); 90 – высота оси вращения, мм (50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 335 мм); L – установочные размеры по длине корпуса (S, M); А – длина сердечника (В); 8 – число полюсов (2, 4, 6); С – сельскохозяйственное исполнение; БС – со встроенной температурной защитой; У – для умеренного климата (УХЛ, ХЛ, Т, О); 3 – категория размещения (3, 4, 5).

Обозначение типа электродвигателя серии Да…С. (например, Да90А6С или ДаС90S6С): Д – серия; а – алюминиевый корпус; С – с повышенным скольжением; 90 – высота оси вращения относительно плоскости крепления, мм (71, 80, 90, 100, 112 мм); А – обозначение длины сердечника статора (В); S – длина станины (S, M, L); 4 – количество полюсов (2, 6, 8); С – сельскохозяйственное назначение.

При установке электродвигателя, полученного со склада, вновь приобретенного или после длительного перерыва в работе, необходимо проверить его механическое и электрическое состояние.

При проверке механической части электродвигателя необходимо:

- тщательно осмотреть корпус, подшипниковые щиты и убедиться в отсутствии трещин;

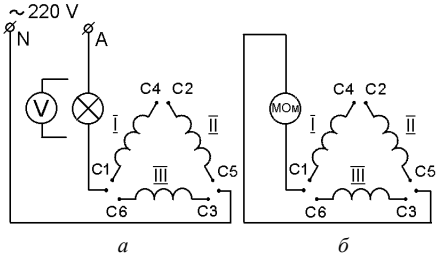
- проверить наличие креплений, затяжку болтов, исправность крышек, фланцев, выводной дощечки и зажимов;

- проверить износ подшипников (радиальный и осевой) путем покачивания ротора от руки;

- проворачиванием ротора от руки убедиться в отсутствии задеваний;

- проверить наличие смазки в подшипниках.

Проверка электрической части двигателя заключается в следующем. Отсутствие обрыва и одновременное определение одноименных обмоток производится при помощи контрольной электрической лампы вольтметра или мегаомметра, для чего собирается последовательная цепь из проверяемой обмотки и измерительного прибора (рис. 1.2). При отсутствии обрыва цепи обмотки лампа горит, вольтметр показывает некоторую величину, а мегаомметр определяет сопротивление, близкое к нулю. В противном случае имеется обрыв или провод от лампы, вольтметра и провод от сети или провода от мегаомметра подключены к концам разных обмоток. В нашем случае используем электрическую лампу. При этом фазы нумеруются и на концы каждой из них вешаются бирки (этикетки) с номерами фаз: С1 и С4 – выводы первой фазы; С2 и С5 – выводы второй фазы; С3 и С6 – выводы третьей фазы. Новое обозначение фаз: U1-U2 – первая, V1-V2 – вторая, W1-W2 – третья. «Концы» и «начала» в каждой обмотке статора необходимо знать для того, чтобы при соединении этих обмоток учесть напряжение витков в каждой обмотке. Название «конец» и «начало» в каждой обмотке условное, но оно учитывает взаимное направление витков у всех трех обмоток. Очевидно, что обозначение всех трех «начал» и трех «концов» можно поменять местами.



а *б*

Рис. 1.2. Схема определения отсутствия обрывов
и принадлежности выводов обмотки фазам статора двигателя
с помощью: *а* – контрольной лампы; *б* – мегаомметра

Затем необходимо проверить состояние изоляции двигателя. Отсутствие замыкания фазных обмоток на корпус (рис. 1.3) определяется

аналогично определению отсутствия обрыва. При отсутствии замыкания лампа не горит, вольтметр не показывает, а мегаомметр показывает некоторую величину сопротивления изоляции (лампа, вольтметр и мегаомметр включаются последовательно с корпусом и обмоткой). При этом к корпусу двигателя присоединяется ноль, а не фазный провод. В нашем случае используется мегаомметр, который одновременно служит для измерения сопротивления изоляции сначала между обмотками и корпусом (рис. 1.3, *б*), а потом между обмотками (рис. 1.4). Нормальная изоляция должна иметь сопротивление не менее 1 000 Ом на 1 В рабочего напряжения. При рабочей температуре сопротивление изоляции может быть ниже сопротивления, измеренного в холодном состоянии. Поэтому в процессе эксплуатации сопротивление следует измерять при рабочей температуре двигателя.

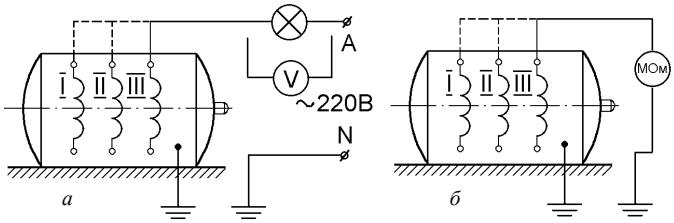


Рис. 1.3. Схема определения отсутствия замыкания фазных обмоток на корпус с помощью: *а* – контрольной лампы, вольтметра; *б* – мегаомметра и для измерения сопротивления изоляции между обмотками и корпусом

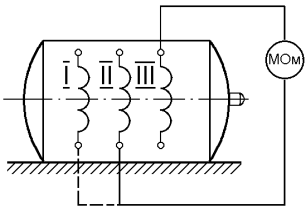


Рис. 1.4. Схема измерения сопротивления изоляции между обмотками

Если сопротивление обмотки не равно нулю, но меньше нормы (наименьшим допускаемым сопротивлением изоляции для двигателей напряжением до 500 В считается величина 0,5 МОм), то это говорит о том, что изоляция отсырела. Такой электродвигатель необходимо просушить и после сушки проверить состояние его изоляции. Сушку изоляции обмоток двигателя можно выполнить способами внешнего нагрева, тока в обмотках, способом потерь.

Внешний нагрев применяют в том случае, если машина сильно остыла. Для этого изоляцию обмоток обдувают горячим воздухом, используя воздуходувки с калориферами, лампы накаливания, лампы инфракрасного излучения с зеркальными отражателями и нагревательные сопротивления. Температуру воздуха поддерживают в пределах 100...110 °С, а мощность нагревательного устройства (в кВт) должна быть численно равна объему камеры (в $м^3$).

Для сушки обмоток способом тока в обмотках можно применять переменный ток пониженного напряжения (в 3...5 раз меньше номинального) или замыканием одной из обмоток отдельных фаз накоротко и подачей к двум другим фазам, соединенным последовательно, пониженного напряжения от сварочных трансформаторов. Ток в обмотках статора регулируют так, чтобы он не превышал номинальной величины в короткозамкнутой обмотке.

Для сушки изоляции обмоток статора электродвигателей любой мощности можно использовать потери мощности на вихревые токи в активной стали. Эти токи образуются в результате создания в стали статора переменного магнитного поля с помощью специальной обмотки, разделяемой по количеству витков на две половины и наматываемой снаружи по двум торцам статора. Намагничивающий ток выбирают в пределах 60...200 А, а общее число витков обмотки – от 6 до 28. Напряжение на один виток обмотки составляет 3,0...4,5 В. Источником энергии служат сварочные трансформаторы. В начале сушки надо ускорить подъем температуры, а потом снизить ее до такого уровня, который необходим лишь для того, чтобы потери в стали покрывали потери тепла. Для этого обычно снижают подводимое напряжение или увеличивают число витков намагничивающей обмотки. Найдя распределение выводов по фазам и проверив состояние изоляции двигателя, определяют их «начала» и «концы». Это делают методами подбора, трансформации, с помощью милливольтметра, трех вольтметров.

Определение условного «начала» и «конца» обмотки методом подбора или пробного включения (рис. 1.5) при наличии бирок на выводных концах или без них выполняется таким образом. «Концы» обмоток С4…С6 (или три вывода обмоток, принятые произвольно за концы) соединяют вместе, а «начала» С1…С3 (или три условных начала) присоединяют к сети (рис. 1.5), включают двигатель и наблюдают за его работой. Если двигатель работает нормально, без рывков, не гудит, то подбор начал и концов осуществлен правильно. В противном случае меняют местами выводы первой обмотки. Если после этого электродвигатель не стал работать нормально, то выводы первой обмотки воз-

вращают в исходное положение, а затем меняют местами выводы второй обмотки и т. д.

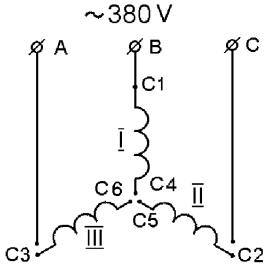


Рис. 1.5. Схема определения «начал» и «концов» обмоток статора методом подбора (пробного включения)

При использовании метода трансформации (рис. 1.6) соединяют две любые обмотки последовательно и подключают кратковременно в сеть переменного однофазного тока напряжением 127...220 В. К третьей свободной обмотке подключают вольтметр или электрическую лампу накаливания небольшой мощности (25...40 Вт).

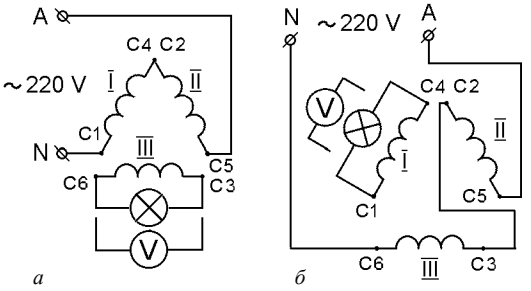


Рис. 1.6. Схема определения начал и концов обмоток статора методом трансформации при соединении: *а* – разных выводов; *б* – одноименных выводов двух фаз

Сущность метода трансформации состоит в том, что при последовательном соединении двух обмоток (например, I и II) и пропускании через них переменного тока образуется результирующий (от двух обмоток) переменный магнитный поток, который в случае разноименных выводов пересекает витки третьей обмотки и индуцирует на концах ее некоторую ЭДС, фиксируемую по показанию вольтметра или по накалу лампочки. В случае соединения одноименных концов магнитный поток направлен так, что не пересекает витки третьей обмотки и не вызывает появление ЭДС. При этом стрелка подключенного вольт-

метра не отклоняется или нить лампочки не накаляется. После определения наличия или отсутствия в третьей обмотке ЭДС помечают бирками С1, С2 – «начала» и С4, С5 – «концы» выводов первой и второй обмоток. Для маркировки третьей обмотки опыт повторяют, соединив ее последовательно с первой или второй обмоткой, выводы которых уже известны. Чтобы избежать перегрева обмоток, допускается только кратковременное включение обмоток в сеть.

По методу милливольтметра к одной обмотке любой из фаз, условно считаемой известной, подключают через рубильник и реостат, служащий для уменьшения тока в цепи, источник постоянного тока (рис. 1.7). В качестве такого источника желательно использовать аккумулятор напряжением 2 В. В момент включения или выключения рубильника в обмотках двух других фаз будет индуцироваться электродвижущая сила, причем ее направление будет определяться полярностью концов обмотки фазы, в которую включен аккумулятор. Когда к условному началу обмотки подсоединен «плюс» батареи, а к ее условному концу – «минус», то при включении рубильника на двух других фазах будет «минус» на началах и «плюс» на концах обмоток. Это подтверждается направлением отклонения стрелки милливольтметра, подсоединяемого поочередно к выводам двух других фаз обмотки статора. Если выполнить выключение рубильника, то полярность на двух фазах будет обратной указанной выше.

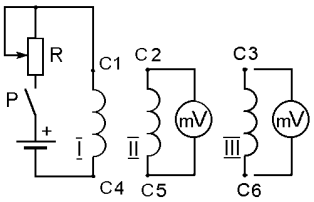


Рис. 1.7. Схема определения «начал» и «концов» фаз обмотки статора методом милливольтметра

Сущность метода трех вольтметров заключается в том, что все три обмотки соединяют последовательно и включают в сеть (рис. 1.8). При согласном включении обмоток, т. е. начало одной обмотки соединяется с концом другой, все вольтметры показывают одинаковое напряжение. В соответствии с этим, принимая один из присоединенных выводов за начало первой обмотки С1, размещают остальные выводы (С2…С6).

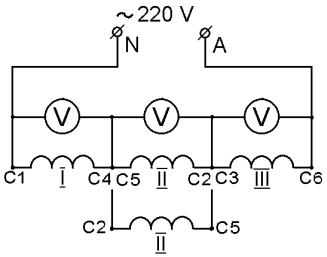


Рис. 1.8. Схема определения «начал» и «концов» фаз обмотки статора методом трех вольтметров

Если же две обмотки включены согласно I и II, то вольтметр, присоединенный к обмотке III, покажет большее напряжение по сравнению с двумя другими вольтметрами. В таком случае следует обмотку II «перевернуть» и снова включить в цепь. Чтобы избежать повреждения изоляции при включении обмоток, опыт необходимо проводить быстро, используя напряжение 220 В (фаза и нуль сети).

На клеммной дощечке выводы обмоток размещают таким образом (рис. 1.9), чтобы удобным было включение как звездой, так и треугольником, а также переключение двигателя со звезды на треугольник. Обычно двигатели выпускаются на напряжение 220/380 В и при линейном напряжении 220 В фазные обмотки электродвигателя соединяются в треугольник, а при линейном напряжении 380 В – в звезду.

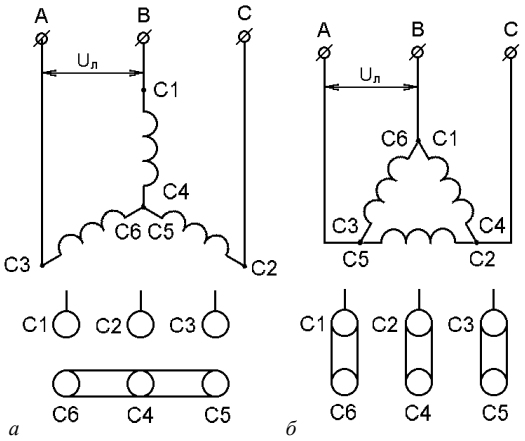


Рис. 1.9. Схемы расположения выводов фаз асинхронного короткозамкнутого электродвигателя при соединении обмоток статора: *а* – в звезду; *б* – в треугольник

К основным электрическим повреждениям в асинхронных двигателях относятся обрыв стержней короткозамкнутого ротора и межвитковое замыкание в обмотках. Повреждение стержней «беличьего колеса» вызывает потери мощности, приводит к перегреву и даже выходу из строя электродвигателя. Иногда при обрыве нескольких стержней пусковой момент двигателя равен нулю. Поврежденный стержень можно обнаружить следующим способом. К торцевым кольцам «беличьего колеса» ротора крепят струбцинами провода от сварочного трансформатора. Поверхность ротора посыпают мелкими стальными опилками. Ток, проходя по стержням «беличьего колеса», создаст вокруг них магнитное поле, и опилки точно расположатся вдоль них. В зоне поврежденного стержня магнитное поле будет слабым, так как только часть тока проходит через стержень, а над поврежденным стержнем будет виден разрыв в следе опилок.

Если для устранения обнаруженной неисправности требуется разборка электродвигателя, то проверяют от руки наличие свободного вращения ротора, а затем разбирают электродвигатель. После устранения неисправности, ознакомившись с конструкцией частей электродвигателя, его собирают.

1.2. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Зарисовать паспортный щиток электродвигателя серии АИР с необходимыми данными на нем.

2. Зарисовать схемы с их наименованиями (рис. 1.2…1.6), необходимые для проверки электрической части двигателя.

3. Записать величины измеренных сопротивлений изоляции обмоток двигателя относительно корпуса и друг друга.

4. Дать схемы соединения обмоток двигателя в звезду и треугольник (см. рис. 1.9), записав при этом положительные и отрицательные стороны каждого соединения.

Внимание! При работе с электродвигателем необходимо соблюдать правила техники безопасности и эксплуатации электроустановок потребителей. При измерениях необходимо следить за показаниями приборов и не перегружать их.

Контрольные вопросы

1. Как расшифровываются условные обозначения электрических двигателей переменного тока?

2. Что такое номинальные паспортные данные электродвигателя?

3. Какие требования предъявляются к изоляции обмоток асинхронных электродвигателей переменного тока и каковы вероятные причины неудовлетворительного состояния изоляции электродвигателей?

4. Зачем необходимо определять «начала» и «концы» всех обмоток статора трехфазного асинхронного электродвигателя переменного тока?

5. Перечислите и поясните методы определения «начал» и «концов» фаз обмоток статора.

6. Перечислите основные наиболее часто встречающиеся неисправности электрической части двигателя и объясните способы их обнаружения.

7. Поясните способы сушки обмоток электрического двигателя.

8. Поясните схемы включения трехфазного асинхронного электродвигателя в звезду и треугольник.

Лабораторная работа 2.
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы:

1. Ознакомиться с методикой определения параметров трехфазного электродвигателя методом непосредственной нагрузки.

2. Снять и построить рабочие характеристики асинхронного двигателя (АД) при номинальных напряжении и частоте сети.

Объект и средства исследования. Лабораторная работа выполняется на стенде НТЦ-23 «Электрические машины».

Объектом исследования является трехфазный асинхронный короткозамкнутый электродвигатель типа АИР71В6У3 с номинальными параметрами: схема соединения обмоток – Δ/Y, напряжение $U_{ном}$ = 220/380 В, сила тока $I_{ном}$ = 3,1/1,8 А, номинальная мощность $P_{ном}$ = 0,55 кВт, номинальная частота вращения $n_{ном}$ = 920 об/мин, номинальный коэффициент полезного действия $\eta_{ном}$ = 69 %, номинальный коэффициент мощности cos $\varphi_{ном}$ = 0,68.

Средствами исследования служат:

- инвертор на базе силового модуля Mitsubishi ASIPM PS11035, предназначенный для создания симметричной трехфазной сети с плавным регулированием частоты и напряжения (номинальная мощность – 1,5 кВт, номинальный ток – 7 А, диапазон задания линейного напряжения – 0…220 В с дискретностью 1 В, диапазон задания частоты – 0…163 Гц с дискретностью 0,63 Гц);

- машина постоянного тока типа 2ПН-801УХЛ4, предназначенная для создания механической нагрузки на валу двигателя, с номинальными параметрами: мощность – 0,55 кВт, напряжение – 220 В, сила тока – 3,32 А, частота вращения – 1 500 об/мин;

- широтно-импульсные преобразователи ШИП1 и ШИП2, в состав которых входят: интеллектуальный силовой модуль ASIPM Mitsubishi PS11035, полевой транзистор IRF840 (для питания обмотки возбуждения двигателя постоянного тока (ДПТ)), микроконтроллер ATMega16, шунты для измерения токов с платами гальванической развязки на основе изолирующего усилителя HCPL-788J;

- цифровые измерительные приборы, входящие в состав стенда, с номинальным напряжением 500 В и номинальным током 5 А.

2.1. Основные теоретические сведения

Существует два метода получения данных для построения рабочих характеристик асинхронных двигателей: метод непосредственной нагрузки и косвенный метод.

Метод непосредственной нагрузки применим для двигателей мощностью не более 10…15 кВт и заключается в опытном исследовании двигателя в диапазоне нагрузок от холостого хода до режима номинальной нагрузки с измерением необходимых параметров.

Косвенный метод более универсальный, его применение не ограничивается мощностью двигателя. Метод заключается в выполнении опыта холостого хода и опыта короткого замыкания.

Опыт холостого хода дает возможность определить возникающие при холостом ходе потери и механические свойства асинхронного двигателя при питании от источника регулируемого напряжения. При этом вал двигателя должен быть свободным от механической нагрузки.

Для получения характеристики холостого хода производят несколько измерений при $n = \text{const}$, $f = \text{const}$ и $U_1 = (0{,}3\ldots1{,}2)U_{\text{н}}$. В результате получают зависимости P_0, I_0, $\cos\varphi_0$ от напряжения питания двигателя U_1.

Наиболее важной частью характеристики холостого хода является кривая насыщения (намагничивания) – зависимость между током намагничивания I_0 и ЭДС $E_0 = U_0$ (падением напряжения на внутреннем активном и индуктивном сопротивлениях за счет малой величины тока холостого хода можно пренебречь, ошибка не превышает 1 %). Знание кривой намагничивания очень важно, особенно при проектиро-

вании двигателей. Вначале с увеличением тока возбуждения (тока холостого хода) напряжение растет прямолинейно, затем рост его замедляется и практически приближается к предельному значению (насыщение). Для полного использования свойств стали ЭДС двигателя E_0 и поток Ф должны по возможности иметь высокие значения, в то же время необходимо избегать слишком больших потерь энергии на возбуждение.

Для полной оценки асинхронного двигателя необходимо определение потерь холостого хода – механических потерь $P_{мех}$, потерь в стали $P_{ст}$ и потерь в обмотке статора $P_{эл1}$. Так как значения электрических потерь в статорных обмотках $P_{эл1}$ незначительны по сравнению с $P_{мех}$ и $P_{ст}$, то ими часто пренебрегают.

Опыт короткого замыкания проводится по такой же схеме, как и опыт холостого хода, но при жестко зафиксированном роторе и желательно с соединением обмоток статора звездой. В результате получают зависимость тока статора $I_к$, потребляемой мощности $P_к$ и коэффициента мощности $\cos \varphi_к$ от напряжения питания $U_к$.

Предельное значение тока статора $I_к$ устанавливают исходя из допустимой токовой нагрузки питающей сети, а также допустимой температуры нагрева статорных обмоток двигателя. Для двигателей мощностью до 1 кВт возможно проведение опыта, начиная с номинального напряжения $U_к = U_{ном}$. В этом случае предельный ток $I_к = (5 / 7)I_{ном}$.

Так как характеристика короткого замыкания воспроизводит начальные пусковые условия асинхронного двигателя и позволяет определить пусковой момент двигателя $M_п$, кратность пускового момента будет иметь вид

$$k_м = M_п / M_{ном}, \qquad (2.1)$$

кратность пускового тока –

$$k_I = I_п / I_{1ном}. \qquad (2.2)$$

Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (согласно ГОСТ 7217-79) – это зависимости величин P_1, I_1, S, $\cos \varphi$ и η от полезной мощности P_2 при условии постоянных значений приложенного напряжения $U_1 = \text{const}$ и частоты $f_1 = \text{const}$.

Для анализа рабочих характеристик двигателя большое значение имеет вид полученных зависимостей. Например, график тока $I_1 = f(U_1)$ не выходит из начала координат, так как в режиме холостого хода дви-

гатель потребляет из сети ток, обусловленный потерями на холостом ходу.

Характеристика частоты вращения ротора $n = f(U_1)$ имеет падающий вид, т. е. с ростом нагрузки частота вращения ротора уменьшается из-за роста скольжения s, и чем больше активное сопротивление обмотки ротора, тем больше наклон этой характеристики к оси абсцисс.

Небольшое значение коэффициента мощности cos φ в зоне малых нагрузок двигателя объясняется тем, что в режиме холостого хода и при небольшой нагрузке на валу ток статора меньше номинального и является главным образом намагничивающим током, фазовый сдвиг которого относительно напряжения сети близок к 90°.

Значительная величина намагничивающего тока в асинхронном двигателе обусловлена наличием воздушного зазора между статором и ротором. С ростом нагрузки двигателя ток I_1, потребляемый двигателем из сети, увеличивается в основном за счет активной составляющей, что и способствует росту коэффициента мощности cos φ.

2.2. Порядок выполнения работы

1. Пользуясь схемами (рис. 2.1, 2.2), изучить расположение используемых узлов и органов управления на панели лабораторного стенда.

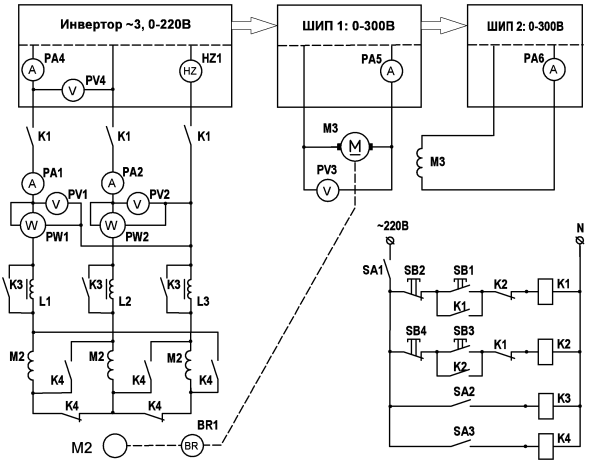


Рис. 2.1. Схема испытания трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

2. Все переключатели стенда установить в положение «Выключено», регулировочные рукоятки перевести в положение, соответствующее нулевому значению напряжения или тока (против часовой стрелки до упора).

3. Собрать электрическую цепь (рис. 2.2) с помощью соединительных проводников и произвести настройку стенда: переключателем *SA*27 установить режим работы инвертора «Независимое управление напряжением и частотой», рукоятки регуляторов *RP*4 и *RP*5 повернуть в крайнее левое положение.

4. Установить режим работы инвертора: переключатель «Независимое управление» – в положение «Включено»; переключатель *PV*1/*PW*1 – в положение «*PV*1»; выключатель *PV*2/*PW*2 – в положение «*PW*2»; выключатель *PV*3/φ – в положение «*PV*3».

5. По указанию преподавателя выбрать схему соединения статорных обмоток двигателя – в звезду (переключатель *SA*2 – в положение «Включено», *SA*3 – «Выключено») или в треугольник (переключатель *SA*2 – в положение «Выключено», *SA*3 – «Включено»).

6. Автоматическими выключателями «Сеть» подключить стенд к сети. Включить питание цепи управления выключателем *SA*1. Кнопкой *SB*1 и выключателем *SA*26 включить питание инвертора. Задать частоту напряжения инвертора 50 Гц (контролировать по частотомеру *HZ*1). Регулятором «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения U_1 = 220 В (контролировать по вольтметру *PV*4) и поддерживать его на протяжении всего опыта. Прогреть асинхронный двигатель в течение 10 мин.

7. Для создания механической нагрузки на валу исследуемого двигателя подключить к ШИП1 машину постоянного тока *M*3 в генераторном режиме в следующем порядке:

1) установить режим работы ШИП1 переключателями: *SA*20 – «Отключить замкнутую СУ», *SA*21 – «Задание тока», *SA*22 – «Генераторный режим»;

2) переключателем *SA*23 включить ШИП1 и регулятором *RP*1 установить ток якоря $I_я$ = 3 А;

3) переключателем *SA*25 включить ШИП2 и регулятором *RP*3 «Задание тока» установить требуемую силу тока возбуждения $I_в$ (контролировать по амперметру *PA*6).

8. Увеличивая ток в цепи якоря машины *M*3 регулятором «Задание тока» ШИП1 (против хода часовой стрелки), снять показания приборов в пяти точках и записать их в табл. 2.1.

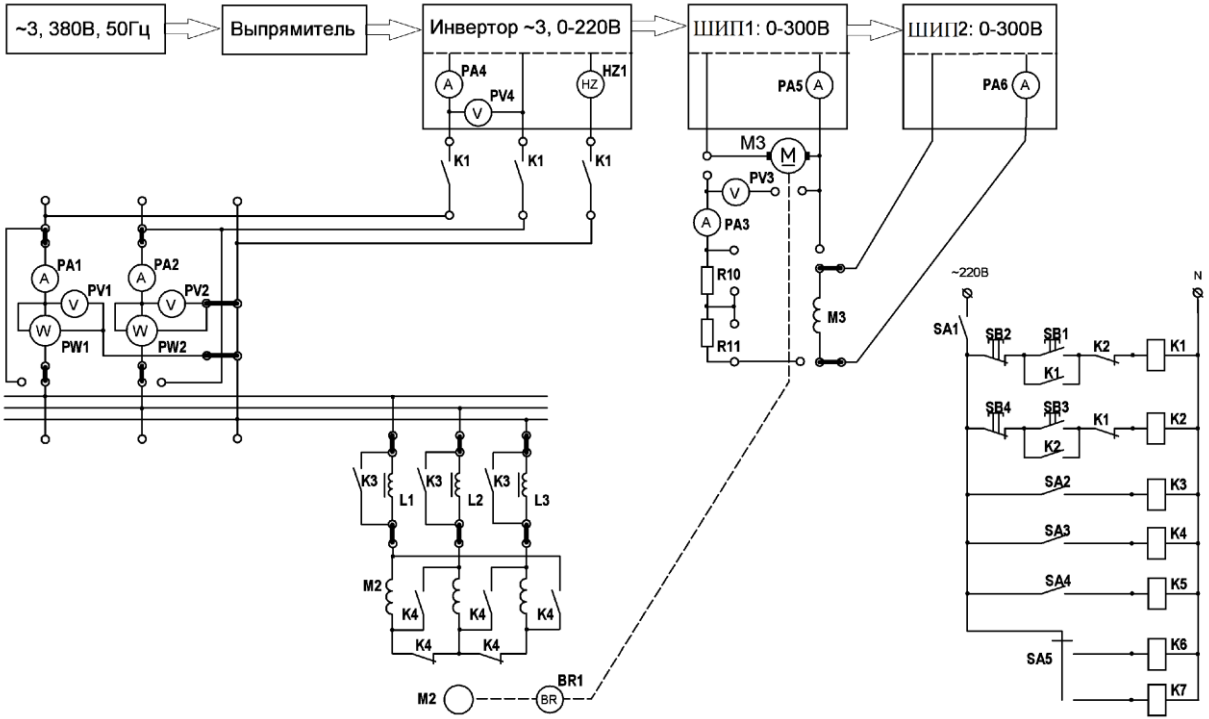


Рис. 2.2. Схема подключения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором на панели стенда

Таблица 2.1. **Рабочие характеристики асинхронного электродвигателя**

Величина		Схема «звезда»				
		1	2	3	4	5
Измерения						
Сила тока якоря ДПТ	$I_я$, А					
Напряжение якоря ДПТ	$U_я$, В					
Сила тока фазы АД	I_1, А					
Линейное напряжение	U_1, В					
Активная мощность	P', Вт					
Угловая скорость ротора АД	ω, рад/с					
Частота вращения ротора АД	n, об/мин					
Вычисления						
Сила тока АД	$I_{1ф}$, А					
Напряжение фазы АД	$U_{1ф}$, В					
Активная мощность двигателя	P_1, Вт					
Скольжение	s					
Коэффициент мощности	cos φ					
Электромагнитный момент МПТ	$M_{эм}$, Н · м					
Момент на валу МПТ	M, Н · м					
Мощность на валу АД	P_2, Вт					
КПД асинхронного двигателя	η, %					

Примечание. МПТ – машина постоянного тока.

9. Завершив измерения, отключить стенд в следующем порядке:

1) регулятором *RP*3 «Задание тока» ШИП2 уменьшить ток возбуждения вспомогательной машины до нуля (контролировать по амперметру *PA*6) и выключить ШИП2;

2) регулятором *RP*1 «Задание» ШИП1 уменьшить напряжение на якоре вспомогательной машины до нуля (контролировать по прибору *PV*3) и выключить ШИП1 переключателем *SA*23;

3) уменьшить напряжение на выходе инвертора до нуля (контролировать по прибору *PV*4) и отключить кнопкой *SB*2 исследуемый двигатель;

4) выключить выключатель *SA*1 и автоматический выключатель «Сеть».

10. Рассчитать параметры работы асинхронного двигателя в исследуемых режимах.

Сила тока и напряжение фазы двигателя определяются по формулам:

- при схеме соединения фаз «звезда»:

$$I_ф = I_1, \tag{2.3}$$

$$U_ф = U_1 / \sqrt{3}; \tag{2.4}$$

- при схеме соединения фаз «треугольник»:

$$I_ф = I_1 / \sqrt{3}, \quad (2.5)$$

$$U_ф = U_1.$$

Активную мощность, потребляемую двигателем (Вт), можно найти по формуле

$$P_1 = P' \sqrt{3}. \quad (2.6)$$

Частота вращения ротора (об/мин) определяется следующим образом:

$$n = \frac{30\omega}{\pi}. \quad (2.7)$$

Скольжение ротора (%) рассчитывается по формуле

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} 100, \quad (2.8)$$

где $n_0 = \frac{60f}{p}$ – синхронная частота двигателя, об/мин;

n – число пар полюсов исследуемого асинхронного двигателя (n = 3).

Коэффициент мощности можно найти по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{3U_ф I_ф}. \quad (2.9)$$

Электромагнитный момент машины постоянного тока (Н · м) вычисляется следующим образом:

$$M_{эм} = C_м Ф I_я = \frac{9{,}55 U_я I_я}{n}, \quad (2.10)$$

где $C_м Ф$ – коэффициент момента машины постоянного тока.

$$C_м Ф = \frac{9{,}55 U_я}{n}. \quad (2.11)$$

Полезный момент на валу (Н · м) определяется по формуле

$$M_2 = M_{эм}(1 - \eta_{МПТ}),$$

где $\eta_{МПТ}$ – КПД машины постоянного тока в зависимости от степени ее загрузки (рис. 2.3).

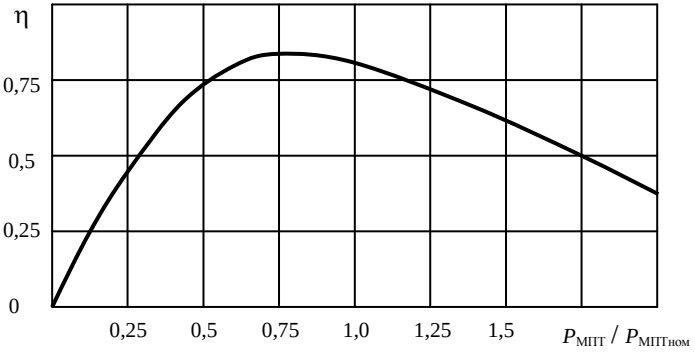


Рис. 2.3. Зависимость КПД машины постоянного тока
от степени ее загрузки

Полезную мощность асинхронного двигателя (Вт) можно найти по формуле

$$P_2 = \frac{M_2 n}{9{,}55}. \qquad (2.12)$$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100. \qquad (2.13)$$

11. По опытным данным построить рабочие характеристики асинхронного двигателя: I_1, P_1, n, s, $\cos\varphi$, M, $\eta = f(P_2)$.

Контрольные вопросы

1. Какие характеристики асинхронного двигателя называются рабочими?
2. Почему относительная величина тока холостого хода у асинхронного двигателя больше, чем у трансформатора такой же мощности?
3. Как изменится электромагнитный момент асинхронного двигателя, если питающее напряжение уменьшить в три раза?
4. Что такое перегрузочная способность асинхронного двигателя и как ее определить по круговой диаграмме?

5. Почему без нагрузки асинхронный двигатель работает с малыми значениями КПД и коэффициента мощности?

6. Какие виды потерь имеют место в асинхронном двигателе?

7. Почему магнитные потери в сердечнике ротора не учитывают?

8. На какие виды потерь влияют величина воздушного зазора и толщина пластин сердечника статора?

9. Почему график $I_1 = f(P_2)$ не выходит из начала координат?

Лабораторная работа 3.
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Цель работы:

1. Изучить конструкцию трехфазного асинхронного электродвигателя с фазным ротором.

2. Освоить приемы снятия характеристик холостого хода и рабочих характеристик.

3. Снять и построить рабочие характеристики асинхронного двигателя при номинальных напряжении, частоте сети и разных значениях сопротивления пускового реостата.

Объект и средства исследования. Лабораторная работа выполняется на стенде НТЦ-23 «Электрические машины».

Объектом исследования является трехфазный асинхронный электродвигатель с фазным ротором *М*1 типа МТН011-6У1 с номинальными параметрами: схема соединения обмоток статора – Δ/Y, номинальное напряжение $U_{ном}$ = 220/380 В, номинальная сила тока $I_{ном}$ = 8,5/4,9 А, номинальная мощность $P_{ном}$ = 1,4 кВт, номинальная частота вращения $n_{ном}$ = 890 об/мин, номинальное напряжение ротора – 114 В, номинальный ток ротора – 8,8 А, номинальный режим работы – *S*3 при повторности нагрузки 40 %.

Средствами исследования служат:

- инвертор на базе силового модуля Mitsubishi ASIPM PS11035, предназначенный для создания симметричной трехфазной сети с плавным регулированием частоты и напряжения (номинальная мощность – 1,5 кВт, номинальный ток – 7 А, диапазон задания линейного напряжения – 0…220 В с дискретностью 1 В, диапазон задания частоты тока – 0…163 Гц с дискретностью 0,63 Гц);

- машина постоянного тока *М*3 типа 2ПН90LУХЛ4, предназначенная для создания механической нагрузки на валу двигателя *М*1, с номинальными параметрами: номинальная мощность $P_{МПТном}$ = 0,55 кВт, номинальное напряжение $U_{МПТном}$ = 220 В, номинальная сила тока $I_{МПТном}$ = 3,32 А при частоте вращения $n_{МПТном}$ = 1 500 об/мин;

- широтно-импульсные преобразователи ШИП1 и ШИП2, в состав которых входят: интеллектуальный силовой модуль ASIPM Mitsubishi PS11035, полевой транзистор IRF840 (для питания обмотки возбуждения ДПТ), микроконтроллер ATMega16, шунты для измерения токов с платами гальванической развязки на основе изолирующего усилителя HCPL-788J;

- цифровые измерительные приборы, входящие в состав стенда, с номинальным напряжением 500 В и номинальным током 5 А.

3.1. Основные теоретические сведения

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию и менее надежны по сравнению с двигателями с короткозамкнутым ротором, но они обладают лучшими регулировочными и пусковыми свойствами.

Асинхронный двигатель с фазным ротором (рис. 3.1) конструктивно отличается от асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором главным образом устройством ротора.

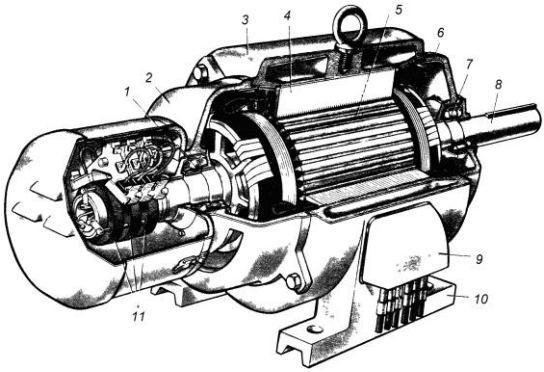


Рис. 3.1. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором

Статор двигателя состоит из корпуса *3* и сердечника *4* с трехфазной обмоткой. Сердечник собран в пакет из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, покрытых слоем изоляционного лака и скрепленных специальными скобами или продольными сварными швами по наружной поверхности. Такая конструкция сердечника способствует значительному уменьшению вихревых токов, возникающих в процессе его перемагничивания вращающимся магнитным полем.

На внутренней поверхности сердечника статора имеются продольные пазы, в которых расположены пазовые части обмотки статора и лобовые части, находящиеся за пределами сердечника по его торцовым сторонам.

Асинхронный двигатель с фазным ротором имеет подшипниковые щиты *2* и *6* с подшипниками качения *1* и *7*. К корпусу *3* прикреплены лапы *10* и коробка выводов *9*.

В расточке статора расположена вращающаяся часть двигателя – ротор, состоящий из вала *8* и сердечника *5*. По сравнению с короткозамкнутым фазный ротор имеет более сложную конструкцию. На валу *8* закреплен шихтованный сердечник *5* с трехфазной обмоткой, выполненной аналогично обмотке статора. Эту обмотку соединяют звездой, а ее концы присоединяют к трем контактным кольцам *11*, расположенным на валу и изолированным друг от друга и от вала. Для осуществления электрического контакта с обмоткой вращающегося ротора к каждому контактному кольцу прижимаются две щетки, закрепленные в щеткодержателях. Каждый щеткодержатель снабжен пружинами, обеспечивающими прижатие щеток к контактному кольцу.

На корпусе асинхронного двигателя прикреплена табличка, на которой указаны тип двигателя, завод-изготовитель, год выпуска и номинальные данные (полезная мощность, напряжение, ток, коэффициент мощности, частота вращения и КПД).

Охлаждение двигателя осуществляется методом обдува наружной поверхности корпуса. Поток воздуха создается центробежным вентилятором.

Монтаж двигателя в месте его установки осуществляется либо посредством лап *10*, либо посредством фланца. В последнем случае на подшипниковом щите со стороны выступающего конца вала делают фланец с отверстиями для крепления двигателя к рабочей машине.

Для предохранения обслуживающего персонала от возможного поражения электрическим током двигатели снабжаются болтами заземления (не менее двух).

Пуск двигателя с фазным ротором. В процессе пуска ступени пускового реостата переключают таким образом, чтобы ток ротора оставался приблизительно неизменным, а среднее значение пускового момента было близко к наибольшему $M_{\text{п. макс}}$.

Пусковой реостат имеет несколько ступеней пусковых сопротивлений, что позволяет в процессе пуска постепенно уменьшать пусковое сопротивление, поддерживая высокое значение момента на валу двигателя. Выключение отдельных ступеней пускового реостата в процес-

се разгона двигателя может осуществляться вручную или автоматически в функции времени или тока двигателя.

Сначала двигатель включается в работу по характеристике 4 (рис. 3.2), соответствующей максимальному сопротивлению пускового реостата $R_1 + R_4 + R_7$, $R_2 + R_5 + R_8$ и $R_3 + R_6 + R_9$ и развивает вращающий момент $M_{\text{п. макс}}$. По мере увеличения частоты вращения ротора вращающий момент M уменьшается и может стать меньше некоторого момента $M_{\text{п. мин}}$. Поэтому при $M = M_{\text{п. мин}}$ часть пускового реостата $R7 \ldots R9$ выключается контактами $K6$ при помощи переключателя $SA5$. Вращающий момент при этом мгновенно возрастает до значения $M_{\text{п. макс}}$, затем с увеличением частоты вращения изменяется по характеристике 3, соответствующей сопротивлению реостата $R_1 + R_4$, $R_2 + R_5$ и $R_3 + R_6$.

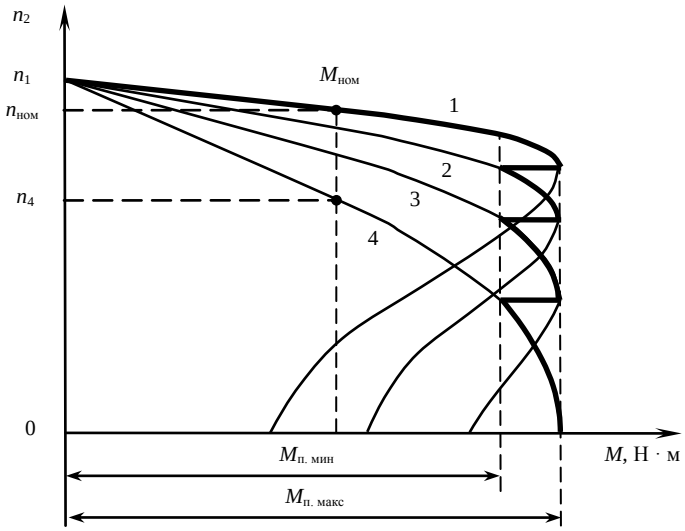


Рис. 3.2. Механическая характеристика асинхронного двигателя с фазным ротором при различных значениях сопротивления пускового реостата

При дальнейшем уменьшении момента M до $M_{\text{п. мин}}$ часть реостата $R4 \ldots R6$ снова выключается контактами $K7$ и двигатель переходит на работу по характеристике 2, соответствующей сопротивлению ступени $R1 \ldots R3$.

Таким образом, при ступенчатом уменьшении сопротивления пускового реостата вращающий момент двигателя изменяется от $M_{\text{п. макс}}$

до $M_{\text{п. мин}}$, а частота вращения возрастает по ломаной кривой (жирная линия на рис. 3.2).

По мере разгона двигателя сопротивление пускового реостата уменьшают, переходя с одной его ступени на другую. В конце пуска пусковой реостат полностью выводят переключателем *SA*7, обмотка ротора замыкается накоротко, а двигатель переходит на естественную механическую характеристику 1. Отключение ступеней реостата может осуществляться как вручную, так и автоматически с помощью контактов магнитного пускателя.

Ступени пускового сопротивления рассчитываются так, чтобы при переключениях вращающий момент двигателя менялся в выбранных пределах от $M_{\text{п. макс}}$ до $M_{\text{п. мин}}$.

Пусковые реостаты состоят из кожуха, рычага с переключающим устройством и ступеней сопротивлений, выполненных из металлической проволоки или ленты, намотанной в виде спирали. Пусковые реостаты рассчитаны на кратковременное протекание тока, а поэтому рычаг пускового реостата нельзя долго задерживать на промежуточных ступенях, так как сопротивления реостата могут перегореть. В то же время при слишком быстром переключении ступеней реостата пусковой ток двигателя может достигнуть недопустимо больших значений.

Рабочая характеристика асинхронного электродвигателя – это зависимость потребляемой из сети активной мощности P_1, тока статора I_1, скольжения s, коэффициента мощности $\cos\varphi$, КПД η от полезной мощности на валу P_2 при условии неизменных приложенного напряжения и его частоты (ГОСТ 7217-79). Снятие рабочей характеристики производят при нагретых до рабочей температуры обмотках статора и ротора.

При пуске двигателя с фазным ротором в цепь ротора включается добавочное активное сопротивление – пусковой реостат, который обычно имеет несколько ступеней и рассчитывается на кратковременное протекание тока. Это позволяет уменьшить пусковой ток $I_{\text{п}}$ при одновременном увеличении пускового момента $M_{\text{п}}$.

Активное сопротивление цепи ротора определяется выражением

$$R'_2 = r'_2 + r_{\text{доб}}, \qquad (3.1)$$

где r'_2 – приведенное активное сопротивление ротора;

$r_{\text{доб}}$ – сопротивление пускового реостата, приведенное к обмотке статора.

Влияние возросшего значения активного сопротивления R'_2 на пусковой момент двигателя $M_п$ показано в формуле

$$M_п = \frac{3pU_1^2 R'_2}{2\pi f_1 \left[(r_1 + R'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}, \qquad (3.2)$$

где p – число пар полюсов обмотки статора;

r_1 и x_1 – соответственно активное и реактивное сопротивления обмотки статора;

x'_2 – приведенное реактивное сопротивление ротора.

Это влияние графически отражено на рис. 3.3, из которого видно, что при отсутствии пускового реостата, т. е. при активном сопротивлении цепи ротора $R'_2 = r'_2$, пусковой момент $M_п = M_{п0}$.

При введении в цепь ротора добавочного активного сопротивления $r_{доб}$ приведенное сопротивление ротора $R'_2 = r'_2 + r_{доб}$, пусковой момент возрастает и при значении $R''_2 = r'_2 + r_{доб} = x_1 + x'_2$ достигает наибольшего значения $M_{п.\,макс}$. При $R'_2 > x_1 + x'_2$ пусковой момент уменьшается.

При выборе сопротивления пускового реостата $r_{доб}$ исходят из условий пуска двигателя:

- если двигатель включают при значительном нагрузочном моменте на валу, сопротивление пускового реостата $r_{доб}$ выбирают таким, чтобы обеспечить наибольший пусковой момент (рис. 3.3);

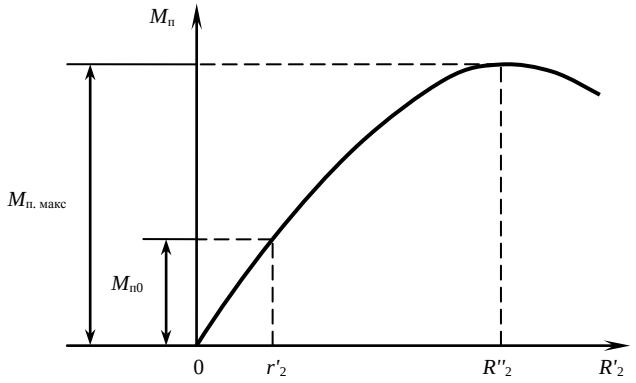


Рис. 3.3. Зависимость пускового момента от активного сопротивления цепи ротора

- если двигатель включают при небольшом нагрузочном моменте на валу или на холостом ходу, когда пусковой момент не имеет решающего значения для пуска, целесообразно сопротивление пускового реостата $r_{доб}$ выбирать несколько больше значения, соответствующего наибольшему пусковому моменту, т. е. чтобы соблюдалось условие $R'_2 > x_1 + x'_2$. В этом случае пусковой момент не достигает наибольшего значения, зато пусковой ток значительно уменьшается.

В асинхронных двигателях с фазным ротором обеспечивается наиболее благоприятное соотношение между пусковым моментом и пусковым током: большой пусковой момент при небольшом пусковом токе (в 2…3 раза больше номинального). Недостатками пусковых свойств двигателя с фазным ротором являются сложность, продолжительность и неэкономичность пусковой операции.

3.2. Порядок выполнения работы

1. Пользуясь схемами (рис. 3.4, 3.5), изучить расположение используемых узлов и органов управления на панели лабораторного стенда.

2. Все переключатели стенда установить в положение «Выключено», регулировочные рукоятки перевести в положение, соответствующее нулевому значению напряжения или тока (против часовой стрелки до упора).

3. Собрать электрическую цепь (рис. 3.4) с помощью соединительных проводников и произвести настройку стенда: переключатель *SA*27 установить в положение «Независимое управление», переключатель *PV*1/*PW*1 – в положение «*PV*1», переключатель *PV*2/*PW*2 – в положение «*PW*2», переключатель *PV*3/φ – в положение «*PV*3».

4. После разрешения преподавателя автоматическими выключателями «Сеть» подключить стенд к сети. Включить питание цепи управления выключателем *SA*1.

5. Регулятором «Задание частоты» инвертора установить частоту тока $f = 50$ Гц, контролируя ее по прибору *HZ*1. Регулятором «Задание напряжения» инвертора установить напряжение $U_1 = 0$ В (контролировать по вольтметру *PV*4). Кнопкой *SB*1 подключить исследуемый двигатель к выходу инвертора.

6. Регулятором «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения $U_1 = 220$ В. Прогреть асинхронный двигатель в течение 15 мин.

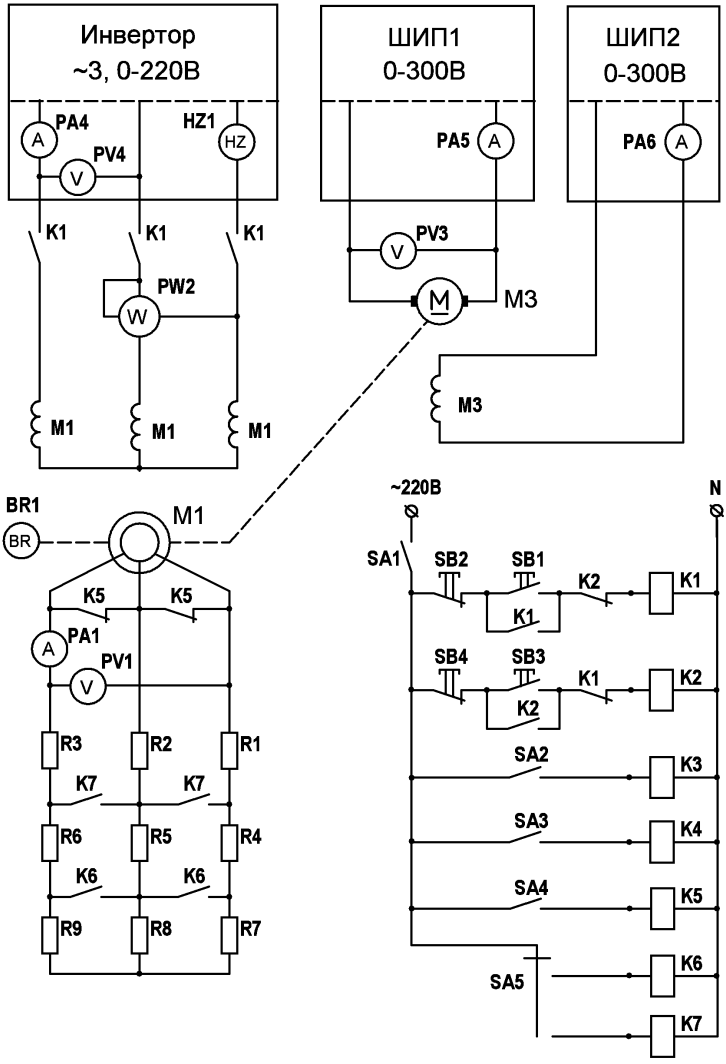


Рис. 3.4. Электрическая схема опыта по исследованию асинхронного электродвигателя с фазным ротором

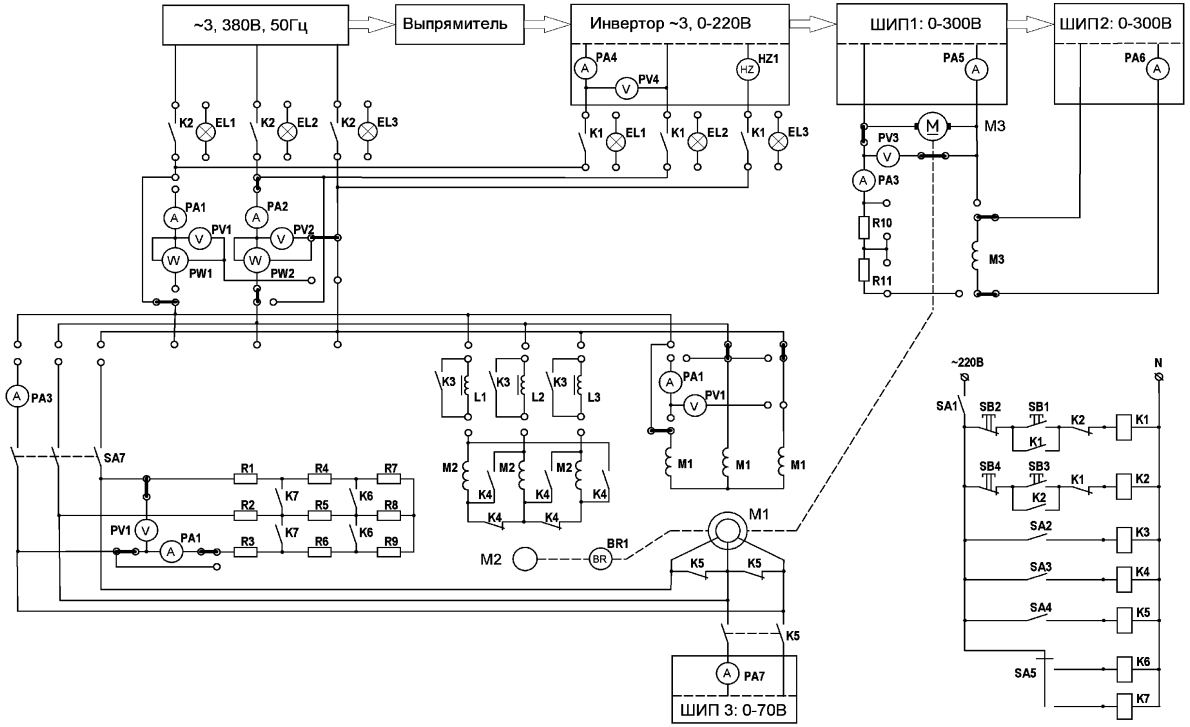


Рис. 3.5. Схема подключения асинхронного электродвигателя с фазным ротором на панели стенда

7. Для создания механической нагрузки на валу исследуемого двигателя нужно подключить к сети вспомогательную машину постоянного тока *M*3 в генераторном режиме:

1) установить выключатель ШИП2 в положение «Включено»;

2) регулятором *RP*3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины *M*3 $I_в$ = 3,3 А, контролируя его по амперметру *PA*6;

3) установить режимы работы ШИП1 переключателями: *SA*20 – «Отключить замкнутую СУ», *SA*21 – «Задание тока», *SA*22 – «Генераторный режим»;

4) регулятором «Задание напряжения» ШИП1 плавно увеличить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения $U_{1ном}$ = 220 В и поддерживать его постоянным в течение всего опыта (контролировать по вольтметру *PV*4);

5) тумблером включить ШИП1.

8. Для каждой ступени пускового реостата *R*1…*R*9 (переключаются *SA*5) снять показания приборов при напряжении $U_{1ном}$ в трех повторностях, изменяя ток в цепи якоря машины *M*3 регулятором «Задание тока» ШИП1. Результаты опыта записать в табл. 3.1.

9. Завершив эксперимент, необходимо:

1) регулятором «Задание тока» ШИП1 уменьшить напряжение до нуля и выключить ШИП1;

2) регулятором «Задание напряжения» инвертора уменьшить напряжение до нуля и кнопкой *SB*2 отключить исследуемый двигатель;

3) регулятором «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины *M*3, равное нулю, затем выключить ШИП2 переключателем *SA*25;

4) выключателем *SA*1 отключить питание цепи управления и автоматическим выключателем «Сеть» отключить питание стенда от сети.

10. По результатам измерений произвести необходимые расчеты.

Частота вращения ротора (об/мин) рассчитывается по фомуле

$$n_2 = \frac{30\omega}{\pi}. \qquad (3.3)$$

Активная мощность, потребляемая двигателем (Вт), определяется следующим образом:

$$P_1 = P'\sqrt{3}. \qquad (3.4)$$

Таблица 3.1. **Рабочие характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором**

№ п/п	Включенные ступени реостата	Измерения					Вычисления						
		$I_я$, А	I_1, А	U_1, В	P', Вт	ω, рад/с	n_2, об/мин	P_1, Вт	s	cos φ	P_2, Вт	M_2, Н · м	η, %
1	*R*1…*R*9												
2													
3													
4	*R*4…*R*9												
5													
6													
7	*R*7…*R*9												
8													
9													
10	–												
11													
12													

Скольжение двигателя можно найти по формуле

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100. \qquad (3.5)$$

Коэффициент мощности вычисляется следующим образом:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 I_1}. \qquad (3.6)$$

Мощность и момент на валу двигателя определяются по соответствующим параметрам машины постоянного тока *M*2. Полезная мощность на валу асинхронного электродвигателя *P*2 равна мощности на валу машины постоянного тока, которую можно определить по приблизительной формуле (Вт)

$$P_2 = P_{\text{МПТ}} = U_{\text{я}} I_{\text{я}} \eta_{\text{МПТ}}, \qquad (3.7)$$

где $U_{\text{я}}$ и $I_{\text{я}}$ – соответственно напряжение и ток якоря машины постоянного тока;

$\eta_{\text{МПТ}}$ – КПД машины постоянного тока, зависящий от степени ее загрузки (рис. 3.6).

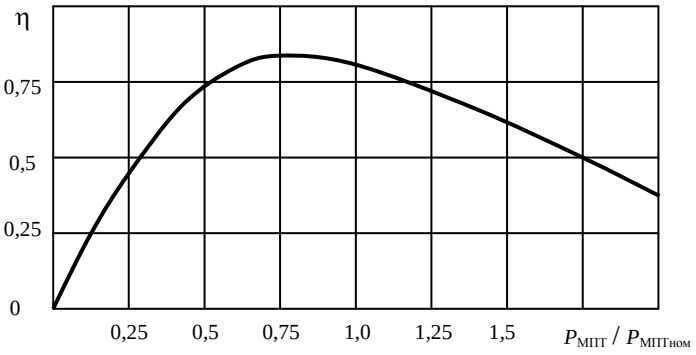


Рис. 3.6. Зависимость КПД машины постоянного тока от степени ее загрузки

Крутящий момент на валу исследуемого двигателя (Н · м) рассчитывается по формуле

$$M_2 = \frac{9{,}55 P_2}{n_2}.$$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя с фазным ротором (%) определяется по выражению

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100. \qquad (3.8)$$

11. По опытным данным построить в одной системе координат рабочие характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором: $I_{1ф}$, P_1, n_2, s, cos φ, M, $\eta = f(P_2)$.

Контрольные вопросы

1. Объясните устройство трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.
2. Объясните принцип действия асинхронного двигателя с фазным ротором.
3. Чем отличается конструкция асинхронного двигателя с фазным ротором от конструкции асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
4. Объясните порядок действий при пуске асинхронного двигателя с фазным ротором.
5. Каким образом снимаются рабочие характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором?
6. Что называется перегрузочной способностью асинхронного двигателя?
7. Почему с увеличением нагрузки на валу асинхронного двигателя с фазным ротором возрастает потребляемая из сети мощность?

Лабораторная работа 4.
ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ УЛУЧШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Цель работы:

1. Изучить факторы, влияющие на коэффициент мощности электроустановок.
2. Исследовать способы компенсации реактивной мощности, потребляемой асинхронным электродвигателем, с помощью нагрузки и батареи статических конденсаторов.

Объект и средства исследования. Работа выполняется на лабораторной установке, состоящей из асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, генератора постоянного тока с параллельным возбуждением, являющимся нагрузкой для испытуемого электродвигателя, а также батареи статических конденсаторов. Загрузка электродвигателя регулируется лампами накаливания.

Основные технические данные электродвигателя: тип –АИР80А6УЗ, номинальная мощность $P_н$ = 0,75 кВт; соединение фаз – треугольник/звезда; номинальное напряжение $U_н$ = 220/380 В; номинальный ток $I_н$ = 3,9/2,3 А; коэффициент полезного действия $\eta_н$ = 70 %, коэффициент мощности cos $\varphi_н$ = 0,72; частота вращения $n_н$ = 920 об/мин, режим работы – *S*1; класс изоляции – *F*. Генератор с самовозбуждением имеет следующие паспортные данные; тип *G*5, $P_н$ = 0,5 кВт; $U_н$ = 220 В, $I_н$ = 3,3 А, $n_н$ = 930 об/мин. Батарея статических конденсаторов содержит три конденсатора емкостью 20 мкФ каждый, рабочее напряжение $U_р$ = 500 В.

Средствами исследования служат: комплект измерительный К505, в который входят амперметр *PA*1 и вольтметр *PV*1 электромагнитной системы, ваттметр *PW* ферродинамической системы с пределами измерения без трансформатора по напряжению 30...60 В, по току 0,5...10 А, по мощности 10...4 000 Вт, вольтметр *PV*2 типа Э59 электромагнитной системы с пределами измерения 75, 150, 300, 600 В; амперметр *PA*2 типа Э59 электромагнитной системы с пределами измерения 2,5 и 5 А; лампы накаливания *HL*1...*HL*4 мощностью 200 Вт и напряжением 245...255 В; пускатель нажимной вибростойкой серии ПНВ для подключения батареи статических конденсаторов на напряжение 500 В переменного тока и ток 12,5 А; тахометр ТЧ 10-Р часового типа с пределом измерения 10 000 об/мин; установочные выключатели *SA*1...*SA*4 на напряжение 500 В и ток 6 А.

4.1. Основные теоретические сведения

Коэффициент мощности асинхронного электродвигателя, а в целом и электроустановки, равен отношению активной мощности *P* к полной мощности *S* (кВт/кВА). Он представляет собой второй по значимости после КПД показатель экономичности электроустановки. Когда установка питается строго синусоидальным напряжением, то величина коэффициента мощности равна cos φ – косинусу угла сдвига между током *I* и напряжением *U*. В остальных случаях cos φ относится только

к основной гармонике напряжения, и величина коэффициента мощности и cos φ не будут совпадать.

Мощность, которая берется от электрических сетей и необратимо преобразуется в другие виды мощностей (механическую, тепловую, световую и т. д.), в цепях переменного тока называется активной мощностью, ее величина при синусоидальном напряжении питающей сети:

$$P = UI_a = UI\cos\varphi. \qquad (4.1)$$

В реальных электрических сетях ток не совпадает по фазе с напряжением ($\varphi \neq 0$), в зависимости от вида реактивных сопротивлений он может отставать от напряжения или опережать его. При одной и той же активной мощности потребляемый из сети ток может принимать различные значения. Если угол $\varphi = 0$, то источники дают ток, равный активному току потребителя I_a. Если же потребители имеют и реактивные сопротивления, то угол $\varphi \neq 0$, следовательно, ток источников возрастает. Даже при относительно небольших активных мощностях потребителей, но большом угле сдвига фаз между током и напряжением источники электрической энергии могут оказаться полностью загруженными.

Электрические машины, трансформаторы и другие электротехнические устройства рассчитывают на определенный номинальный ток, обусловленный нагревом проводников этих устройств. Соответственно наивысшее использование генерирующих и преобразующих электромагнитную энергию устройств будет в тех случаях, когда коэффициент мощности приемников, на которые они работают, равен единице. Если под U и I понимать номинальные значения (допускаемые при номинальном режиме работы) напряжения и тока электрической машины, трансформатора или других преобразователей энергии, то произведение $S = UI$ дает наибольшую возможную активную мощность их при наиболее благоприятных условиях (при $\cos\varphi = 1$).

Низкий коэффициент мощности отрицательно сказывается на электроснабжении потребителей, при этом реактивные токи непроизводительно загружают электрические сети, генераторы и трансформаторы, вызывают в них дополнительные потери на нагревание, увеличивают потерю напряжения и снижают использование установленной мощности электростанций. Кроме того, при строительстве линий электропередачи для потребителей с низким cos φ необходимо увеличивать сечение проводов и вес опор, также нужно увеличить сечение соединительных проводов, используемых на самой установке.

Это связано с тем, что потери в проводах при токе нагрузки I (А), сопротивление провода R (Ом) и cos φ составляют:

$$\Delta P = \frac{I^2 R}{\cos^2 \varphi}. \tag{4.2}$$

Поэтому при проектирования или эксплуатации сетей, работающих с пониженным cos φ, для сохранения потерь в пределах, допускаемых нормами, приходится идти на уменьшение R, что связано с увеличением сечения проводов. Все это в целом ведет к убыткам в народном хозяйстве. Во избежание вышесказанного все потребители должны иметь, согласно ПУЭ, нормативную величину коэффициента мощности не ниже 0,93...0,95.

Коэффициент мощности асинхронного электродвигателя определяется величиной λ – отношением намагничивающей реактивной мощности электродвигателя (вар) к активной (Вт) по выражению

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\lambda^2}}. \tag{4.3}$$

Поэтому коэффициент мощности зависит от величины намагничивающего тока и величины магнитного рассеяния. Реактивная мощность (вар), требуемая для намагничивания воздушного зазора, пропорциональна напряжению на зажимах электродвигателя и намагничивающему току $Q = UI_р$, или, с другой стороны:

$$Q \equiv B^2 Vf \equiv B^2 Dlgf \equiv Dlgf, \tag{4.4}$$

где B – наибольшая принятая в расчете индукция;

V – объем воздушного зазора;

f – частота тока питающей сети;

D – диаметр расточки статора;

l – осевая длина статора;

g – радиальный размер воздушного зазора.

Активная мощность электродвигателя, идущая на полезную работу,

$$P \equiv BD^2 ln \equiv D^2 ln. \tag{4.5}$$

Тогда

$$\lambda = \frac{Q}{P} = \frac{D lg f}{D^2 ln} \equiv \frac{g f}{Dn} \equiv \frac{gp}{D}, \tag{4.6}$$

где n – число оборотов вала двигателя в минуту;

p – число пар полюсов статора.

Чтобы cos φ был возможно выше, следует ограничивать величину λ. Величина зазора g выбирается возможно малой, насколько это позволяют механические соображения, возможности зубцовых гармоник, а иногда и требования бесшумности двигателя. Таким образом, значение λ сводится к зависимости только по отношению p / D и не зависит от l, n и f. Это равенство показывает, что среди машин с одинаковым числом пар полюсов p машина с наибольшим диаметром D, а значит и с наибольшей величиной D^2ln и наименьшей мощностью, будет иметь лучший cos φ. Отсюда же видно, что отношение λ не зависит от частоты n. Таким образом, при заданной мощности двигателя наилучший cos φ будет у электродвигателя с наименьшим числом полюсов, т. е. имеющего наибольшую скорость вращения.

Рассмотрим условия эксплуатации, вызывающие изменения cos φ. Коэффициент мощности существенно зависит от нагрузки (рис. 4.1). Если нагрузка отсутствует, то электродвигатель потребляет незначительную активную мощность, практически равную постоянным потерям, и значительную реактивную мощность, расходуемую в основном на создание главного поля машины. Основное поле машины слагается из двух взаимно неподвижных полей токов статора и ротора, вращающихся в пространстве с одинаковой скоростью. Оно сцепляется одновременно с обмотками статора и ротора. Величина cos φ при этом мала (0,09...0,18). С ростом нагрузки потребление реактивной мощности вначале изменяется незначительно, так как мощность главного поля несколько снижается из-за уменьшения намагничивающегося тока, а мощность полей рассеивания статора и ротора незначительно увеличивается. Магнитные линии поля рассеивания статора сцеплены только с проводниками обмотки статора, а линии поля рассеяния ротора – только с проводниками обмотки ротора, и они замыкаются главным образом по воздуху. При этом коэффициент мощности растет. Максимальный cos φ = 0,70...0,92 соответствует номинальной нагрузке или даже небольшой перегрузке двигателя. При дальнейшем увеличении нагрузки реактивная мощность потоков рассеяния статора или ротора увеличивается в большей степени, чем активная мощность, так как ротор все больше и больше отстает в своем вращении от вращающегося магнитного поля, т. е. увеличивается скольжение. Величина cos φ при этом уменьшается.

Часто коэффициент мощности снижается вследствие неправильного ремонта асинхронных двигателей. При одностороннем износе под-

шипников, ведущем к снижению нормальных размеров воздушного зазора и к прилипанию ротора, иногда прибегают к обточке ротора или к расточке статора. При этом увеличивается воздушный зазор, вследствие этого при включении отремонтированного двигателя в работу значительно возрастает ток намагничивания, а коэффициент мощности соответственно снижается.

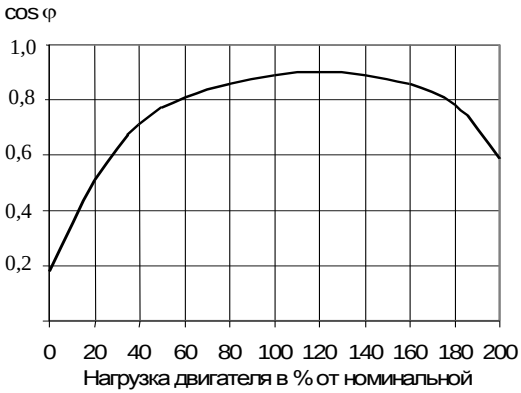


Рис. 4.1. Зависимость коэффициента мощности асинхронного электродвигателя от нагрузки (примерная кривая)

Также cos φ часто ухудшается вследствие неправильной перемотки электродвигателя. Если в пазы статора уложить меньшее количество витков, чем должно быть по заводскому расчету, то при одном и том же напряжении на зажимах двигателя потребуется больший магнитный поток, что вызовет возрастание тока намагничивания и относительное увеличение реактивной мощности.

На значение коэффициента мощности оказывают колебания напряжения сети. При повышении напряжения коэффициент мощности ухудшается, при понижении – улучшается. Это объясняется тем, что с повышением напряжения увеличивается ток намагничивания.

Номинальное значение коэффициента мощности электродвигателя указывается в паспорте и соответствует его номинальной активной мощности. При выборе электродвигателя для привода рабочих машин необходимо весьма тщательно определять их потребную мощность, использовать электродвигатели, имеющие наиболее высокий номи-

нальный cos φ, отдавая предпочтение высокоскоростным двигателям на подшипниках качения.

Поскольку естественные значения коэффициента мощности предприятий, как правило, значительно ниже нормативных, необходимо принимать меры по его увеличению. Мероприятия по повышению коэффициента мощности эксплуатируемых установок разделяются на две группы. К первой группе относятся мероприятия, не требующие компенсирующих устройств и целесообразные во всех случаях:

- правильный выбор электродвигателей и трансформаторов по мощности и типу;

- упорядочение технологического процесса, ведущее к улучшению энергетического режима оборудования с целью повышения его загрузки (не менее 75 % номинальной мощности) и полного использования оборудования;

- устранение холостой работы асинхронных двигателей и электросварочных установок путем широкого применения ограничителей холостого хода, когда продолжительность межоперационного периода превышает 10 с;

- замена малозагруженных электродвигателей электродвигателями меньшей мощности и имеющими более высокое значение cos φ;

- использование синхронных электродвигателей вместо асинхронных, где это возможно по условиям технологического процесса, например для нерегулируемых электроприводов с постоянным режимом работы или по технико-экономическим соображениям;

- замена менее мощными или временное отключение трансформаторов, загруженных в среднем менее чем на 30 % от их номинальной мощности;

- рационализация графиков работы трансформаторных подстанций и преобразователей;

- переключение обмоток двигателя с треугольника на звезду, что ведет к уменьшению напряжения на фазу в $\sqrt{3}$ раз. Следовательно, с понижением напряжения уменьшается ток намагничивания и реактивная мощность, а это резко повышает cos φ, особенно при малых нагрузках;

- повышение качества ремонта электрооборудования.

Ко второй группе относятся мероприятия, связанные с использованием компенсирующих устройств:

- использование статических конденсаторов;

- применение имеющихся синхронных генераторов и синхронных электродвигателей в качестве синхронных компенсаторов, т. е. когда они при работе вхолостую дают опережающий ток, имея запас по возбуждению, и применяются только для улучшения коэффициента мощности.

Для определения экономичности выбранного варианта компенсирующих устройств необходимо сопоставлять разницу в первоначальных затратах и в прямых ежегодных расходах, связанных с его эксплуатацией. Наиболее эффективным способом повышения коэффициента мощности в условиях современного сельскохозяйственного производства является рациональная загрузка электродвигателей и применение батареи статических конденсаторов.

Так как для предприятий $\varphi > 0$ и ток имеет индуктивный характер, то радикальной мерой повышения $\cos\varphi$ может быть установка статических конденсаторов, включаемых параллельно электрическим установкам. Данный способ применен и в данной лабораторной работе, при этом батарея статических конденсаторов включена параллельно зажимам статорных обмоток электродвигателя. Способ батареи статических конденсаторов в условиях сельского хозяйства является наиболее простым и удобным, так как конденсаторы обладают незначительными потерями (0,3...1,0 % от их реактивной мощности), мало подвержены износу, бесшумны, не требуют фундаментов, просты и удобны в обслуживании и легко могут быть подобраны на различную мощность.

Использование конденсаторов для улучшения $\cos\varphi$ основано на том, что воспринимаемый ими ток опережает напряжение на 90° (рис. 4.2), уменьшая при этом индуктивную составляющую тока. Это свойство конденсаторов используется для того, чтобы по возможности разгрузить генераторы, трансформаторы и провода сети от токов намагничивания, отстающих от напряжения на угол, близкий к 90°.

Конденсаторная батарея, подключаемая параллельно с потребителем, создает колебательный контур, емкость которого запасает электрическую энергию в ту часть периода, когда магнитное поле индуктивности уменьшается. В следующую часть периода конденсатор, не потребляя запасенной в нем энергии, возвращает ее в виде энергии магнитного поля. Реактивная мощность по-прежнему доставляется к потребителю, но уже от конденсаторов, расположенных рядом, а не от источника питания, находящегося на значительном расстоянии. Линия при этом освобождается от реактивного тока.

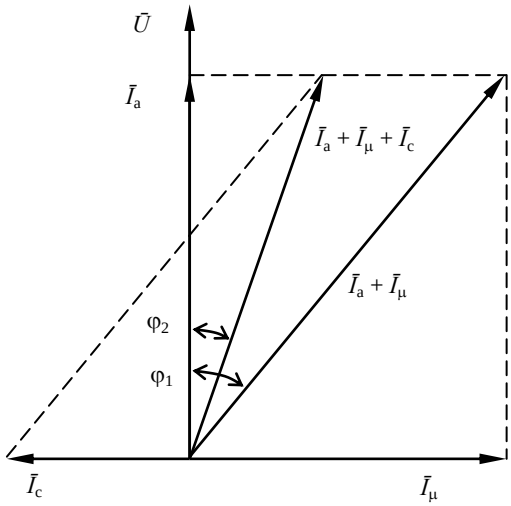


Рис. 4.2. Векторная диаграмма токов с учетом сдвига фаз

Чтобы уменьшить емкость конденсаторной батареи при той же реактивной мощности, конденсаторы включают не в звезду, а в треугольник, так как при соединении в треугольник напряжение на фазе повышается в $\sqrt{3}$ раз, вследствие чего мощность конденсаторной батареи возрастает в три раза.

Возможна установка конденсаторов для индивидуальной и для групповой компенсации. Для сельскохозяйственных установок рекомендуется групповая компенсация, когда конденсаторная батарея обслуживает все установки одной технологической линии. С момента отключения конденсаторов они должны разряжаться на параллельно подключенные конденсаторам резисторы, в качестве которых обычно используются электрические лампы накаливания.

4.2. Порядок выполнения работы

1. Начертить принципиальную электрическую схему лабораторной установки (рис. 4.3) и табл. 4.1 результатов опытов (измерений и вычислений). Записать паспортные величины, характеристики объекта и средства исследования.

2. Изучить принципиальную электрическую схему лабораторной установки для исследования коэффициента мощности асинхронного двигателя (рис. 4.3).

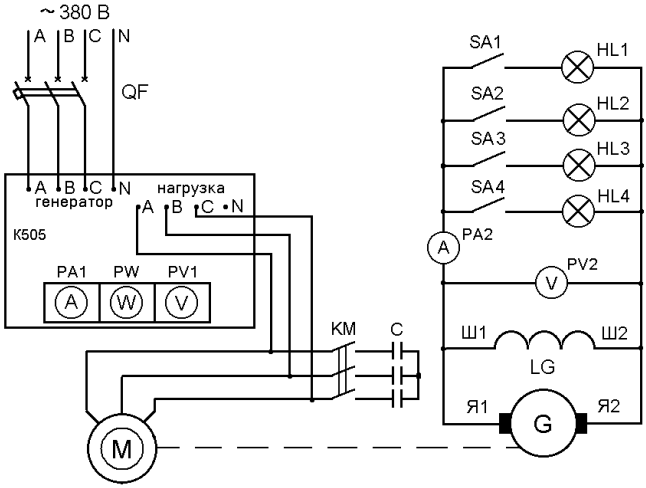


Рис. 4.3. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для исследования коэффициента мощности асинхронного двигателя

После разрешения преподавателя включить установку в сеть, а затем приступить к непосредственному выполнению опытов по определению коэффициента мощности электродвигателя при изменении его загрузки и подключении батареи статических конденсаторов, проведя для этой цели десять опытов.

3. Изменяя загрузку электродвигателя, начиная с холостого хода (лампы накаливания не включены) и постепенно увеличивая количество включенных ламп накаливания с помощью выключателей *SA*1...*SA*4, снять показания контрольно-измерительных приборов. Опыты выполнить без включения емкости и с ней. Данные измерений (фазного напряжения $U_ф$ по вольтметру *PV*1, линейного тока $I_л$ по амперметру *PA*1, фазной мощности $P_ф$ электродвигателя по ваттметру *PW*, частоты вращения n вала электродвигателя по тахометру, напряжения постоянного тока $U_г$ по вольтметру *PV*2, силы постоянного тока $I_г$ по амперметру *PA*2, силы тока в цепи емкости $I_с$ по амперметру *PA*3) занести в табл. 4.1.

4. По результатам измерений вычислить по следующим выражениям и записать в табл. 4.1 следующие величины:

- полную мощность электродвигателя:

$$S = 3U_{ф}I_{л}, \tag{4.7}$$

где $U_{ф}$ – фазное напряжение, В;

$I_{л}$ – линейный ток, А;

- коэффициент мощности электродвигателя:

$$\cos \varphi = 3P_{ф} / S, \tag{4.8}$$

где $P_{ф}$ – активная мощность одной фазы, Вт;

- реактивную мощность электродвигателя:

$$Q = S \sin \varphi = S\sqrt{1-\cos^2 \varphi}, \tag{4.9}$$

- активный и реактивный токи фазы двигателя:

$$I_{а} = I_{л}\cos \varphi, \tag{4.10}$$

$$I_{р} = I_{л}\sin \varphi, \tag{4.11}$$

- мощность генератора:

$$P_{г} = U_{г}I_{г}, \tag{4.12}$$

где $U_{г}$, $I_{г}$ – показания вольтметра и амперметра на постоянном токе.

Таблица 4.1. **Результаты исследования коэффициента мощности электродвигателя**

№ п/п	Нагрузка	Измерения						Вычисления					
		$U_{ф}$	$I_{л}$	$P_{ф}$	n	$U_{г}$	$I_{г}$	S	cos φ	Q	$I_{а}$	$I_{р}$	$P_{г}$
		В	А	Вт	мин$^{-1}$	В	А	В · А	–	вар	А	А	Вт
Данные опытов без батареи конденсаторов													
1	Холостой ход												
2	Включено ламп:												
	- одна												
…	…												
5	- четыре												
Данные опытов с батареей конденсаторов													
6	Холостой ход												
7	Включено ламп:												
	- одна												
…	…												
10	- четыре												

5. По полученным данным построить зависимость cos φ = f ($P_г$ / $P_{гн}$), одна из которых соответствует выключенным конденсаторам, вторая – включенным (при построении кривых по оси абсцисс откладывается мощность генератора в относительных единицах $P_г$ / $P_{гн}$, а по оси ординат – соответствующее значение коэффициента мощности cos φ).

Объяснить характер изменения построенных кривых.

6. Исходя из данных опытов определить мощность батареи статических конденсаторов и ее емкость, для полной компенсации реактивной мощности.

$$Q_c = P\ (\mathrm{tg}\ \varphi_1 - \mathrm{tg}\ \varphi_2), \qquad (4.13)$$

где $P = 3P_ф$ – активная мощность электродвигателя, Вт;

tg φ_1, tg φ_2 – соответственно тангенсы угла сдвига фаз до и после установки компенсирующего устройства (батареи статических конденсаторов).

$$3C = \frac{Q_c \cdot 10^9}{2\pi f U^2}, \qquad (4.14)$$

где f = 50 Гц – частота тока питающей сети;

U = 220 В – напряжение на фазе конденсатора.

Контрольные вопросы

1. Что такое коэффициент мощности и как он влияет на режим работы электрооборудования и на работу системы электроснабжения?
2. Какое значение имеет улучшение коэффициента мощности для народного хозяйства?
3. Какие условия влияют на величину коэффициента мощности асинхронного электродвигателя?
4. Перечислите и поясните способы улучшения коэффициента мощности.
5. Постройте по опытным данным векторную диаграмму токов с учетом компенсации сдвига фаз (с включенной емкостью) и покажите все точки и углы сдвига фаз на ней.
6. Как определить мощность и емкость трехфазной батареи статических конденсаторов для компенсации реактивной мощности?

Лабораторная работа 5.
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Цель работы:

1. Изучить назначение, устройство, работу и освоить методику снятия защитной характеристики автоматического выключателя.
2. Ознакомиться с конструкциями выключателей и их техническими данными.
3. Собрать электрическую схему лабораторной установки (с ее проверкой) для снятия защитных характеристик теплового и электромагнитного расцепителей автоматического выключателя типа АП50-3МТ.
4. Снять защитные характеристики автоматического выключателя типа АП50-3МТ.
5. Освоить методику выбора автоматических выключателей для различных электроустановок.

Объект и средства исследования. На рабочем месте расположена лабораторная установка, в которой ***объектом исследования*** является автоматический выключатель типа АП50-3МТ. ***Средствами исследования*** служат: лабораторный автотрансформатор *TV*1 типа ЛАТР-2М; трансформатор напряжения *TV*2, имеющий первичное напряжение 220 В, вторичное – 12 В; трансформатор тока УТТ-5 с первичным номинальным током 15, 50 А; амперметр *PA* типа Э59 электромагнитной системы с пределами измерения 5, 10 А; секундомер.

5.1. Основные теоретические сведения

В зависимости от характера возможных повреждений или ненормальных режимов работы электрических приводов различают следующие наиболее простые и распространенные виды защит, чаще всего применяемые в сельскохозяйственных установках:

1. Максимально-токовая (максимальная) – предназначена для защиты электродвигателей от токов короткого замыкания или чрезмерно больших толчков тока, которые могут возникнуть в результате заклинивания рабочего механизма, нестабильной в широких пределах загрузки электродвигателей за счет неравномерной подачи материалов в рабочую машину, разнообразных свойств обрабатываемой продукции и т. д. Этот вид защиты осуществляется с помощью плавкой вставки предохранителей, электромагнитного реле максимального тока, применяемого для наиболее ответственных объектов (мощные электро-

двигатели или электрические сети), и электромагнитного расцепителя максимального тока автоматического выключателя.

2. Тепловая (от небольших, но длительных перегрузок) – предназначена для защиты электродвигателей от недопустимого перегрева при сравнительно небольших по величине (более 25…30 % от номинального тока электродвигателя, $I_{\text{н. дв}}$), но продолжительных перегрузках и осуществляется с помощью теплового реле или теплового расцепителя автоматического выключателя. Отключение производится с выдержкой времени, обратно зависимой от тока перегрузки (чем больше перегрузка, тем меньше выдержка времени).

В настоящее время более современной защитой, устанавливаемой в электромагнитных пускателях вместо электротепловых реле и реагирующей непосредственно на температуру обмоток электродвигателя, является встроенная температурная защита типа УВТЗ-1М, УВТЗ-4А(В). В качестве датчика температуры используются полупроводниковые элементы (позисторы), встраиваемые в лобовые части обмотки электродвигателя. В комплект УВТЗ входит управляющее устройство, состоящее из преобразователя и исполнительного реле. Устройство УВТЗ работает на цепь питания катушки электромагнитного пускателя.

3. Минимальная (нулевая) – предназначена для отключения электродвигателя от сети при снижении напряжения ниже установленного, что могло бы привести к перегреву и «опрокидыванию» электродвигателя вследствие снижения вращающего момента, исчезновения напряжения и от самозапуска при восстановлении напряжения. Этот вид защиты осуществляется с помощью катушек электромагнитных пускателей и контакторов, у которых напряжение отпадания составляет $0{,}4…0{,}5U_{\text{н}}$, а для более ответственных объектов – с использованием электромагнитного реле напряжения.

4. Защита электродвигателей от работы на двух фазах (неполнофазный режим) – осуществляется включением нагревательных элементов электротепловых реле в рассечку двух фаз, питающих электродвигатель. Следует заметить, что надежность такого рода защиты не весьма высокая. Более надежная защита электродвигателей от работы на двух фазах осуществляется с помощью реле обрыва фаз (типа Е-511 или других), состоящего из реле напряжения, включаемого между нулевым проводом электродвигателя и нулем «звезда» трех конденсаторов. При перегрузке или обрыве одной из фаз реле срабатывает и своими контактами отключает от сети электромагнитный пускатель. Для целей защиты электродвигателей от работы на двух фазах также используется устройство фазочувствительной защиты, регулирующее

изменение угла сдвига между токами нагрузки электродвигателя и надежно защищающее его от неполнофазного режима и больших перегрузок, что имеет место при потере фазы и заклинивании ротора.

Одним из современных, широко распространенных средств защиты электродвигателей и других электрических установок от ненормальных режимов работы является автоматический выключатель, который кроме этого служит для нечастых оперативных коммутаций электрических цепей и установок. Чтобы не допускать обгорания контактов, автоматический выключатель допускается включать не более 6…30 раз в час в зависимости от типа автоматического выключателя. Таким образом, автоматический выключатель совмещает функции рубильника и аппарата защиты. Наиболее широкое распространение в сельском хозяйстве (в порядке уменьшения их количества) получили установочные автоматические выключатели типа АП-50, А 3100, АЕ-2000, А 3700, а также серии ВА. Автоматические выключатели различаются по назначению, роду тока и величине напряжения, наличию тех или иных расцепителей и их конструкции, установкам по номинальному току срабатывания расцепителей, числу полюсов, наличию свободных контактов, способу монтажа (присоединения внешних проводников). Автоматические выключатели АП50 могут иметь:

- тепловой расцепитель (исполнение Т);
- электромагнитный максимального значения и тепловой расцепитель (исполнение МТ);
- дополнительные расцепители – минимального напряжения на 127, 220, 380 В переменного тока (исполнение Н) или максимального тока в нулевом проводе на токи отсечки 10, 16, 25, 30, 40 и 50 А (исполнение 0);
- неавтоматические выключатели, рассчитанные на номинальный ток 50 А;
- блок-контакты – с 1НО и 1НЗ; с 2НО и 2НЗ (НО – нормально открытый, НЗ – нормально закрытый);
- пластмассовый корпус, помещенный в металлическую оболочку (категории Б).

По току отсечки автоматические выключатели калибруются по переменному току, поэтому в цепи постоянного тока ток отсечки будет иметь значения на 30 % больше.

Автоматические выключатели А 3100 выпускаются без расцепителей, с тепловым расцепителем, с электромагнитным расцепителем, с тепловым и электромагнитным расцепителями; с блок-контактами и без них, с передним или задним присоединением внешних проводов.

Расцепители автоматических выключателей А 3160 монтируют непосредственно в корпусе, а расцепители остальных типов – съемные, с отдельным кожухом.

Автоматические выключатели АЕ-2000 изготовляют с расцепителями – тепловым, электромагнитным максимального тока, тепловым и электромагнитными максимального тока и минимального напряжения, а также с блок-контактами и с температурной компенсацией. Кроме того, конструкция автоматического выключателя с большим коммутационным током имеет электронное устройство выключателя, состоящее из узла питания и усилителя, выполненного в виде отдельного блока, который помещается в корпусе автоматического выключателя. Для применения в животноводческих помещениях такие выключатели встраивают в герметизированные оболочки распределительного устройства.

Автоматические выключатели А63 различаются по конструкции расцепителя: с электромагнитным токовым расцепителем и гидравлическим замедлителем срабатывания (исполнение МГ), с электромагнитным токовым расцепителем без гидравлического замедлителя срабатывания (исполнение М); по способу монтажа: для крепления на панели с передним присоединением проводов, для крепления за панелью с задним присоединением проводов.

Автоматические выключатели АК-50 бывают с электромагнитным расцепителем и гидравлическим замедлителем срабатывания (исполнение МГ), только с электромагнитным расцепителем (исполнение М), без расцепителей – неавтоматические выключатели на номинальный ток 50 А.

Автоматические выключатели А 3700 имеют тепловой, электромагнитный, тепловой электромагнитный расцепители, а также могут иметь расцепитель минимального напряжения.

Освоен выпуск автоматических выключателей серий ВА14, ВА19, а также автоматических выключателей ВА41-39 и ВА51.

Автоматические выключатели ВА14 различаются по роду тока и величине тока главной цепи, числу полюсов, назначению защитной характеристики. Они состоят из следующих основных узлов: механизма свободного расцепления, включающего в себя тепловой и электромагнитный расцепители и подвижный контакт, неподвижного контакта с выводным зажимом, рычага крепления, дугогасительного устройства, пластмассового корпуса и крышки. Отключение выключателя при перегрузках и токах короткого замыкания происходит независимо от того, удерживается ли рукоятка управления во включенном положении или нет.

Автоматические выключатели ВА19 классифицируются по току, напряжению, видам максимальных расцепителей тока, уставкам по токам срабатывания в зоне токов короткого замыкания, числу полюсов, наличию свободных контактов, способу монтажа и присоединения внешних проводников, климатическому исполнению (УХЛ3, ХЛ2, Т3). Выключатель состоит из следующих сборочных единиц и деталей: корпуса, контактной системы, механизма управления, максимальных расцепителей тока (теплового и электромагнитного), калибровочного винта, дугогасительного устройства, зажимов, вспомогательных деталей. Отдельные исполнения выключателей имеют свободные контакты: один размыкающий и один замыкающий. Выключатель имеет указатель коммутационного положения, в качестве указателя использована ручка управления.

Контактная система и механизм автоматического выключателя смонтирован на пластмассовой панели. Автоматический выключатель оборудован подвижными и неподвижными контактами, дугогасительным устройством. Для воздействия на защелку отключающего механизма применяются один или несколько расцепителей, отключающих их главные контакты. По принципу действия расцепители могут быть электромагнитными, тепловыми и комбинированными (устанавливаются оба). В последнем случае электромагнитный и тепловой расцепители могут независимо отключать автоматический выключатель. Иногда устанавливают расцепитель минимального напряжения, встроенный в автоматический выключатель.

В автоматическом выключателе с электромагнитным расцепителем максимального тока (рис. 5.1, *а*) по достижении током установленного предельного значения или короткого замыкания катушка *3* втягивает стальной сердечник *4* и освобождает защелку *2*, которая под действием пружины *1* разрывает силовые контакты *5*.

В автоматическом выключателе с электромагнитным расцепителем минимального (нулевого) напряжения или тока (рис. 5.1, *б*) катушка *3* удерживает сердечник *4* и связанную с ним защелку *2* до тех пор, пока напряжение сети, а следовательно, и ток в катушке не снизится до установившегося предельного значения (35 % и более) или не исчезнет совсем, после чего сердечник *4* отпускается и защелка освобождает пружину *1*. Под действием пружины *1* цепь силовых контактов *5* разрывается. Включение автоматического включателя возможно при напряжении не менее 80 % номинального. Электромагнитные расцепители срабатывают практически мгновенно – собственное время срабатывания составляет 0,02 до 0,03 с.

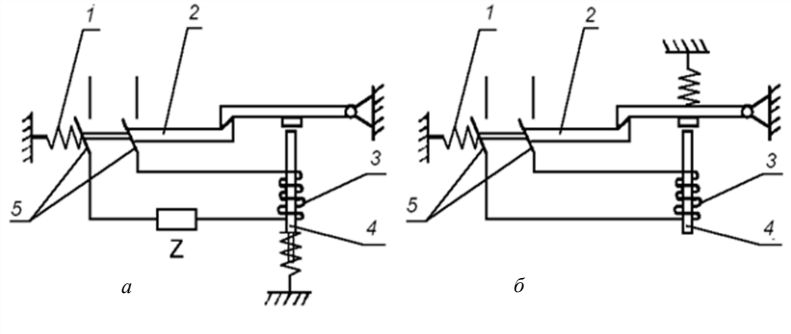


Рис. 5.1. Схемы действия электромагнитных расцепителей:
а – максимального тока; *б* – минимального напряжения;
1 – пружина; *2* – защелка; *3* – катушка; *4* – стальной сердечник; *5* – контакты

В автоматический выключатель встраивается электротепловое реле прямого действия, называемое тепловым расцепителем. Тепловой расцепитель действует так же, как и электротепловое реле электромагнитного пускателя (рис. 5.2). Ток, проходя по нагревательному элементу *4*, нагревает биметаллическую пластину *3*, которая снимает защелку *2*, пружину *1* и тем самым производит отключение силовых контактов *5*. В отличие от электротеплового реле электромагнитного пускателя, тепловой расцепитель автоматического выключателя имеет меньший зазор между биметаллической пластиной и механизмом отключения. Это уменьшает время срабатывания теплового расцепителя при больших токах.

Тепловой расцепитель срабатывает с выдержкой времени, обратно зависимой от тока. Из холодного состояния при температуре окружающей среды 40 °С и нагрузке 110 % от номинальной тепловой расцепитель не срабатывает в течение часа, а срабатывает при нагрузке, равной 1,35 номинальной, не более чем за 30 мин, при шестикратной нагрузке – не более чем за 2…10 с.

Таким образом, в автоматическом выключателе предусмотрена защита от токов короткого замыкания или токов, достаточных для срабатывания электромагнитного расцепителя, и от небольших длительных перегрузок. В связи с этим не следует устанавливать плавкие вставки предохранителей и электротепловые реле там, где имеются автоматические выключатели с калиброванными расцепителями.

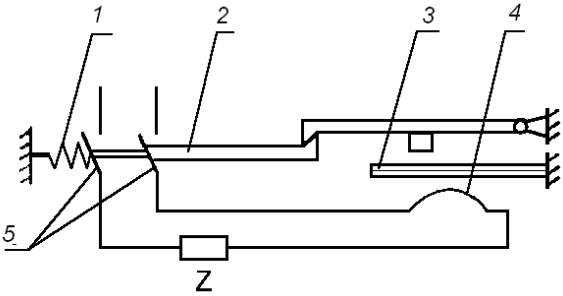


Рис. 5.2. Схема действия теплового расцепителя:
1 – пружина; *2* – защелка; *3* – биметаллическая пластина;
4 – нагревательный элемент; *5* – контакты

Контакты автоматического выключателя замыкают вручную, нажатием кнопки или поворотом рычага. Одновременно с замыканием контактов растягивается пружина, которая в растянутом положении удерживается защелкой. Предусмотрено ручное и автоматическое отключение. При ручном отключении нажимают кнопку или возвращают рычаг в положение «отключено». Автоматическое отключение происходит при возникновении перегрузок. В этом случае механизм переходит в положение «автоматически отключено», а в автоматическом выключателе с рукояткой рукоятка занимает среднее положение. Чтобы «взвести» автоматический выключатель, рукоятку возвращают сначала в положение «отключено», а затем спустя 2…4 мин, если сработал тепловой расцепитель или сразу же при срабатывании электромагнитного расцепителя, выполняют повторное включение. Контакты каждого полюса заключены в дугогасительную камеру. Гашение дуги происходит путем ее дробления, деионизации, рекомбинации и локализации в ограниченном объеме, поперечными медными или стальными пластинками.

Автоматические выключатели типа АП-50 наиболее распространены в сельском хозяйстве. Они имеют, например, следующие условные обозначения на крышке (рис. 5.3):

- А – автомат;
- П – промышленный;
- число 50 – наибольший ток в амперах;
- цифра после тире – число расцепителей (2 или 3);

• буква М – электромагнитный расцепитель, Т – тепловой расцепитель, Н – расцепитель минимального напряжения (буква О вместо буквы Н обозначает расцепитель максимального тока в нулевом проводе);

• ~500 – на переменный ток напряжением 500 В;

• –220 В – на постоянный ток напряжением 220 В;

• 1,6 А – номинальный ток автоматического выключателя (вместо цифры 1,6 могут быть цифры 2,5; 4,0; 6; 4; 10,0; 16,0; 25,0; 40,0; 50,0);

• отсечка 11 $I_н$ – электромагнитный расцепитель срабатывает при 11-кратном номинальном токе (вместо числа 11 могут быть 3, 5, 7, 9, 13);

• 1 Б/К перекл. – наличие одной пары переключающих блок-контактов.

АП50	– 2МТН
~500	–220 V
1,6 А	Отсечка 11 $I_н$
1 Б/К	перекл.

Рис. 5.3. Технический паспорт автоматического выключателя типа АП-50

Автоматический выключатель с комбинированной защитой (тепловой от перегрузок и электромагнитной от токов коротких замыканий) выбирают исходя из следующих условий:

$$U_{н.\,а.\,в} \geq U_{н.\,уст}, \tag{5.1}$$

$$I_{н.\,т.\,р} \geq (1{,}1 \ldots 1{,}3)\, I_{н.\,дв}, \tag{5.2}$$

$$I_{н.\,эл.\,р} \geq (1{,}1 \ldots 1{,}6)\, I_{н.\,дв}, \tag{5.3}$$

где $U_{н.\,а.\,в}$ и $U_{н.\,уст}$ – номинальные напряжения автоматического выключателя и электроустановки;

$I_{н.\,т.\,р}$ и $I_{н.\,эл.\,р}$ – номинальные токи теплового расцепителя и электромагнитного расцепителя максимального тока;

$I_{н.\,дв}$ – номинальный ток двигателя.

Значение тока (А) определяется исходя из следующего условия уставки автоматического выключателя, от которого напряжение подается на группу двигателей:

$$I_{н.\,эл.\,р} \geq (1{,}1 \ldots 1{,}6)\, [\Sigma I_{н.\,дв} + (I_{п.\,дв} - I_{н.\,дв})], \tag{5.4}$$

где $\Sigma I_{н.\,дв}$ – сумма номинальных токов двигателей;

$I_{п.\,дв} - I_{н.\,дв}$ – разность значений пускового и номинального токов у электродвигателя с наибольшими данными значениями.

5.2. Порядок выполнения работы

1. Начертить принципиальную электрическую схему лабораторной установки (рис. 5.4) и таблицу результатов опытов (табл. 5.1). Записать характеристики и паспортные величины объекта и средств исследования.

2. Изучить электрическую схему лабораторной установки (рис. 5.4). После разрешения преподавателя включить установку в сеть, а затем приступить к непосредственному выполнению опытов по снятию защитных характеристик автоматического выключателя типа АП50-3МТ.

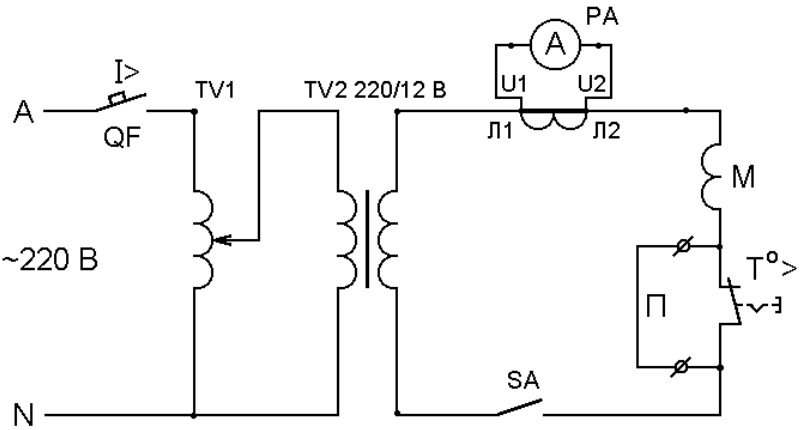


Рис. 5.4. Электрическая схема лабораторной установки

3. Произвести испытание автоматического выключателя АП50-3МТ. Для испытания электромагнитного расцепителя необходимо зашунтировать тепловой расцепитель перемычкой П. Включить установку и с помощью регулятора напряжения резко увеличить ток до мгновенного срабатывания электромагнитного расцепителя. При определении величины тока срабатывания необходимо показания амперметра (в амперах) умножить на коэффициент трансформации трансформатора тока. Опыт повторить трижды, записав его, вычислить при этом среднее значение тока мгновенного срабатывания и сравнить его с заводским или паспортным значением.

Таблица 5.1. **Опытные данные по испытанию теплового расцепителя**

Показатель	В кратностях номинального тока $I_{уст.\ тепл}$, А				
	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Ток срабатывания теплового расцепителя					
Время срабатывания теплового расцепителя, с					

4. Снять характеристику теплового расцепителя, для чего удалить перемычку П, включить установку и задать как можно быстрее ток величиной, кратной номинальному (2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 кратности), после чего установку выключить. После остывания теплового расцепителя в течение 5 мин включить установку снова и одновременно секундомер, по которому и определить время срабатывания теплового расцепителя при данной кратности. Опыт повторить при различных значениях тока срабатывания, равного другим кратностям номинального тока теплового расцепителя. По кривой защитной характеристике теплового расцепителя $I = f(t)$ определить номинальный ток $I_{уст.\ тепл}$ и сравнить его с заводским или паспортным значением:

$$I_{уст.\ тепл} = I_{2\ мин} / 1{,}5, \qquad (5.5)$$

где $I_{2\ мин}$ – ток срабатывания теплового расцепителя при времени срабатывания 2 мин, А.

5. Выбрать автоматический выключатель типа АП50-3МТН для электродвигателей постоянного или переменного тока, обеспечивающий защиту от короткого замыкания, небольших длительных перегрузок и от снижения напряжения. Номинальные данные электродвигателя задаются по запросу студента преподавателем.

При выборе автоматического выключателя следует руководствоваться следующими рекомендациями: автоматические выключатели выбирают по номинальному напряжению, величине тока, числу полюсов, виду защиты и способу защиты от воздействия окружающей среды. Например, автоматический выключатель типа АП50 при использовании в неблагоприятных условиях среды устанавливают в дополнительную пыленепроницаемую оболочку из алюминиевого сплава (силумина). В крышке оболочки смонтированы толкатели «Пуск» и «Стоп», нажимающие на соответствующие кнопки автоматического выключателя.

Номинальные токи автоматического выключателя и уставок расцепителей следует выбирать по расчетному току цепи и возможному току перегрузки. Коммутационную способность автоматического выключателя проверяют по допустимому току короткого замыкания.

Между номинальным током теплового расцепителя $I_{\text{уст. тепл}}$ и рабочим током цепи $I_{\text{уст. раб}}$ должно выполняться условие

$$I_{\text{уст. тепл}} = 1{,}25 I_{\text{уст. раб}}. \quad (5.6)$$

Ток электромагнитного расцепителя $I_{\text{уст. эм}}$ для питания одиночных постоянного тока и асинхронных переменного тока электродвигателей должен соответствовать следующему условию:

$$I_{\text{уст. эм}} = 1{,}25 I_{\text{пуск}}, \quad (5.7)$$

где $I_{\text{пуск}}$ – пусковой ток электродвигателя, А.

Для группы электродвигателей учитывается пусковой ток большого по мощности электродвигателя $I_{\text{пуск. макс}}$ и суммарный ток остальных:

$$I_{\text{уст. эм}} = 1{,}25\left(\sum_{i=1}^{n-1} I_{\text{раб. } i} + I_{\text{пуск. макс}} \right), \quad (5.8)$$

где n – число электродвигателей.

При выборе тока уставки теплового расцепителя необходимо учитывать температуру окружающей среды $\Theta_{\text{окр}}$. При температуре окружающей среды +40 °С ток уставки можно рассчитать по выражению

$$I_{\text{уст. тепл}} = 1{,}25 I_{\text{раб}} / \alpha, \quad (5.9)$$

где $\alpha = 1 + 0{,}006\,(40\ ^\circ\text{C} - \Theta_{\text{окр}})$ – коэффициент пропорциональности.

Установку тока несрабатывания теплового расцепителя в случае несовпадения расчетной величины $I_{\text{уст. тепл}}$ и номинальной величины уставки тока теплового расцепителя автоматического выключателя типа АП50, используемого в лабораторной работе, изменяют поворотом рычага уставки. При перемещении рычага вниз ток уставки уменьшается. Верхнее положение рычага соответствует номинальному току расцепителя $I_{\text{н. уст. тепл}}$, нижнее – $0{,}6 I_{\text{н. уст. тепл}}$.

Затем необходимо убедиться, соответствует ли выбранный автоматический выключатель по току отсечки электромагнитного расцепителя для данного электродвигателя или группы электродвигателей (токоприемников), чтобы кратность пускового тока была меньше кратности тока отсечки и, следовательно, автоматический выключатель проходил по условиям пуска. Ток срабатывания теплового расцепителя регулируется винтом, ввернутым в свободный конец биметаллической пластины, а электромагнитного расцепителя – изменением предварительного сжатия пружины.

Контрольные вопросы

1. Назовите и поясните основные виды защит, применяемых в сельскохозяйственных установках при их ненормальных режимах работы.
2. Каково назначение и устройство автоматических выключателей различных типов?
3. Объясните принцип действия различных расцепителей: электромагнитного максимального значения, электромагнитного минимального значения, электротеплового.
4. В чем заключается преимущество использования автоматического выключателя?
5. В чем наблюдается принципиальное отличие автоматических выключателей различных типов между собой?
6. Как рассчитывается ток уставки электромагнитного расцепителя для защиты электрических установок?

Лабораторная работа 6.
ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТОРОВ И МАГНИТНЫХ ПУСКАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы:

1. Изучить назначение, устройство, технические характеристики, выбор контакторов и магнитных пускателей переменного тока.
2. Исследовать контактор и магнитный пускатель переменного тока.
3. Изучить схемы управления работой короткозамкнутого асинхронного электродвигателя с помощью электромагнитного пускателя: в заданной последовательности, одновременного включения, реверсивного.

Объект и средства исследования. Лабораторная работа выполняется на стенде НТЦ-09 «Электрические аппараты», на котором ***объектом исследования*** являются электромагнитные пускатели ПМЛ-1100 110 В, контактор КУ 09-18 220 В.

Средствами исследования служат: лабораторный выпрямительный мост, автотрансформатор типа ЛАТР-2М, источник питания постоянного тока 24 В, вольтметры *PV*1 и *PV*2, амперметры *PA*1, *PA*2 и *PA*3.

6.1. Основные теоретические сведения

Контакторы – это коммутационные аппараты, предназначенные для частых включений и отключений электрических цепей при нормальных режимах работы. Контакторы применяются в цепях напряжения до 500 В переменного тока и 600 В постоянного тока.

Контакторы подразделяют:

а) на электромагнитные, которые срабатывают при помощи электромагнита;

б) постоянного тока – линейные и ускорения;

в) переменного тока промышленной частоты;

г) переменного тока повышенной частоты (до 10 кГц).

Контакторы, служащие для замыкания или размыкания электрических цепей, называют линейными, а контакторы, служащие для закорачивания отдельных ступеней пускового реостата, – контакторами ускорения.

Основные узлы любого электромагнитного контактора: электромагнитный механизм, главные контакты, дугогасительное устройство, блок-контакты.

Принцип действия контакторов заключается в следующем: при подаче напряжения на обмотку электромагнита якорь притягивается. Подвижный контакт, связанный с якорем, замыкает или размыкает главную цепь. Дугогасительная система обеспечивает быстрое гашение дуги. Вспомогательный блок-контакт используется для согласования работы контактора с другими аппаратами.

Тяговая характеристика электромагнита переменного тока близко подходит к противодействующей характеристике, в результате контакторы переменного тока обладают высоким коэффициентом возврата (0,6...0,7), что дает возможность осуществить защиту объекта от падения напряжения.

Промышленностью выпускаются следующие основные серии контакторов переменного тока:

а) контакторы серии КТ на номинальные токи 75, 150, 300 и 600 А и номинальные напряжения 380 и 500 В.

б) контакторы серии КИ предназначены в основном для установки в магнитных пускателях на токи 60, 100 и 150 А и напряжением 380 В.

Контакторы выполняют свои функции удовлетворительно, если напряжение на зажимах катушки

$$U = (0{,}85...1{,}10)U_{\text{ном}}. \qquad (6.1)$$

Снижение напряжения ниже $0{,}85U_{ном}$ уменьшает силу, удерживающую якорь, в результате чего при некотором напряжении отпадания $U_{отп}$ происходит отрыв якоря от полюсов. Наименьшее напряжение $U_{ср}$, при котором происходит включение контактора, называют напряжением срабатывания.

Отношение

$$K = U_{отп} / U_{ср} \qquad (6.2)$$

называют коэффициентом возврата.

Механической характеристикой контактора называют зависимость механических противодействующих сил от величины рабочего зазора $F_{мех} = f(\delta)$.

Противодействующие силы в электромагнитных контакторах создаются с помощью пружин.

Магнитный пускатель – это контактор переменного тока, предназначенный для дистанционного управления и защиты от понижения напряжения питающей сети и токов перегрузки асинхронных двигателей малой и средней мощности.

Основным узлом магнитного пускателя, как и контактора, является электромагнит переменного тока, приводящий в действие систему с контактами.

Обычно в магнитных пускателях применяют трехполюсный контактор переменного тока, имеющий три главных замыкающих контакта и от одного до четырех вспомогательных, блокировочных, или блок-контактов.

В кожух магнитного пускателя кроме контактора часто встраивается тепловое реле, выполняющее токовую защиту с выдержкой времени, зависящей от величины тока.

Магнитные пускатели предназначены для автоматического и полуавтоматического дистанционного управления трехфазными электродвигателями и другими электроустановками мощностью до 100 кВт при напряжении питания до 660 В и частоте включения 600…1 200 раз в час. Они выполняют следующие функции:

- коммутационные переключения (включение, отключение, реверсирование, торможение, переключение схемы соединения фаз);
- защиту от снижения или исчезновения напряжения (нулевая защита);
- защиту от небольших, но длительных перегрузок (при наличии электротеплового реле);
- защиту от самозапуска при кратковременном снятии напряжения (нулевая блокировка).

В то же время электромагнитные пускатели не защищают электроустановку от токов короткого замыкания.

Различаются электромагнитные пускатели по назначению, величине или габариту (передаваемой мощности), способу управления электродвигателем (реверсивные и нереверсивные), по роду защиты от окружающей среды (открытые, защищенные, пылеводонепроницаемые), наличию электротеплового реле, числу и роду блок-контактов, номинальному напряжению втягивающей катушки.

Основным элементом электромагнитного пускателя является силовой трехполюсный контактор с прямоходовой или откидной электромагнитной системой (рис. 6.1), которая состоит из катушки *6*, сердечника *7* и якоря *8*. В Ш-образной магнитной системе (рис. 6.1, *а*) втягивающая катушка *6* размещается на среднем керне сердечника *7*.

При П-образной форме сердечника (рис. 6.1, *б*) электромагнит выполняется в виде двух последовательно соединенных катушек. Якорь шарнирно соединен с изоляционной траверсой *5*, на которой закреплены подвижные мостики главных контактов *4*. Шток якоря опирается на пружины *2*, служащие для смягчения ударов при замыкании магнитной системы включающегося пускателя.

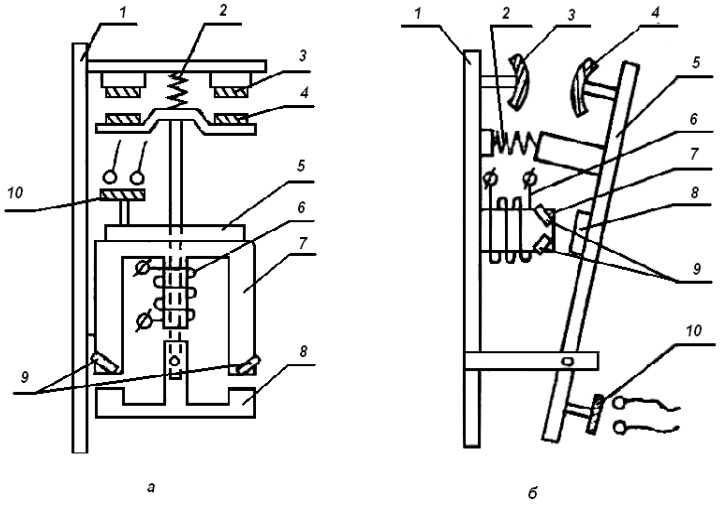


Рис. 6.1. Устройство электромагнитных пускателей с прямоходовой Ш-образной (*а*) и поворотно-рычажной П-образной (*б*) магнитными схемами:
1 – основание; *2* – пружина; *3* – неподвижный контакт; *4* – подвижный контакт; *5* – траверса; *6* – катушка; *7* – сердечник; *8* – якорь; *9* – короткозамкнутый виток; *10* – мостик блок-контактов

Магнитная система пускателей переменного тока собрана из отдельных листов электротехнической стали. Так как катушка пускателя питается переменным током, в магнитопроводе возникает пульсирующий магнитный поток. Для устранения вибрации, износа якоря и подгорания главных контактов торец сердечника в области прилегания к нему якоря разрывают и часть его охватывают демпферным короткозамкнутым витком из меди или латуни. В короткозамкнутом витке переменный магнитный поток индуцирует ЭДС, и протекающий по нему ток создает свой магнитный поток, сдвинутый по фазе по отношению к основному. Таким образом, в воздушном зазоре возникают два магнитных потока, сдвинутых по фазе. Их сумма в любой момент не равна нулю, следовательно, сила притяжения электромагнита не уменьшается до нуля, что устраняет вибрацию магнитной системы.

Ток катушки электромагнита переменного тока зависит главным образом от величины ее индуктивного сопротивления. В отключенном состоянии электромагнита воздушный зазор между якорем и сердечником велик, поэтому индуктивное сопротивление катушки мало. При включении в сеть по катушке протекает большой пусковой ток, в 10…20 раз превышающий значение рабочего тока при малом воздушном зазоре, вследствие чего при частых включениях катушка может перегреваться. Это обстоятельство ограничивает допустимую частоту включения электромагнитов переменного тока.

Контакты электромагнитных пускателей подразделяются на главные (силовые) и блок-контакты (блокировочные или вспомогательные). Главные контакты предназначены для замыкания и размыкания силовых цепей, по которым протекают токи нагрузки электродвигателей и других потребителей. Главные контакты, предназначенные для разрыва электрической цепи под нагрузкой, оснащаются дугогосящим устройством. Контакты без дугогосящих устройств применяются в основном для шунтирования пусковых и других сопротивлений (без разрыва электрической цепи). Блок-контакты бывают замыкающие и размыкающие, они предназначены для коммутирования цепей управления и сигнализации и поэтому рассчитаны на небольшие номинальные токи (6...10 А).

В качестве органов управления могут использоваться встроенные и внешние кнопки и переключатели, внешние командоконтроллеры и реле управления. Встроенные кнопки («Пуск» и «Стоп» – на нереверсивных пускателях; «Вперед», «Назад» и «Стоп» – на реверсивных; «Реле» – для возврата электротеплового реле после его срабатывания) размещают на кожухе или оболочке электромагнитных пускателей защищенного и пылевлагонепроницаемого исполнений.

Реверсивные электромагнитные пускатели состоят из двух одинаковых контакторов, укрепленных на общем основании и электрически сблокированных (посредством размыкающих контактов) так, что предотвращается одновременное включение обоих контакторов. Кроме того, реверсивные электромагнитные пускатели могут иметь и механическую блокировку, которая предотвращает одновременное нажатие кнопок «Вперед» и «Назад».

По защищенности от воздействия окружающей среды электромагнитные пускатели бывают открытые (без кожуха или оболочки), защищенные, пылеводонепроницаемые. Они рассчитаны для работы при температуре окружающего воздуха от –40 до +40 °С и относительной влажности не более 90 %. Пускатели защищенного исполнения имеют металлический или пластмассовый кожух со съемной крышкой. Металлическая оболочка пускателей пылеводонепроницаемого исполнения имеет специальные резиновые уплотнения, предотвращающие попадание внутрь влаги и пыли.

В настоящее время еще используются устаревшие электромагнитные пускатели общепромышленного назначения серий ПМЕ, ПАЕ и ПА. Более широко используются электромагнитные пускатели серии ПМЛ и малогабаритные серии ПНЕ (табл. 6.1). Контакторы серий ПМЕ, ПМЛ, ПМС, ПМА имеют прямоходовую Ш-образную или П-образную электромагнитную систему, контакторы серий ПАЕ и ПА – поворотно-рычажную конструкцию (см. рис. 6.1, *б*).

В отличие от контакторов, которые всегда выпускаются с открытой схемой соединений, электромагнитные пускатели имеют собранную внутреннюю схему. Поэтому, прежде чем присоединять внешние провода от сети к электродвигателю и к кнопкам управления, необходимо ознакомиться с его внутренней схемой соединений.

Маркировка электромагнитных пускателей серий ПМЕ и ПАЕ расшифровывается следующим образом (табл. 6.1):

- первая цифра после буквенного обозначения серии – величина (габарит) по передаваемой мощности и силе тока главных контактов;

- вторая цифра – исполнение по защищенности от воздействия окружающей среды (1 – открытое, 2 – защищенное, 3 – пылебрызгозащищенное, 4 – пылевлагонепроницаемое);

- третья цифра – наличие реверса и электротеплового реле (1 – нереверсивный без электротеплового реле, 2 – нереверсивный с электротепловым реле, 3 – реверсивный без электротеплового реле, 4 – реверсивный с электротепловым реле).

Таблица 6.1. **Основные технические данные электромагнитных пускателей**

Величина пускателя			0	1	2	3	4	5	6	7
Тип	ПМЕ	$I_н$, А	4	10	25	–	–	–	–	–
		P, кВт	1	4	10	–	–	–	–	–
	ПАЕ	$I_н$, А	–	–	–	40	63	100	160	–
		P, кВт	–	–	–	17	30	55	75	–
	ПА	$I_н$, А	–	–	–	40	63	100	160	–
		P, кВт	–	–	–	17	30	55	75	–
	ПМА	$I_н$, А	–	–	–	40	63	100	160	–
		P, кВт	–	–	–	17	30	55	75	–
	ПМЛ	$I_н$, А	–	10	25	40	63	80	125	200
		P, кВт	–	4	10	17	30	40	55	100
	ПМС	$I_н$, А	–	10	25	40	63	100	160	–
		P, кВт	–	4	10	17	30	55	75	–

Маркировка пускателей серии ПМА расшифровывается следующим образом (табл. 6.1):

- первая цифра – величина по передаваемой мощности (табл. 6.1);

- вторая цифра – исполнение по назначению, наличию электротеплового реле, автоматической позисторной защиты (АПЗ) или встроенной температурной защиты (УВТЗ): 1 – без реле, нереверсивный; 2 – с реле, нереверсивный; 3 – без реле, реверсивный с электрической блокировкой; 4 – с реле, реверсивный с электрической блокировкой; 5 – без реле, реверсивный с электрической и механической блокировками; 6 – с реле, реверсивный с электрической и механической блокировками; 7 – нереверсивный с АПЗ; 8 – реверсивный с АПЗ и механической блокировкой; 9 – нереверсивный с УВТЗ-1М; 0 – реверсивный с электрической и механической блокировками и УВТЗ-1М;

- третья цифра – исполнение по степени защиты и наличию кнопок: 0 – IP00 без кнопок; 1 – IP40 без кнопок; 2 – IP54 без кнопок; 3 – IP40 с кнопками «Пуск» и «Стоп»; 4 – IP54 с кнопками; 5 – IP40 с кнопками и сигнальной лампой; 6 – IP54 с кнопками и сигнальной лампой;

- четвертая цифра (0…9) – исполнение по роду тока цепи управления (постоянный, переменный), напряжению главной цепи (380…660 В) и числу блок-контактов;

- следующие буквы и цифры обозначают климатическое исполнение (У, УХЛ, Т), категорию размещения (2…4) и исполнение по износостойкости (А, Б, В).

Выбор магнитного пускателя и контакторов производится:

а) по номинальному напряжению сети:

$$U_{\text{ном}} = U_{\text{сети}}, \tag{6.3}$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение катушки магнитного пускателя;

б) по номинальному току нагрузки:

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{ном. нагр}}, \tag{6.4}$$

где $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток магнитного пускателя, контактора для конкретного режима работы;

в) по мощности двигателя исполнительного механизма;

г) по режиму работы;

д) по числу включений в час;

е) по номинальному напряжению контактов аппарата:

$$U_{\text{ном. конт}} \geq U_{\text{сети}}; \tag{6.5}$$

ж) по времени включения и отключения.

Рассмотрим некоторые схемы управления при помощи электромагнитного пускателя. Схема управления двухдвигательным приводом с определенной последовательностью включения и одновременным включением (рис. 6.2) используется при управлении, например, двумя транспортерами, когда электродвигатели необходимо включать в определенной последовательности (варианты *а* и *б*). Чтобы предупредить завал продуктом транспортера *Т*1, необходимо вначале пустить транспортер *Т*1, затем *Т*2. Электродвигатель *М*1 включается при обычной схеме при нажатии кнопки *SB*2. Двигатель *М*2 можно включить независимо от двигателя *М*1 только кратковременно, нажимая кнопку *SB*5. На длительную работу двигатель *М*2 можно включить только после того, как включится двигатель *М*1. После этого можно нажать кнопку *SB*4, электромагнитный пускатель *КМ*2 сработает, главными контактами включит двигатель *М*2, а блок-контактами зашунтирует кнопку *SB*4.

Остановка двух двигателей привода происходит при нажатии кнопки *SB*1. Если сработает электротепловое реле *КК*1 двигателя *М*1, то пускатель *КМ*1 отключит оба двигателя – *М*1 и *М*2. Если сработает электротепловое реле *КК*2 двигателя *М*2, то отключится только один двигатель *М*2. Если бы отключался только один двигатель *М*1, то мог бы произойти завал транспортера *Т*1 продуктом.

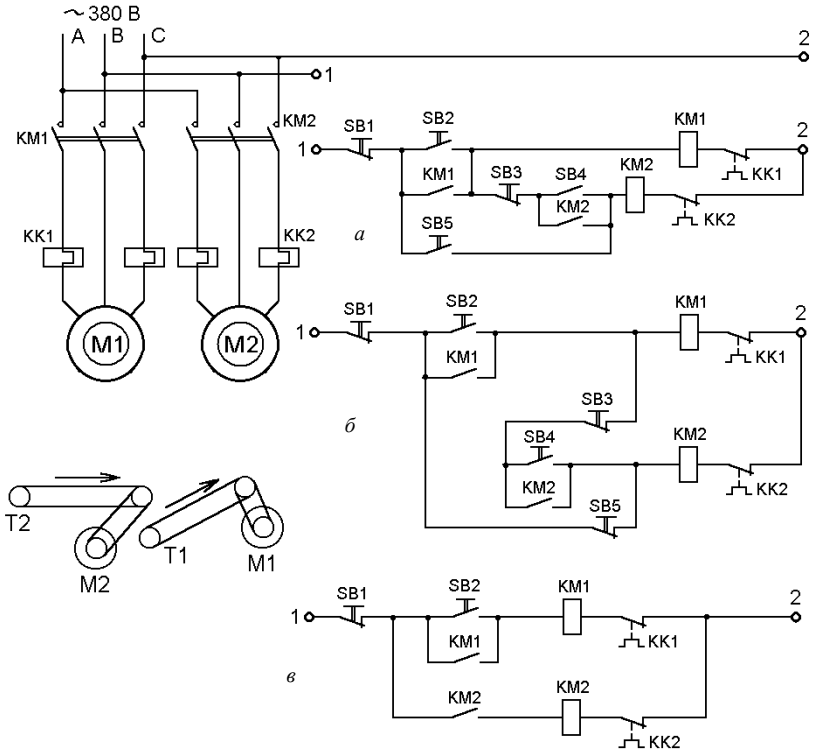


Рис. 6.2. Схемы управления двумя электродвигателями
в заданной последовательности

Когда возникает необходимость управлять двухдвигательным приводом с одновременным включением (вариант *в*), то нужно блок-контакты электромагнитного пускателя *KM*1 включить в цепь питания катушки электромагнитного пускателя *KM*2, а блок-контакты электромагнитного пускателя *KM*2 – параллельно кнопке *SB*2. Тогда при ее нажатии продолжительная работа двух электродвигателей возможна лишь после того, как блок-контакты электромагнитного пускателя *KM*2 зашунтируют кнопку *SB*2.

Для реверсивного управления асинхронным электродвигателем (рис. 6.3) необходимы или два нереверсивных пускателя, или один специальный реверсивный, состоящий из двух. Два пускателя вклю-

чают так, чтобы каждый из них подключал статор двигателя на свое направление вращения.

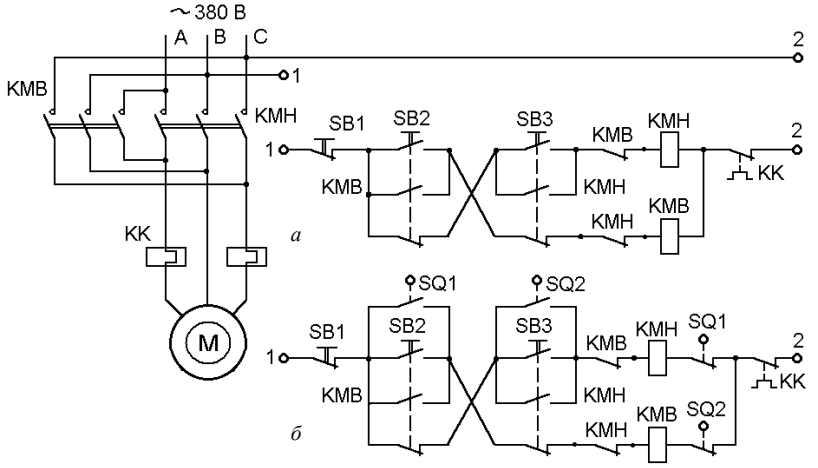


Рис. 6.3. Схемы реверсивного управления электродвигателем

Схема управления включает катушки двух электромагнитных пускателей *KMB* и *KMH*, нагревательные элементы и контакты электротепловых реле, кнопки *SB*1 «Стоп», *SB*2 «Пуск вперед» и *SB*3 «Пуск назад». В схеме реверсивного управления обязательно должны быть блокировки, исключающие одновременное включение двух пускателей *KMB* и *KMH*, в противном случае произойдет короткое замыкание. Для предотвращения одновременного включения двух пускателей управление ими осуществляется через кнопки *SB*2, *SB*3, имеющие как замыкающие, так и размыкающие контакты (вариант *а*). В цепь управления каждой катушки включается замыкающий контакт одной кнопки и размыкающий контакт другой (электрическая блокировка с помощью кнопочной станции). В этом случае при нажатии одновременно двух кнопок *SB*2 и *SB*3 разрываются цепи питания обеих катушек. Однако наличие блокировки только кнопками не исключает включения двух электромагнитных пускателей одновременно. Например, если контакты одного пускателя приварились, то другой кнопкой можно включить другой пускатель и вызвать короткое замыкание. Для предотвращения этого устраивают механическую или электриче-

скую блокировку электромагнитных пускателей с использованием их размыкающих блок-контактов.

Механическая блокировка устроена так, что при включенном одном пускателе второй не может замкнуть свои главные контакты. Такую блокировку имеют специальные реверсивные пускатели. Узел механической блокировки представляет собой устройство, в котором при включении одного пускателя и перемещении его подвижной системы происходит нажатие на шток, поворачивающий коромысло (рычаг). В таком фиксированном положении рычаг не дает возможности произвести утопление второго штока, т. е. препятствует включению другого пускателя, когда включен первый. При отсутствии механической блокировки (когда используются два нереверсивных пускателя) в цепь питания катушек пускателей включают противоположные блок-контакты (вариант *а*).

Когда срабатывает один пускатель, то своими размыкающими блок-контактами он размыкает цепь питания катушки другого пускателя. Реверсирование электродвигателя возможно по этим схемам как при предварительном отключении двигателя кнопкой *SB*1, так и при нажатии кнопки обратного хода. Таким образом, вариант *а* представляет собой схему реверсивного управления с двойной электрической блокировкой.

Если необходимо осуществить автоматическое регулирование в зависимости от пути, то в схему (рис. 6.3, *б*) включают кнопочные переключатели *S*1 и *S*2.

6.2. Порядок выполнения работы

1. Собрать на стенде НТЦ-09 схему согласно рис. 6.4.

2. ЛАТР выставить на диапазон 0…110 В (тумблер *SA*0), после этого верхний (голубой цвет) и нижний переключатели ЛАТРа поставить в положение «0».

3. Тумблеры измерительных приборов *PA*1, *PA*2, *PA*3, *PV*2 поставить в верхнее положение, а тумблер *PV*1 – в нижнее положение (75 В).

4. С разрешения преподавателя включить стенд (тумблер *SA*1).

5. Включить источник питания 24 В (тумблер *SA*4).

6. Тумблер *SA*3 перевести в верхнее положение.

7. Верхним переключателем ЛАТРа увеличивать напряжение и контролировать изменение показаний по приборам *PA*1 и *PV*1, зафиксировав их в момент когда якорь магнитного пускателя втянется в катушку (загорится лампа *HL*1).

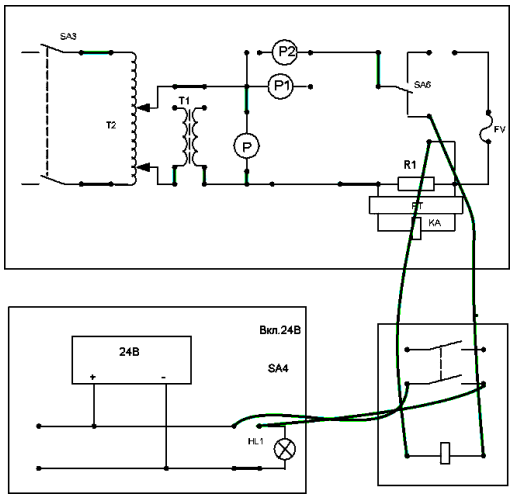


Рис. 6.4. Электрическая схема лабораторной установки электромагнитного пускателя ПМЛ-1100

8. С помощью ЛАТРа довести напряжение до номинального (110 В) и по амперметру *PA*1 зафиксировать ток.

9. Далее, уменьшая напряжение до момента отпускания якоря (лампа HL1 погаснет), зафиксировать ток и напряжение по приборам *PA*1 и *PV*1 в момент отпускания.

Внимание. *При выполнении опытов осторожно, соблюдая технику безопасности, необходимо придерживать вручную кнопку якоря, чтобы обеспечить его притянутое положение в момент кратковременного обесточивания катушки магнитного пускателя (так как используемый на данном стенде ЛАТР регулирует напряжение ступенчато).*

10. Данные опытов свести в табл. 6.2.

11. Собрать на стенде НТЦ-09 схему согласно рис. 6.5.

12. ЛАТР выставить на диапазон 110…210 В (тумблер *SA*0), после этого верхний (красный цвет) переключатель ЛАТРа поставить в положение «110 В», а нижний – в положение «0».

13. Тумблеры измерительных приборов *PA*1, *PA*2, *PA*3, *PV*1и *PV*2 поставить в ***верхнее*** положение.

14. С разрешения преподавателя включить стенд (тумблер *SA*1).

15. Включить источник питания 24 В (тумблер *SA*4).

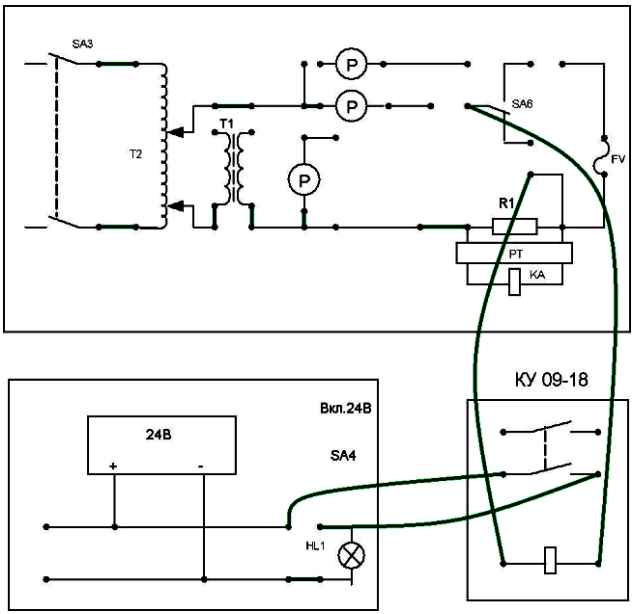


Рис. 6.5. Электрическая схема лабораторной установки контактора КУ 09-18

16. Тумблер *SA*3 перевести в верхнее положение.

17. Верхним переключателем ЛАТРа увеличивать напряжение и контролировать изменение показаний по приборам *PA*1 и *PV*1, зафиксировав их в момент, когда якорь магнитного пускателя втянется в катушку (загорится лампа *HL*1).

18. С помощью ЛАТРа довести напряжение до номинального (220 В) и по амперметру *PA*1 зафиксировать ток.

19. Далее, уменьшая напряжение до момента отпускания якоря (лампа *HL*1 погаснет), зафиксировать ток и напряжение по приборам *PA*1 и *PV*1 в момент отпускания.

Внимание. *При выполнении опытов осторожно, соблюдая технику безопасности, необходимо придерживать вручную кнопку якоря, чтобы обеспечить его притянутое положение в момент кратковременного обесточивания катушки магнитного пускателя (так как используемый на данном стенде ЛАТР регулирует напряжение ступенчато).*

20. Данные опытов свести в табл. 6.2.

Таблица 6.2. **Результаты опытов по испытанию электромагнитного пускателя ПМЛ 1100 и контактора КУ 09-18**

Показатель	Расчетная формула	Испытываемое устройство	
		ПМЛ-1100	КУ 09-18
Напряжение номинальное $U_н$, В			
Ток номинальный $I_н$, А			
Напряжение срабатывания $U_{ср}$, В			
Ток срабатывания $I_{ср}$, А			
Напряжение возврата $U_в$, В			
Ток возврата $I_в$, В			
Коэффициент возврата $k_в$	$k_в = U_в / U_{ср}$		
Кратность пускового тока k	$k = I_{ср} / I_н$		
Полная номинальная мощность $S_н$, В · А	$S_н = U_н I_н$		
Пусковая мощность $S_п$, В · А	$S_п = U_н I_{ср}$		

21. По опытным данным рассчитать для каждого из устройств коэффициент возврата $k_в$, кратность пускового тока k, полную номинальную мощность $S_н$ и пусковую мощность $S_п$. Рассчитанные показатели также свести в табл. 6.2.

22. Нарисовать схему управления пуском асинхронного двигателя с помощью магнитного пускателя (рис. 6.6).

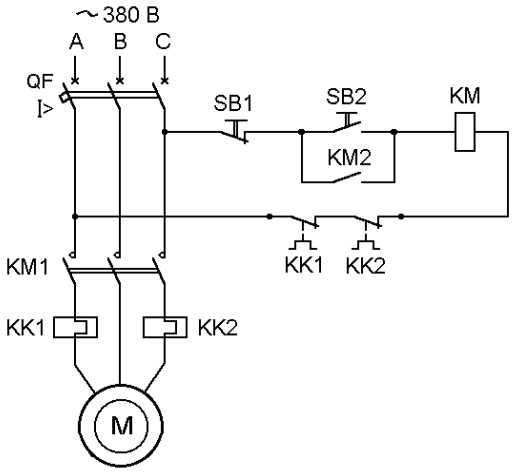


Рис. 6.6. Принципиальная электрическая схема управления пуском асинхронного двигателя с помощью магнитного пускателя

Контрольные вопросы

1. Каково назначение, устройство и принцип действия контакторов и магнитных пускателей?
2. На основе каких данных и как выполняется выбор электромагнитного пускателя?
3. Как выполняется расшифровка типов электромагнитного пускателя?
4. Перечислите и поясните способы блокировок, применяемых в реверсивных электромагнитных пускателях?
5. Поясните работу схем управления в заданной последовательности, одновременного включения и реверсивного управления короткозамкнутого асинхронного электродвигателя.

Лабораторная работа 7.
ИЗУЧЕНИЕ СХЕМЫ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Цель работы:

1. Изучить схему тепловой защиты трехфазного асинхронного двигателя.
2. Определить параметры защиты для установленного двигателя.
3. Произвести настройку электронной тепловой защиты.

Объект и средства исследования:

- универсальный стенд НТЦ-07.37.Б «Монтаж и наладка электроприводов», который комплектуется сменной панелью НТЦ-07.37.Б/01 «Схемы пуска АД»;
- электродвигатель: тип – АИР56А2У2; номинальное напряжение – 220/380 В; номинальная мощность – 180 Вт; номинальные обороты – 2730 об/мин; номинальное скольжение – 9 %; КПД – 65 %; cos φ – 0,78; $M_{max} / M_{ном} = 2,2$; $M_{п} / M_{ном} = 2,2$; $M_{min} / M_{ном} = 2,2$; $I_{п} / I_{ном} = 5,0$;
- пульт программирования реле токовой защиты и инструкция по настройке реле токовой защиты РТЗЭ, поставляемые в комплекте со стендом;
- цифровые измерительные приборы;
- комплект перемычек.

7.1. Основные теоретические сведения

Тепловые реле служат для защиты электродвигателей от небольших, но длительных перегрузок (примерно до 50 % номинальной величины). Тепловые перегрузки могут возникнуть из-за прохождения по обмоткам токоприемника повышенных токов, перегрузок рабочего механизма по технологическим причинам, из-за тяжелых условий пуска под нагрузкой, длительного понижения напряжения сети, обрыва одной из фаз сети, повреждения рабочего механизма. Они вызывают ускоренное старение и разрушение изоляции, что приводит к коротким замыканиям и выходу из строя электродвигателей.

Основное требование к тепловой защите заключается в следующем: она должна срабатывать при перегрузках электродвигателя свыше 20 % в течение не более 20 мин с момента достижения установившейся температуры в результате нагрева номинальным током, который принимается по защитной характеристике электротеплового реле. Хорошо отрегулированное реле защищает трехфазный электродвигатель также от работы на двух фазах.

Основным рабочим органом электротепловых реле является термобиметаллическая пластина, способная изгибаться при нагреве. Она состоит из двух прочно соединенных между собой разнородных металлов, обладающих различными коэффициентами температурного расширения. В качестве термоинертного металла используются сплавы инвар ЭН-36 или Н-42, в качестве термоактивного – сталь, латунь, константан.

По способу нагрева биметаллической пластины различают электротепловые реле с прямым, косвенным и комбинированным нагревом. В реле прямого действия нагрев биметаллической пластины происходит при прохождении по ней тока нагрузки (их называют также тепловыми расцепителями). В реле косвенного действия нагрев пластины происходит от расположенного в непосредственной близости нагревательного элемента, выполненного из нихрома или константана. Комбинированный нагрев сочетает оба вышеназванных способа.

Температурный компенсатор выполнен из биметалла с обратным прогибом по отношению к основному термоэлементу. Благодаря компенсатору работа реле почти не зависит от окружающей температуры.

Широкое распространение получили электротепловые реле серий ТРН, ТРП, РТТ и РТЛ.

Тепловые реле типа ТРН – двухполюсные с температурной компенсацией, ручным возвратом и сменными нагревателями (рис. 7.1).

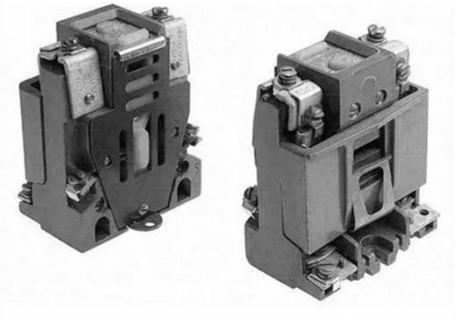


Рис. 7.1. Тепловое реле типа ТРН

Они выпускаются только в открытом исполнении. Нагрев биметаллической пластины в реле ТРН-10, ТРН-25, ТРН-40 – косвенный, в реле ТРН-10А – комбинированный. Сменные нагревательные элементы рассчитаны на следующие номинальные токи:

ТРН-8, ТРН-10А – 0,32; 0,40; 0,50; 0,63; 0,80; 1,25; 1,60; 2,60; 2,50; 3,20 А;

ТРН-10 – 0,50; 0,63; 0,80; 1,00; 1,25; 1,60; 2,00; 2,50; 3,20; 4,00; 5,00; 6,00; 8,00; 10,00 А;

ТРН-25 – 5,0; 6,3; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0; 20,0; 25,0 А;

ТРН-40 – 12,5; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0 А.

Срабатывание реле типа ТРН (рис. 7.2, *а*) происходит следующим образом. При значении тока выше допустимого биметаллическая пластина *2* нагревается от нагревательного элемента *1*, изгибается и воздействует через рычаг *3* на компенсатор *4*, который поворачивается и освобождает защелку *7*. Пружина возврата *10* перемещает кнопку возврата *6*. Контакты *8* и *9* при этом размыкаются и воздействуют через рычаг *3* на компенсатор *4*.

Возврат реле в исходное положение производится путем нажатия на кнопку возврата *6* после остывания биметаллической пластины *2*.

Ток уставки электротеплового реле регулируют путем поворота эксцентрика регулятора *5*, что приводит к изменению зазора между компенсатором *4* и защелкой *7*. Каждое деление регулятора тока уставки соответствует 5 % номинального тока нагревателя (при температуре окружающей среды 40 °С). При установке регулятора в положение «0» ток уставки равен номинальному току нагревателя. При установке регулятора в положение «–5» ток уставки уменьшается на 25 %, а в положение «+5» – увеличивается на 25 % по отношению к нормальному току нагревателя.

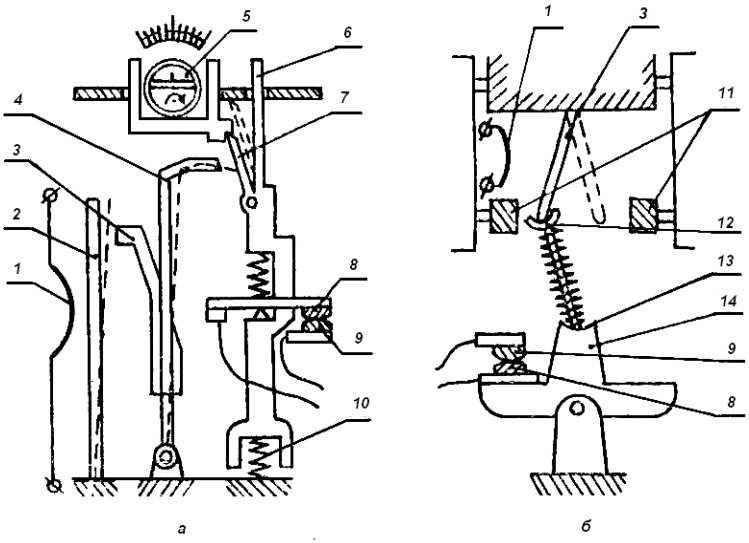


Рис. 7.2. Конструктивные схемы электротепловых реле:
а – типа ТРН; *б* – типа ТРП: *1* – нагревательный элемент;
2 – биметаллическая пластина; *3* – рычаг; *4* – компенсатор;
5 – эксцентрик регулятора; *6* – кнопка возврата; *7* – защелка;
8 – подвижный контакт; *9* – неподвижный контакт;
10 – пружина возврата; *11* – упоры; *12* – рычаг с пружиной;
13 – выступ; *14* – пластмассовая колодка

Тепловые реле ТРП – однополюсные, предназначены для защиты асинхронных электродвигателей от недопустимых перегрузок (рис. 7.3).



Рис. 7.3. Тепловые реле типа ТРП

Реле состоит из кинематически связанных между собой теплового элемента, контактной группы, эксцентрикового регулятора тока уставки и кнопки ручного возврата. В реле ТРП-25 использован косвенный нагрев сменным нагревательным элементом, реле ТРП-60 и ТРП-150 без температурной компенсации с самовозвратом имеют комбинированный нагрев биметаллической пластины и несменный нагреватель.

Сменные нагревательные элементы к электротепловым реле типа ТРП рассчитаны на следующие номинальные токи:

ТРП-60 – 25; 30; 40; 50; 60 А;

ТРП-150 – 50; 60; 80; 100; 120; 150 А.

При увеличении тока сверх допустимого значения нагревательный элемент *1* (см. рис. 7.2) сообщает биметаллической пластине *2* такое количество тепла, при котором она изгибается и занимает крайнее правое положение. Вместе с ней в правое положение переходит и верхний конец рычага *3* с пружиной *12*, которая нажимает на выступ *13* пластмассовой колодки *14*, поворачивая ее против часовой стрелки. Контакты *8* и *9* размыкаются, упоры *11* ограничивают движение пластины *2* и рычага *3* с пружиной *12*. Возврат реле в исходное положение происходит самопроизвольно при остывании биметаллической пластины *2* либо принудительно кнопкой ручного возврата *6*.

Регулятор тока уставки имеет шкалу, на которой нанесены по пять делений по обе стороны относительно положения «0» с ценой деления 5 % от номинального тока нагревателя. Это дает возможность регулировать ток уставки в пределах ±25 % относительного номинального значения.

Основным недостатком электротепловых реле ТРН и ТРП является нестабильность их защитных характеристик, большая тепловая инерция, что вызывает неудовлетворительную работу при переменной нагрузке и потере фазы. Появление новых серий электродвигателей с большой нагрузкой активных материалов, возрастание скорости нагрева этих электродвигателей в аварийных режимах, применение высококачественных изоляционных материалов с большой теплостойкостью повышают требования к защите. Поэтому совершенствование защиты электродвигателей от перегрузок осуществляется в настоящее время по двум направлениям:

- замена двухполюсных реле ТРН и однополюсных ТРП на трехполюсные реле серий РТТ и РТЛ (в комплекте с пускателями серий ПМА и ПМЛ соответственно);

- установка автоматической позисторной защиты или встроенной температурной защиты.

Трехполюсные реле серий РТТ и РТЛ (табл. 7.1, 7.2) обеспечивают ускоренное срабатывание при потере фазы и улучшенную защитную характеристику. Они имеют три термоэлемента (по одному на каждую фазу), температурную компенсацию, механизм для ускоренного срабатывания при обрыве одной фазы. Пределы регулирования тока уставки равны 0,75…1,25 от номинального.

Таблица 7.1. **Основные технические данные электротепловых реле РТТ**

Тип реле	Номинальный ток, А	
	реле	теплового элемента
РТТ-01 (02)	10	0,20; 0,25; 0,32; 0,40; 0,50; 0,63; 0,80; 1,00; 1,25; 1,60; 2,00; 2,50; 3,20; 4,00; 5,00; 6,30; 8,00; 10,00
РТТ-14	25	0,20; 0,25; 0,32; 0,40; 0,50; 0,63; 0,80; 1,00; 1,25; 1,60; 2,00; 2,50; 3,20; 4,00; 5,00; 6,30; 8,00; 10,00; 12,50; 16,00; 20,00; 25,00
РТТ-21	63	10,0; 12,5; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0
РТТ-31 (32)	160	63; 80; 100; 125; 160
РТТ-41	630	125; 160; 200; 250; 320; 400; 500; 630

Таблица 7.2. **Основные технические данные электротепловых реле серии РТЛ**

Тип реле	Пределы регулирования номинального тока несрабатывания, А	Мощность управляемого электродвигателя, кВт (при напряжении 380 В)
РТЛ-1001	0,10…0,17	–
РТЛ-1002	0,16…0,26	–
РТЛ-1003	0,24…0,40	–
РТЛ-1004	0,38…0,65	–
РТЛ-1005	0,61…1,00	–
РТЛ-1006	0,95…1,60	0,37
РТЛ-1007	1,5…2,6	0,75
РТЛ-1008	2,4…4,0	1,5
РТЛ-1010	3,8…6,0	2,2
РТЛ-1012	5,5…8,0	3,0
РТЛ-1014	7,0…10,0	4,0
РТЛ-1016	9,5…14,0	5,5
РТЛ-1021	13…19	7,5
РТЛ-1022	18…25	11
РТЛ-2053	23…32	15
РТЛ-2055	30…41	18,5
РТЛ-2057	38…52	22
РТЛ-2059	47…64	25
РТЛ-2061	54…74	30
РТЛ-2063	63…86	37
РТЛ-3105	75…105	55
РТЛ-3125	95…125	63
РТЛ-3160	115…160	80
РТЛ-3200	145…200	100

Тепловые реле серии РТТ (рис. 7.4) выпускаются в пяти исполнениях по номинальному току: 0 – на 10 А; 1 – на 25 А; 2 – на 63 А; 3 – на 160 А и 4 – на 630 А.

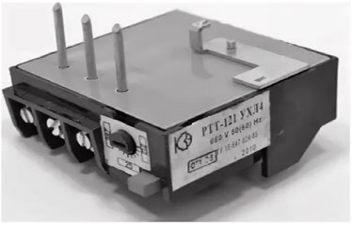


Рис. 7.4. Тепловые реле серии РТТ

Условное обозначение реле (на примере РТТ-14БУ4) расшифровывается следующим образом: РТТ – реле токовое тепловое; первая цифра – исполнение по номинальному току (25 А); вторая цифра – исполнение по способу установки и присоединения (1 – нормальное; 2 – для установки на контакторах с крепежными скобами; 4 – для втычного монтажа с контакторами серии ПМА); Б – отсутствие ускоренного срабатывания при обрыве фазы; У4 – климатическое исполнение и категория размещения.

Тепловые реле серии РТЛ (рис. 7.5) встраиваются в электромагнитные пускатели типа ПМЛ соответствующих габаритов. Они бывают трех исполнений по номинальному току: РТЛ-1000 – до 25 А, РТЛ-2000 – до 80 А и РТЛ-3000 – до 200 А. Время ручного возврата составляет не менее 90 с.



Рис. 7.5. Тепловые реле серии РТЛ

При выборе тока уставки для реле типа ТРН необходимо иметь в виду, что пределы регулирования ±25 % относятся к нагревателям с непредельным номинальным током (предельный ток нагревателя – соответствующий номинальному току реле. Например, для реле ТРН-10 предельный ток нагревателя равен 10 А). Для предельных нагревателей пределы регулирования будут равны –25…+5 % от номинального тока.

При выборе электротеплового реле сначала определяют его габариты по величине электромагнитного пускателя. Для определения уставки тока несрабатывания реле в делениях шкалы реле поступают следующим образом. Определяют номинальный ток защищаемого электродвигателя $I_{н.\,дв}$. С учетом пределов регулирования тока несрабатывания выбирают нагревательный элемент с маркировкой $I_{н.\,э}$, соответствующий номинальному току электродвигателя. При этом ток нагревателя должен быть больше тока защищаемого двигателя: $I_{н.\,э} \geq I_{н.\,дв}$ – и не должен превышать номинальный ток двигателя более чем на 25 %. Номинальный ток нагревательного элемента относится к нулевой уставке реле. Далее определяется положение рычага регулятора корректировкой на несоответствие тока электродвигателя току нагревательного элемента с учетом цены деления шкалы установок $C = 0{,}05I_{н.\,э}$ и поправкой на разность температур окружающей среды двигателя и пускателя.

Количество делений шкалы для корректировки несоответствия тока определяется по формуле

$$N_1 = \frac{I_{н.\,дв} - I_{н.\,э}}{0{,}05I_{н.\,э}}.$$

Количество делений шкалы для корректировки по температуре выполняется только для окружающей температуры Θ ниже расчетной (30 °С), одно деление шкалы при этом соответствует изменению температуры на 10 °С:

$$-N_2 = (\Theta_{окр} - 30) / 10.$$

Результирующее значение N определяется алгебраической суммой:

$$N = \pm N_1 - N_2.$$

Если значение N окажется дробным, то его округляют до целого.

При расчете числа делений установки электротеплового реле следует иметь в виду, что номинальный ток нагревательного элемента

изменяется в зависимости от места установки реле. Приведенный выше расчет соответствует открытому исполнению, для защищенного исполнения цена деления шкалы установок изменяется до величины $C = 0{,}055I_{н.э}$.

Недостатком тепловых реле является то, что трудно подобрать реле из имеющихся в наличии так, чтобы ток теплового элемента соответствовал току электродвигателя. Кроме того, сами реле требуют защиты от короткого замыкания, поэтому в схемах должны быть предусмотрены предохранители или автоматы. Тепловые реле не способны защитить двигатель от перегрева в режиме холостого хода или недогруза.

Поскольку тепловые процессы, происходящие в биметалле, носят достаточно инерционный характер, реле плохо защищает от перегруза, связанного с быстропеременной нагрузкой на валу электродвигателя. Если нагрев обмоток обусловлен неисправностью вентилятора (погнуты лопасти или проскальзывание на валу), загрязнением оребренной поверхности двигателя, тепловое реле тоже окажется бессильным, так как потребляемый ток не возрастает или возрастает незначительно.

В таких случаях только встроенная тепловая защита способна обнаружить опасное повышение температуры и вовремя отключить двигатель.

Рассмотрим нереверсивную схему подключения двигателя через магнитный пускатель с катушкой 380 В (рис. 7.6): схема состоит из автоматического выключателя *QF*; магнитного пускателя *KM*; теплового реле *KK*; асинхронного двигателя *M*; кнопок управления *SB*1 – «Стоп» и *SB*2 – «Пуск».

Рассмотрим работу схемы в динамике. Включаем питание автоматическим выключателем *QF*, нажимаем кнопку *SB*2 – «Пуск», которая своим нормально разомкнутым контактом подает напряжение на катушку магнитного пускателя *KM*. Магнитный пускатель *KM* срабатывает и своими нормально разомкнутыми силовыми контактами подает напряжение на двигатель. Для того чтобы не удерживать кнопку *SB*2 – «Пуск», чтобы двигатель работал, нужно ее зашунтировать нормально разомкнутым блок-контактом магнитного пускателя *KM*. При срабатывании пускателя блок-контакт замыкается, и можно отпустить кнопку *SB*2 – «Пуск», ток побежит через блок-контакт на катушку магнитного пускателя *KM*. Отключаем двигатель, нажимаем кнопу *SB*1 – «Стоп», нормально замкнутый контакт размыкается, и прекращается подача напряжения к катушке магнитного пускателя *KM*, сердечник пускателя под действием пружин возвращается в исходное положение, соответственно, контакты возвращаются в нормальное состояние, от-

ключая двигатель. При срабатывании теплового реле *KK* размыкаются нормально замкнутые контакты *KK*1 и *KK*2, отключение происходит аналогично.

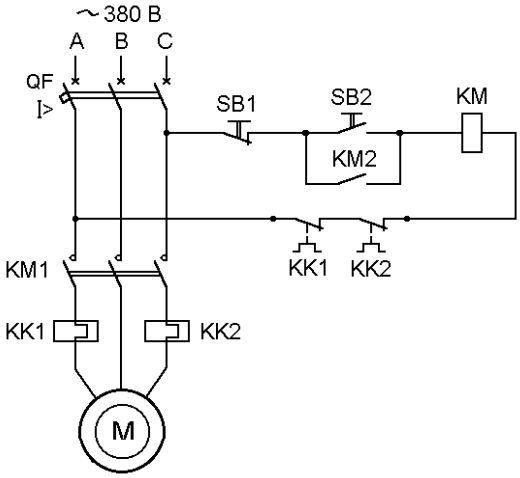


Рис. 7.6. Принципиальная электрическая схема прямого пуска электродвигателя с наличием тепловой защиты

Для более надежной защиты асинхронных электродвигателей используются современные электронные микропроцессорные системы защиты. Например, такие как реле токовой защиты электродвигателей серии РТЗЭ (рис. 7.7).

Реле серии РТЗЭ предназначено для установки в цепях питания трехфазных электродвигателей переменного тока промышленной частоты 50 Гц напряжением 220/380 В с целью повышения их надежности и увеличения срока службы. При косвенном подключении через трансформаторы тока реле РТЗЭ-2,5 могут использоваться в линиях на любое напряжение. Реле осуществляет контроль токов в трех фазах электродвигателя и при выявлении недопустимых режимов отключает его.

Отключение происходит в следующих аварийных ситуациях:

- при перегрузке по току;
- недогрузке по току;
- неполнофазном режиме работы (обрыве фазы);
- недопустимом перекосе фаз по току.



Рис. 7.7. Реле токовой защиты электродвигателей серии РТЭЭ

Защитное отключение осуществляется путем размыкания цепи управления электромагнитного пускателя (контактора).

Реле серии РТЭЭ обеспечивает:

- регулирование уставок максимального тока I_{max}, минимального тока I_{min} и дисбаланса токов D_{max} электродвигателя;

- регулирование уставок задержки срабатывания защитного отключения T_{max}, блокировки срабатывания защит при пуске $T_{п}$, задержки на включение при перерывах электроснабжения $T_{сз}$, задержки на автоматический повторный пуск $T_{пв}$ с программируемым числом попыток повторного пуска $N_{пв}$;

- индикацию причины аварийного отключения;

- регистрацию пускового тока $I_{п}$ и времени выхода на режим $T_{в}$ контролируемого электродвигателя;

- сохранение в памяти информации о количестве нормальных и аварийных отключений электродвигателя, а также контролируемых токов и причинах аварии на момент аварийного отключения (восемь последних по времени аварийных отключений).

В данной работе применяется реле токовой защиты РТЭЭ-2,5 (рис. 7.8, *а*) у которого:

- пределы контролируемых токов – ***0…12,5 А***;

- пределы регулирования режимных уставок по току предупредительной сигнализации $I_{пс}$, току перегрузки I_{max}, току недогрузки I_{min} и дисбалансу токов D_{max} – ***0,2…2,5 А, шаг – 0,01 А***;

- время задержки срабатывания защитного отключения T_{max} по току перегрузки I_{max}, недогрузки I_{min} и дисбалансу токов D_{max} – регулируемое в пределах от ***1 до 250 с***;

- время задержки срабатывания защитного отключения при пуске электродвигателя $T_п$ – регулируемое в пределах ***от 1 до 250 с***;

- время задержки срабатывания защитного отключения при обрыве фазы соответствует значению T_{max}, но ***не более 3 с***;

- время задержки включения при перерыве электроснабжения электродвигателя $T_{сз}$ – регулируемое в пределах ***от 1 до 250 с***;

- время задержки на автоматический повторный пуск $T_{пв}$ – регулируемое в пределах ***от 1 до 250 с***;

- число попыток автоматического повторного пуска $N_{пв}$ – регулируемое в пределах ***от 1 до 250***;

- управляющий контакт реле коммутирует электрическую цепь переменного тока ***от 0,03 до 2 А*** при напряжении ***до 420 В***. Контакт работает на размыкание цепи при аварийном отключении;

- питание реле осуществляется от сети переменного тока напряжением в пределах ***от 180 до 420 В*** частотой ***(50 ± 2) Гц***;

- мощность, потребляемая реле от сети, – ***не более 2 Вт.***

Реле токовой защиты РТЗЭ-2,5 укомплектовано пультом управления ПУ-04С (рис. 7.8, *б*).

Пульт управления ПУ-04С с автономным питанием обеспечивает дистанционное считывание информации с реле и ее отображение на экране цифрового дисплея, а также обеспечивает программирование уставок реле.

Реле и пульт обмениваются информацией по каналу связи, который соединяется шлейфом с бесконтактным зондом, обеспечивающим электробезопасность при работе.

Реле РТЗЭ-2,5 является электронным изделием, производящим контроль токов, протекающих в каждой из трех фаз контролируемого электродвигателя.

Индикация нормального режима по току осуществляется индикатором **«РАБОТА»**.

Если двигатель отключен, индикатор **«РАБОТА»** светится непрерывно.

Если двигатель включен, индикатор **«РАБОТА»** работает в прерывистом режиме (мигает).

При выходе режима по току за пределы уставок реле переходит в режим **«АВАРИЯ»**, индикатор **«РАБОТА»** гаснет и включается один из индикаторов (***I* > *I*max [*A*], *I* < *I*min [*B*], *D* > *D*max [*C*]**) с одновременным размыканием цепи выводов управляющего ключа реле.



а *б*

Рис. 7.8. Реле токовой защиты электродвигателей РТЭЭ-2,5 (*а*) с пультом управления ПУ-04С (*б*)

В реле РТЭЭ-2,5 предусмотрены следующие режимные уставки:

- I_{max} – порог срабатывания защиты по току перегрузки. При превышении тока одной из фаз значения I_{max} происходит аварийное отключение через интервал времени, определяемый уставкой T_{max}. *Если установлено значение* $I_{max} = 0$ *– защита не действует (отключена)*;

- I_{min} – порог срабатывания защиты по току недогрузки. При уменьшении тока всех трех фаз ниже значения I_{min} происходит аварийное отключение через интервал времени, определяемый уставкой T_{max}. *Если установлено значение* $I_{min} = 0$ *– защита не действует (отключена)*;

- D_{max} – порог срабатывания защиты по дисбалансу токов. При превышении значения дисбаланса D_{max} происходит аварийное отключение через интервал времени, определяемый уставкой T_{max}. *Если установлено значение* $D_{max} = 0$ *– защита не действует (отключена)*;

- T_{max} – время задержки срабатывания защиты в секундах. *Не может быть установлено менее 1 с*;

- $T_{п}$ – время задержки срабатывания защитного отключения при пуске в секундах. Блокирует срабатывание защиты по току перегрузки I_{max} и дисбалансу D_{max} на время, определяемое значением уставки $T_{п}$. *Не действует на другие защиты*;

- $T_{сз}$ – время задержки самозапуска в секундах. При включении питания управляющий ключ реле остается разомкнутым в течение интервала времени $T_{сз}$;

- $T_{пв}$ – время в секундах до автоматического сброса защиты;

- $N_{пв}$ – число программируемых циклов автоматического сброса защиты. *Если установлено значение* $N_{пв}$ = 0*, то эта функция не действует, сброс защиты может осуществляться только снятием с реле напряжения сетевого питания или по команде с пульта*. Может принимать символическое значение «>>>», соответствующее бесконечному значению;

- $I_{пс}$ – уставка тока предупредительной сигнализации. При превышении тока любой фазы значения $I_{пс}$ реле выдает сигнал на внешнее устройство сигнализации.

Порядок работы реле:

- при включении напряжения сетевого питания реле готово к работе;

- при нормальной работе электроустановки светится желтый индикатор «РАБОТА» реле;

- в случае выхода режима за пределы уставок реле производит защитное отключение, индикатор «РАБОТА» гаснет, включается один из индикаторов:

Обр. фазы – отключение по обрыву фазы;

$\boldsymbol{I > I_{max}\,[A]}$ – отключение по перегрузке;

$\boldsymbol{I < I_{min}\,[B]}$ – отключение по недогрузке;

$\boldsymbol{D > D_{max}\,[C]}$ – отключение по превышению дисбаланса.

- если произошло отключение по обрыву фазы, то мигающие индикаторы $\boldsymbol{I > I_{max}\,[A]}$, $\boldsymbol{I < I_{min}\,[B]}$, $\boldsymbol{D > D_{max}\,[C]}$ указывают на отсутствующую фазу;

- для сброса защиты требуется отключить питание реле выключателем *S* на 2–3 с, после чего возможно повторное включение электродвигателя кнопкой «ПУСК»;

- чтобы проконтролировать текущий режим электроустановки, выяснить причину аварийного отключения или изменить режимные уставки, нужно воспользоваться пультом управления ПУ-04С (см. рис. 7.8, *б*).

Порядок работы с пультом управления ПУ-40С:

1. Проверить состояние элементов питания пульта, для чего нужно нажать и отпустить кнопку «ПИТАНИЕ» на ПУ (см. рис. 7.8, *б*). На экране дисплея должно появиться сообщение: **«Пульт 04-Сервис»**.

Если изображение не появляется или недостаточно контрастно, то это свидетельствует о чрезмерном разряде элемента питания пульта и необходимости его замены.

2. Соединить пульт с реле с помощью шлейфа, подключив приемный зонд к гнезду «*X*1» реле (см. рис. 7.8, *а*), нажать и отпустить кнопку «ПИТАНИЕ» на ПУ (см. рис. 7.8, *б*). Для включения подсветки дисплея пульта нажать и удерживать кнопку «ПИТАНИЕ» в течение ≈1 с, после включения подсветки отпустить кнопку.

Знак «*» в правом верхнем углу индикатора свидетельствует о наличии связи между реле и пультом.

3. Отображаемая информация размещается на страницах дисплея, последовательное переключение которых осуществляется с помощью кнопок «ВЫБОР СТРАНИЦЫ» на ПУ в прямом или обратном порядке.

4. На странице 1 дисплея отображаются тип реле и текущее состояние электродвигателя: **«СТОП»** (отключен), **«РАБОТА»** (режим в норме) или **«АВАРИЯ»** (произошло аварийное отключение), текущие значения фазных токов I_a, I_b, I_c и дисбаланса D_i электродвигателя в амперах.

В режиме **«РАБОТА»** или **«АВАРИЯ»** также отображаются значения пускового тока $I_п$ и времени выхода электродвигателя на режим $T_в$.

5. На странице 2 отображаются значения счетчиков нормальных и аварийных отключений.

6. На странице 3 отображаются значения уставок защиты по току перегрузки $\boldsymbol{I_{max}}$, недогрузки $\boldsymbol{I_{min}}$ и дисбалансу токов $\boldsymbol{D_{max}}$, уставки задержки срабатывания защит $\boldsymbol{T_{max}}$ и уставки тока предупредительной сигнализации $\boldsymbol{I_{пс}}$.

7. На странице 4 отображаются значения уставок $\boldsymbol{T_п}$, $\boldsymbol{T_{сз}}$, $\boldsymbol{T_{пв}}$ и $\boldsymbol{N_{пв}}$.

8. На страницах 5…12 дисплея отображаются параметры восьми последних по времени аварийных отключений: значения фазных токов на момент отключения и причина аварии. Если соответствующего отключения не было, то отображается сообщение **«НЕТ ДАННЫХ»**.

9. Программирование реле:

9.1. Произвести считывание информации с реле в соответствии с пп. 1…8.

9.2. Для перехода в режим программирования нужно нажать **однократно** кнопку «ВЫБОР ПАРАМЕТРА» на пульте – на экране дисплея отобразится меню подпрограмм:

ЗАЩИТА – корректировка уставок защиты $\boldsymbol{I_{max}}$, $\boldsymbol{T_{max}}$, $\boldsymbol{I_{min}}$, $\boldsymbol{D_{max}}$;

ПУСК – корректировка уставок $\boldsymbol{T_п}$, $\boldsymbol{T_{сз}}$,$\boldsymbol{T_{пв}}$, $\boldsymbol{N_{пв}}$;

ОЧСТАТ – очистка памяти аварийных отключений, деблокировка защиты;

Т. ТОКА – установка коэффициента трансформации;

УСТ. $I_{пс}$ – корректировка уставки тока предупредительной сигнализации $\boldsymbol{I_{пс}}$.

9.3. Нажатием кнопок «ВЫБОР СТРАНИЦЫ» установить маркер «>>» на выбранный раздел меню (например, «ЗАЩИТА»).

9.4. Нажать повторно кнопку «ВЫБОР ПАРАМЕТРА» – на экране дисплея отобразится обозначение и текущее значение выбранного параметра, например:

$\boldsymbol{I_{max}, A}$
5 ***5***

где 5 – текущее значение уставки $\boldsymbol{I_{max}}$.

9.5. Нажатием кнопок «ВЫБОР СТРАНИЦЫ» установить новое значение параметра (***отображается справа***).

Для ускоренного изменения параметра *удерживать кнопку* «ВЫБОР СТРАНИЦЫ» *в нажатом состоянии*. ***Запись будет закончена, когда значение параметра, отображаемое слева, совпадет с установленным справа.***

9.6. Повторным нажатием кнопки «ВЫБОР ПАРАМЕТРА» выбрать следующий параметр, повторить пп. 9.1…9.5 для установки других параметров.

9.7. Для выхода из режима программирования нажать и отпустить кнопку «ПИТАНИЕ».

7.2. Порядок выполнения работы

Внимание! *Перед включением стенда требуется убедиться, что все переключатели находятся в начальном положении (выключены).*

Далее необходимо:

- установить сменную панель НТЦ-07.37.Б/01 «Схемы пуска АД» на лицевой панели стенда НТЦ-07.37.Б «Монтаж и наладка электроприводов» (рис. 7.9);

- установить перемычку на сменной панели НТЦ-07.37.Б/01 «Схемы пуска АД» (рис. 7.10).

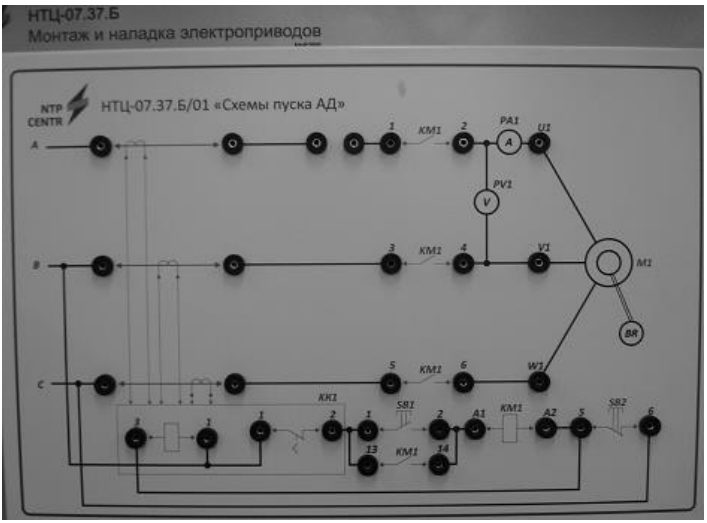


Рис. 7.9. Сменная панель НТЦ-07.37.Б/01 «Схемы пуска АД»

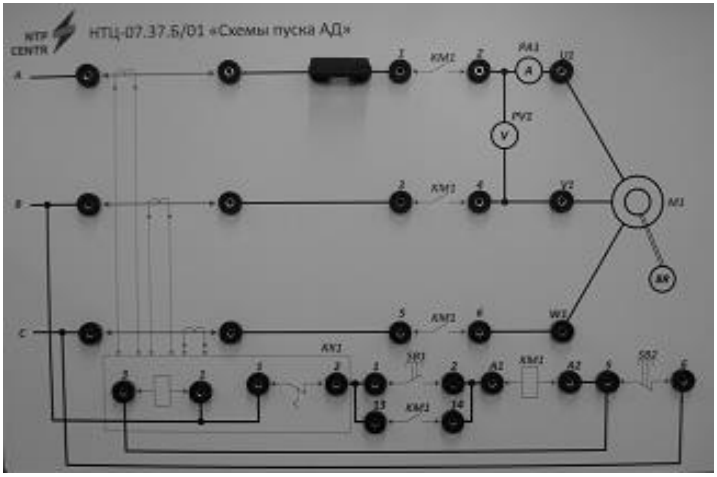


Рис. 7.10. Место установки перемычки на сменной панели НТЦ-07.37.Б/01

1. Собрать схему, представленную на рис. 7.11, для определения характеристик теплового расцепителя.

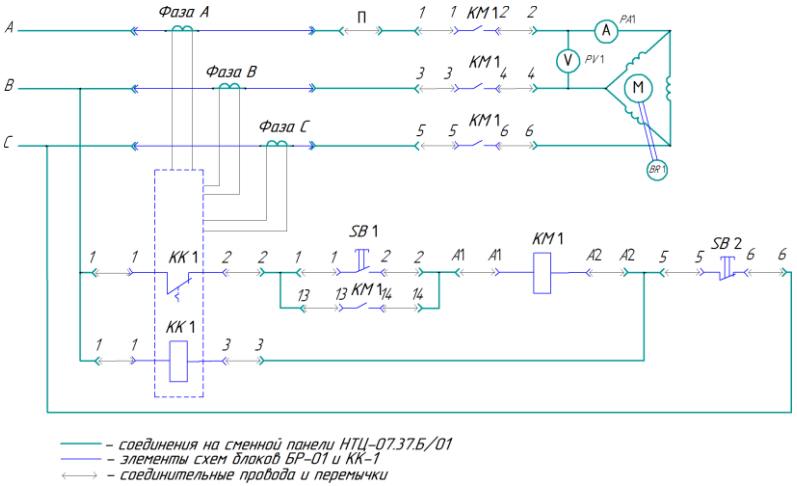


Рис. 7.11. Схема электрическая принципиальная

2. Включить стенд автоматическим выключателем *QF*1 вверх в блоке **БВ-02** (рис. 7.12) и нажатием кнопки *S*1. Убедиться, что кнопка *S*2 отжата.

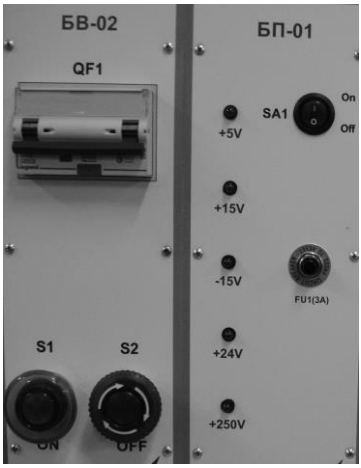


Рис. 7.12. Блоки БВ-02 и БП-01
на стенде НТЦ-07.37.Б

3. Включить питание низковольтных цепей схемы тумблером *SA*1 вверх в блоке **БП-01** (рис. 7.12).

4. Подать питание двигателя тумблером *SA*1 вверх в блоке **БП-04** (рис. 7.13).

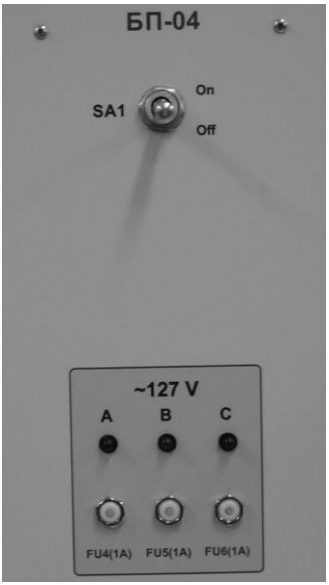


Рис. 7.13. Блок БП-04 на стенде НТЦ-07.37.Б

5. С помощью пульта программирования ПУ-04С (см. рис. 7.8, *б*) установить все защиты реле токовой защиты РТЗЭ в ***выключенное состояние*** (**I_{max} = 0, I_{min} = 0, D_{max} = 0, $T_{max} \geq 1$ с**) (см. **«Программирование реле»** – пп. 9.1…9.5).

6. Включить привод кнопкой *SB*1 в блоке **БР-01** (рис. 7.14). Записать показания измерительных приборов в блоке **БИ-02** (*PA*1, *PV*1, *PW*1, *P*ω) (рис. 7.15).

7. Выключить привод кнопкой *SB*2 в блоке **БР-01** (рис. 7.14).

8. Убрать из схемы трансформатор тока с фазы *C* блока *KK*1 (см. рис. 7.11) для создания обрыва фазы *C*.

9. Запустить привод на время ***не более 30 с*** с помощью кнопки *SB*1 в блоке **БР-01** (рис. 7.14). Записать показания приборов в блоке **БИ-02** (*PA*1, *PV*1, *PW*1, *P*ω) (рис. 7.15).

10. Выключить привод кнопкой *SB*2 в блоке **БР-01** (рис. 7.14).

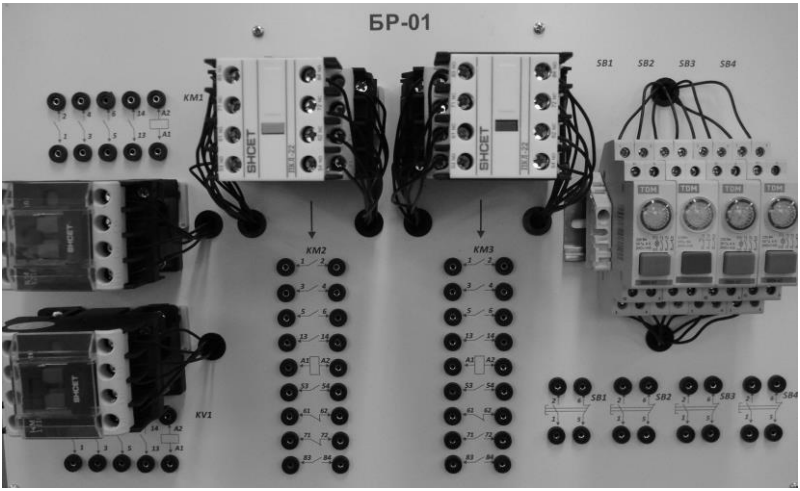


Рис. 7.14. Блок БР-01 на стенде НТЦ-07.37.Б

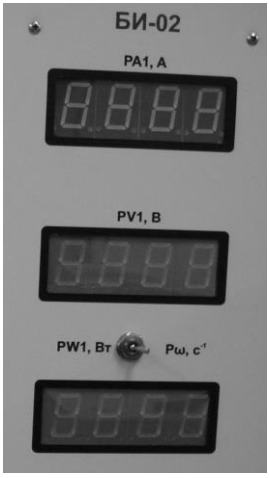


Рис. 7.15. Блок БИ-02 на стенде НТЦ-07.37.Б

11. Экспериментальные данные п. 6 и п. 9 занести в табл. 7.3.

Таблица 7.3. **Экспериментальные данные режимов работы электродвигателя**

Режим работы	Параметры			
	*PA*1, А	*PV*1, В	*PW*1, Вт	*P*ω, рад/с
Номинальный				
Обрыв фазы *C* (30 с)				

12. Произвести расчеты для тепловой защиты по экспериментальным данным.

13. Установить с помощью пульта программирования ПУ-04С (см. рис. 7.8, *б*) параметры уставки максимальной защиты и времени срабатывания тепловой защиты двигателя (см. **«Программирование реле»** – пп. 9.1…9.5).

14. Восстановить схему, подключив трансформатор тока № 3 *KK*1 (по рис. 7.11).

15. Включить привод кнопкой *SB*1 в блоке **БР-01** (см. рис. 7.14). Убедиться, что схема в ***номинальном режиме работает и внештатных отключений не было***.

16. Выключить привод кнопкой *SB*2 в блоке **БР-01** (см. рис. 7.14).

17. Удалить перемычку, указанную на рис. 7.10, для эмуляции режима обрыва фазы *A*.

18. Включить привод кнопкой *SB*1 в блоке **БР-01** (см. рис. 7.14). Убедиться, что схема в режиме перегрузки отключается через заданное время.

19. Выключить стенд в следующем порядке:

- отключить питание двигателя тумблером *SA*1 вниз в блоке **БП-04** (см. рис. 7.13);
- выключить питание низковольтных цепей схемы тумблером *SA*1 вниз в блоке **БП-01** (см. рис. 7.12);
- выключить стенд кнопкой *S*2 и автоматическим выключателем *QF*1 вниз в блоке **БВ-02** (см. рис. 7.12);
- убрать все перемычки на стенде;
- убрать сменную панель.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение, устройство и принцип действия электротеплового реле?

2. На основе каких данных и как выполняется выбор электротеплового реле?

3. Как выполняется расшифровка типов электротеплового реле?

4. Достаточно ли для защиты двигателя от перегрузок двух уставок?

5. В чем состоит основное отличие традиционного теплового реле от микропроцессорного реле токовой защиты?

6. Как определяют параметры тепловой защиты двигателя в производстве?

7. Определяет ли тепловое реле перегрев двигателя при неисправности охлаждающего вентилятора?

Лабораторная работа 8.
ИЗУЧЕНИЕ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы:

1. Получить навыки чтения и вычерчивания принципиальных электрических схем управления электроприводом.

2. Изучить простейшие схемы управления работой короткозамкнутого асинхронного электродвигателя переменного тока при различных командах (от кнопочного поста, промежуточного реле, конечного выключателя).

3. Включить электродвигатель в работу согласно простейшим схемам управления с использованием электромагнитного пускателя.

Объект и средства исследования. На рабочем месте расположена лабораторная установка, в которой ***объектом исследования*** является агрегат, состоящий из асинхронного короткозамкнутого электродвигателя переменного тока, электромагнитного пускателя, двух кнопочных станций управления, реле управления, промежуточного реле, двух кнопочных контактных выключателей, установочного выключателя, электротеплового реле.

Основные технические данные электродвигателя серии АИР: тип – АИР80А643; номинальная мощность $P_н$ = 0,75 кВт; соединение фаз – треугольник/звезда; номинальное напряжение – 220/380 В; номинальный ток – 3,9/2,3 А; коэффициент полезного действия $\eta_н$ = 70 %; коэффициент мощности $\cos \varphi_н$ = 0,72; частота вращения $n_н$ = 920 об/мин; режим работы – *S*1, класс изоляции – *B*.

Основные данные аппаратов управления: электромагнитный пускатель *КМ* типа ПМЛ-2100, имеющий напряжение втягивающей катуш-

ки 380 В; кнопочная станция (кнопки управления *SB*1…*SB*4) типа ПКЕ122-42, рассчитанная на коммутацию цепей напряжением 500 В и током 6 А; реле управления *KH*1 и промежуточное реле *KH*2 типа РПУ-0 на напряжение 380 В и ток контактов управления 2,5 А; конечные контактные выключатели *SQ*1 и *SQ*2 типа ВП15-21, имеющие напряжение 500 В и ток 6 А; установочные выключатели *SA*1, *SA*2 напряжением 500 В и током 6 А; электротепловое реле *KK* типа РТЛ-1022 с током уставки 18 А.

8.1. Основные теоретические сведения

Рассмотрим работу некоторых простейших схем управления асинхронных трехфазных электродвигателей переменного тока с использованием нереверсивного электромагнитного пускателя, кнопочной станции, реле управления, промежуточного реле, конечного контактного выключателя, установочного выключателя. Если к зажимам 1…3 подключить элементы аппаратуры управления в различной последовательности (рис. 8.1), то получатся различные схемы нереверсивного управления электродвигателем при помощи электромагнитного пускателя и других аппаратов управления. Если нужно включить двигатель кратковременно (толчком) для опробования, небольшого перемещения движущейся части установки, наладки рабочей машины или необходимо обеспечить работу привода только под наблюдением человека, то можно воспользоваться вариантами *а*, *б*, *в* или *г*. Питание катушки пускателя *KM* в варианте *а* обеспечивается через замыкающую кнопку *SB*2 «Пуск». В этом случае не нужны кнопка *SB*1 «Остановка» и блок-контакты электромагнитного пускателя *KM*.

Иногда возникает необходимость управления приводом в кратковременном и длительном режимах (варианты *б*, *в*, *г*). В схеме (вариант *б*) при кратковременном нажатии кнопки *SB*2 обеспечивается длительная работа привода. В случае нажатия кнопки *SB*3 «Установка» ее замыкающий контакт включает катушку *KM*, а размыкающий разрывает цепь блок-контакта *KM*.

В схеме (вариант *в*) при подключенном выключателе *SA* с фиксированным положением возможна длительная работа привода при нажатии кнопки *SB*2, а при отключенном выключателе *SA* и нажатии кнопки *SB*2 – толчковая работа.

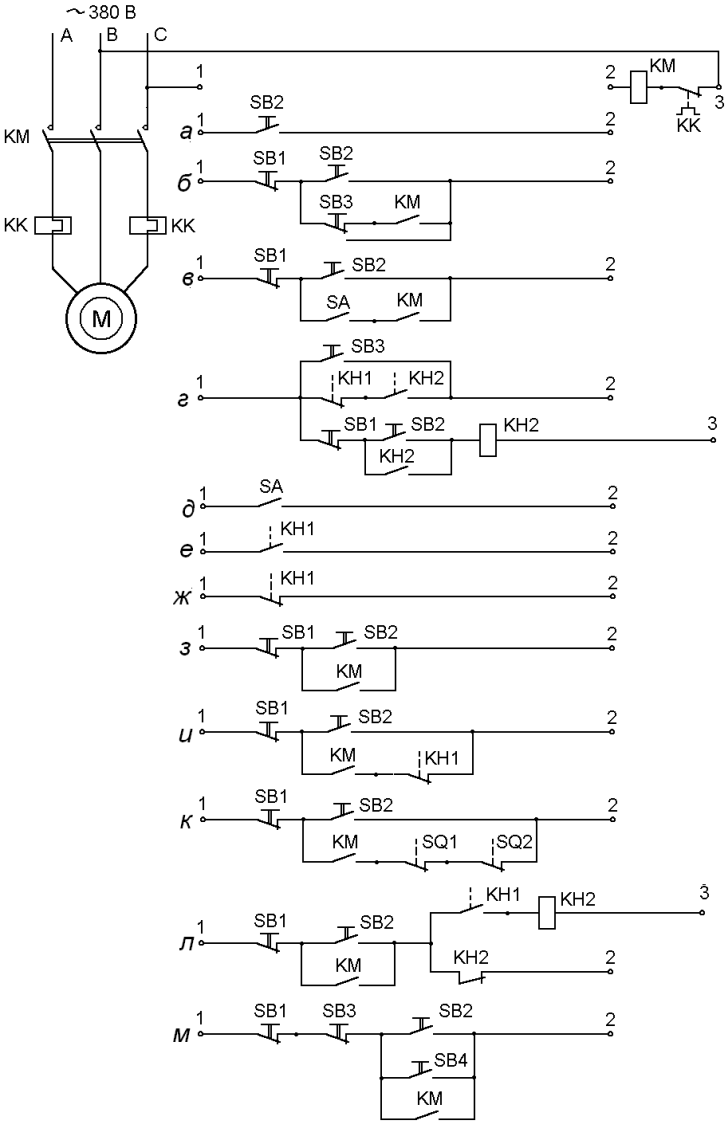


Рис. 8.1. Электрические схемы для управления асинхронным короткозамкнутым электродвигателем

Действие схемы (вариант *г*) одинаково при любом режиме работы. Для длительной работы электродвигателя нужно кратковременно нажать кнопку *SB*2, что вызывает включение промежуточного реле *K*2. Один замыкающий контакт реле *KH*2 шунтирует кнопку *SB*2 и дает возможность прекратить ее нажатие, не вызывая отключения реле *KH*2, другой включает катушку *KM* электромагнитного пускателя. Для осуществления толчковой работы необходимо нажать кнопку *SB*3. Кроме этого схема в работе обеспечивает включение и отключение катушки *KM* электромагнитного пускателя замыканием и размыканием контакта реле управления *KH*1. Реле управления *KH*1 может быть конечным выключателем, регулирующим на ограничение пути, уровня, давления, температуры и др.

Если к зажимам 1, 2 подключить выключатель *SA* с фиксированными положениями (вариант *д*) или при автоматическом управлении контакты какого-либо реле управления *KH*1 (варианты *е, ж, и*), получается простейшая схема управления.

Она осуществляет дистанционное управление при отсутствии нулевой блокировки (возможен самозапуск двигателя при восстановлении напряжения на схеме). При варианте *е* электродвигатель включается при срабатывании реле *KH*1, при варианте *ж* – отключается.

Для осуществления схемы с нулевой блокировкой (шунтирование пусковой кнопки замыкающими блок-контактами) необходимо замыкающую кнопку *SB*2 «Пуск 2» и размыкающую кнопку *SB*1 «Стоп» включить последовательно к зажимам 1 и 2, а параллельно кнопке *SB*2 включить замыкающие вспомогательные контакты (блок-контакты) электромагнитного пускателя *KM* (вариант *з*). При нажатии кнопки *SB*2 замыкается цепь катушки электромагнитного пускателя *KM*, пускатель срабатывает и главными контактами включает статор двигателя, а блок контактами шунтирует (блокирует) кнопку *SB*2, и теперь ее можно отпустить. Отключение двигателя произойдет или при нажатии кнопки *SB*1, или при срабатывании электротеплового реле *KK*, так как в обоих случаях разрывается цепь питания катушки пускателя *KM*. Если напряжение в сети исчезнет или снизится до величины, при которой электромагнит пускателя не в состоянии будет удержать во включенном положении свои контакты, блок-контакты в цепи катушки разомкнутся и электромагнитный пускатель отключится. Повторное включение возможно лишь при восстановлении нормального напряжения и последующем нажатии кнопки *SB*2. Таким образом, по этой схеме самозапуск электродвигателя невозможен (нулевая защита или

нулевая блокировка). Нулевая блокировка имеется всегда, когда кнопка *SB*2 шунтируется блок-контактами электромагнитного пускателя *KM*.

Схема управления (вариант *и*) обеспечивает не только нулевую блокировку, но и отключение катушки электромагнитного пускателя *KM* при размыкании контакта реле управления *KH*1. Для обеспечения автоматической остановки рабочего механизма, например в двух заданных точках, используются размыкающие контакты конечных выключателей *SQ*1 и *SQ*2, включенных последовательно с блок-контактами электромагнитного пускателя *KM* (вариант *к*). Эта же схема обеспечивает и нулевую блокировку.

В схеме управления (вариант *л*) для усиления сигнала реле управления *KH*1 используется промежуточное реле *KH*2, размыкающие контакты которого включены в цепь питания катушки электромагнитного пускателя *KM* через замыкающие контакты промежуточного реле *KH*2, пускатель срабатывает. При срабатывании реле управления *KH*1 подается напряжение на катушку промежуточного реле *KH*2, оно срабатывает и через свои размыкающие контакты отключает от сети катушку электромагнитного пускателя *KM*. Схема имеет и нулевую блокировку.

Если нужно управлять электродвигателем из нескольких мест, например двух (вариант *м*), то все замыкающие контакты аппаратов управления нужно подключать параллельно (*SB*2, *SB*4), а размыкающие – последовательно (*SB*1, *SB*3). Схема обеспечивает также и нулевую блокировку.

8.2. Порядок выполнения работы

1. Начертить принципиальные электрические схемы лабораторной установки (см. рис. 8.1). Записать по усмотрению студента паспортные величины и характеристики объекта уравнения, начертить одну электрическую схему из предлагаемых нескольких электрических схем по данному варианту работы электродвигателя (всего начертить пять схем):

- схема «толчок» (варианты *а*…*г*);
- схема при отсутствии нулевой блокировки (варианты *д*…*ж*);
- обычная схема включения (вариант *з*);
- схема включения с использованием промежуточного реле и конечного выключателя (варианты *и*…*л*);
- схема включения из двух мест (вариант *м*).

2. Собрать цепи в соответствии с выбранными схемами (см. рис. 8.1) с помощью соединительных проводников и подсоединить их поочередно к силовому настенному щиту с линейным напряжением 380 В. Поочередное подключение цепочек управления к сети осуществляется в точках одинаковых маркировок узла сети. При этом узел цепи управления с цифровой маркировкой 1 подсоединяется к фазе с цифровой маркировкой 1, узел цепи с цифровой маркировкой 2 подключают к узлу цепи 2 у катушки электромагнитного пускателя, а узел цепи с цифровой маркировкой 3 подсоединяют к узлу цепи с цифровой маркировкой 3 у контакта электротеплового реле.

3. После разрешения преподавателя поочередно включить и опробовать в работе простейшие схемы включения асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, проверив при этом работоспособность данной схемы управления и устранив ошибки, допущенные при сборке, неполадки в аппаратуре.

Контрольные вопросы

1. Объясните назначение схем управления электродвигателем, используемых в работе.

2. Какое значение имеет буквенное и цифровое обозначение электрического аппарата и всех его элементов?

3. Каково начертание элементов отдельных аппаратов, используемых в электрических схемах управления?

4. Поясните назначение блокировочных контактов в электрических схемах управления электроустановками.

5. Как включаются кнопки «Пуск», «Стоп» в схеме управления из двух мест?

6. Как включаются катушка и контакты реле управления и промежуточного реле в цепях управления?

Лабораторная работа 9.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ СТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы:

1. Изучить естественные статические электромеханическую (ЭМХ) и механическую (МХ) характеристики асинхронного двигателя.

2. Освоить методики расчета естественных статических ЭМХ и МХ асинхронного двигателя с фазным ротором по паспортным данным.

3. Получить практические навыки по экспериментальному исследованию естественных статических ЭМХ и МХ асинхронного двигателя с фазным ротором.

Объект и средства исследования:

- универсальный стенд НТЦ-06.11 «Асинхронный электродвигатель с МПСУ», оснащенный двухдвигательным электромашинным агрегатом, в который входят: асинхронный двигатель с фазным ротором (АД ФР) с открытой схемой обмоток статора и двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ);

- электродвигатель АД ФР: тип – АИР56А2; номинальная мощность – 180 Вт; номинальное скольжение – 9 %, КПД – 65 %, cos φ – 0,78, (M_{max} / $M_{ном}$) = 2,2; ($M_{п}$ / $M_{ном}$) = 2,2; (M_{min} / $M_{ном}$) = 2,2; ($I_{п}$ / $I_{ном}$) = 5,0;

- электродвигатель ДПТ НВ: тип – ПЛ-062; номинальная мощность – 120 Вт; номинальное напряжение – 220 В; номинальный ток – 0,95 А; частота вращения – 3 000 об/мин; номинальный КПД – 61 %; сопротивление якоря – 30 Ом; индуктивность якоря – 155 мГн;

- источник пониженного переменного напряжения (~24 В).

- цифровые измерительные приборы.

9.1. Основные теоретические сведения

Статическая электромеханическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой зависимость угловой скорости двигателя от тока статора в установившемся режиме работы $\omega = f(I_1)$. Здесь I_1 – действующее значение тока обмотки статора.

Расчет и анализ статических электромеханических и механических характеристик двигателя – важный этап проектирования электропривода, который позволяет оценить его работу в установившемся режиме.

Для асинхронного двигателя с фазным ротором (имеет на роторе такую же фазную обмотку, как и на статоре, и ее выводы выведены на контактные кольца) в качестве электромеханической характеристики может выступать и зависимость угловой скорости двигателя от тока ротора в установившемся режиме работы $\omega = f(I_2)$. Здесь I_2 – действующее значение тока обмотки ротора.

Электромеханическая характеристика позволяет оценить загрузку двигателя по току, а также верно выбрать коммутационные аппараты.

Статическая механическая характеристика двигателя $\omega = f(M)$ представляет собой зависимость угловой скорости от момента (электромагнитного $M_э$ или на валу $M_в$) в установившемся режиме работы. Момент электромагнитный $M_э$ и на валу $M_в$ связаны соотношением $M_э = M_в \pm \Delta M$, где ΔM – момент потерь вращения. В двигательном режиме работы момент электромагнитный $M_э$ больше момента на валу $M_в$ на величину ΔM, а в тормозных режимах (рекуперативное торможение, торможение противовключением и динамическое торможение) меньше.

Статическая механическая характеристика позволяет определить угловую скорость, с которой будет вращаться вал двигателя при данном моменте нагрузки $M_с$ на валу.

Статическая механическая характеристика есть множество точек установившегося режима работы электрической машины, для которого момент, развиваемый двигателем, равен моменту нагрузки ($M = M_с$).

При совместном рассмотрении механических характеристик механизма $\omega = f(M_с)$ и двигателя $\omega = f(M)$ в качестве последней следует рассматривать зависимость угловой скорости в функции момента двигателя на валу $\omega = f(M_в)$.

Однако следует помнить, что эта функция имеет разрыв первого рода при переходе от двигательного к тормозному режиму работы. Поэтому в ряде задач целесообразнее рассматривать зависимость угловой скорости от электромагнитного момента двигателя $\omega = f(M_э)$, отнеся момент потерь вращения, вызванный механическими потерями в двигателе, если он превышает 5 % от номинального электромагнитного момента, к нагрузке $M_с$ или пренебрегая им в случае его малости (менее 5 %). При этом следует помнить, что момент потерь вращения ΔM зависит от угловой скорости двигателя, т. е. $\Delta M = f(\omega)$.

Статические характеристики (электромеханические и механические), рассчитанные при номинальных параметрах для нормальной схемы включения двигателя, носят название ***естественные характеристики***.

Следует иметь в виду, что расчет статических режимов работы и характеристик двигателя в этих режимах является очень важным этапом проектирования электропривода, так как по этим характеристикам осуществляют расчет и выбор пусковых, тормозных и регулировочных реостатов; выбирают при необходимости приемлемый тип силового преобразователя электрической энергии; рассчитывают и осуществляют выбор электрических аппаратов управления и защиты.

Большинство методов расчета требует знаний, кроме каталожных данных двигателя, также его электрических параметров (активных и индуктивных сопротивлений статорных и роторных обмоток асинхронных двигателей и др.). Если эти параметры в справочниках не приведены, что чаще всего и бывает, необходимо применять приближенные методы расчета, основанные лишь на данных, приведенных в каталогах (справочниках). Такой подход к расчету статических характеристик асинхронных двигателей принят за основу в данном учебно-методическом пособии.

Итак, статическая механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой зависимость угловой скорости вращения ротора ω от вращающего момента M: $\omega = f(M)$.

Учитывая, что

$$\omega = \omega_0(1-s), \tag{9.1}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p_{\text{п}}}, \tag{9.2}$$

где ω_0 – угловая скорость вращения поля, рад/с;

s – скольжение;

f – частота, Гц;

$p_{\text{п}}$ – число пар полюсов.

Статическую МХ АД можно представить в виде зависимости электромагнитного момента от скольжения: $M = f(s)$.

Тогда уравнение механической характеристики асинхронного двигателя, полученное из схемы замещения, имеет вид

$$M = \frac{3U_{\text{ф}}^2 \cdot R_2 / s}{\omega_0\left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2\right]} = \frac{3U_{\text{ф}}^2 \cdot R_2 / s}{\omega_0\left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_k^2\right]}, \tag{9.3}$$

где $U_{\text{ф}}$ – действующее значение фазного напряжения сети, В;

R_1, R_2 – активные сопротивления обмоток соответственно фазе статора и фазе ротора, приведенные к цепи статора, Ом;

X_1, X_2 – индуктивные сопротивления обмоток соответственно фазе статора и фазе ротора, приведенные к цепи статора, Ом;

X_k – индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания, Ом;

s – скольжение двигателя;

ω_0 – угловая скорость поля двигателя, рад/с.

Индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания равно:

$$X_k = X_1 + X_2.$$

Анализ выражения (9.3) показывает, что зависимость $M = f(s)$ имеет экстремальные точки.

Максимальное значение момента, развиваемого двигателем, называется критическим (максимальным):

$$M_k = \pm \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right]}. \qquad (9.4)$$

Скольжение, соответствующее критическому моменту МК, также называется критическим:

$$s_k = \pm \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \qquad (9.5)$$

В выражениях (9.4) и (9.5) знак «+» соответствует двигательному режиму, а знак «–» – генераторному.

С учетом (9.4) и (9.5) выражение МХ АД (9.3) может быть представлено после преобразований в виде

$$M = \frac{M_k(2+q)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + q}, \qquad (9.6)$$

где $q = 2R_1 / R_2 s$.

Выражение (9.6) носит название ***уточненной формулы Клосса***.

Статическую механическую характеристику АД $\omega = f(M)$ (здесь M – момент электромагнитный) можно построить, используя формулу (9.6) и уравнение связи между угловой скоростью вала двигателя и скольжением:

$$\omega = \omega_0(1 - s). \qquad (9.7)$$

Момент критический и скольжение критическое определяются соответственно по формулам (9.4) и (9.5) и по данным схемы замещения АД.

Если обозначить отношение активных сопротивлений статора и ротора, приведенное к цепи статора, через a, то формула Клосса (9.6) примет вид

$$M = \frac{2M_k(1+a+s_k)}{\frac{s}{s_k}+\frac{s_k}{s}+2as_k}, \tag{9.8}$$

где a – параметр ($a = R_1 / R_2$).

Для асинхронных двигателей малой мощности ($P_{2н} < 1$ кВт) и для асинхронных двигателей с фазным ротором $R_1 \approx R_2$ можно принять $a \approx 1$, тогда формула Клосса примет вид

$$M = \frac{2M_k(1+s_k)}{\frac{s}{s_k}+\frac{s_k}{s}+2s_k}. \tag{9.9}$$

Для асинхронных двигателей большой мощности ($P_{2н} > 100$ кВт) сопротивление R_1 невелико, тогда можно считать, что $R_1 << X_k$ и $s_k << 1$. В таком случае, пренебрегая активным сопротивлением обмоток статора (считая $R_1 \approx 0$ и, следовательно, $a = 0$), получим упрощенную формулу Клосса:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k}+\frac{s_k}{s}}. \tag{9.10}$$

Здесь $s_k = \pm\frac{R_2}{X_k}$, $M_k = \pm\frac{3U_ф^2}{2\omega_0 X_k}$.

При малых значениях скольжений $s < s_k$ с достаточной степенью точности можно пренебречь первым слагаемым знаменателя в формуле (9.10). В этом случае МХ АД может быть представлена прямой

$$M \approx 2M_k\frac{s}{s_k}. \tag{9.11}$$

Точка, соответствующая номинальному режиму работы асинхронного двигателя ($M = M_н$; $s = s_н$; $\omega = \omega_н$), лежит на этом участке характеристики.

При $s > sk$ можно пренебречь вторым слагаемым знаменателя в формуле (9.10). Тогда участок МХ представляет собой гиперболу

$$M \approx 2M_k \frac{s_k}{s}. \qquad (9.12)$$

В этом случае МХ АД имеет характерные точки:

$s = 0$ ($\omega = \omega_0$); $M = 0$ – точка идеального холостого хода;

$s = \pm s_k$; $M = \pm M_k$ – точка максимального (критического) момента;

$s = 1$ ($\omega = 0$); $M = M_п$ – точка пускового момента.

Участки характеристики:

$s \in (-\infty; 0)$ – режим генераторного торможения;

$s \in [0; 1]$ – двигательный режим;

$s \in (1; +\infty)$ – режим торможения противовключением.

Таким образом, для расчета естественной статической механической характеристики асинхронного двигателя можно воспользоваться формулой Клосса (9.8), (9.9) или (9.10) и уравнением связи угловой скорости асинхронного двигателя и его скольжения (9.7). При этом должны быть известны параметры схемы замещения фазы асинхронного двигателя.

Обычно в каталогах на асинхронные двигатели не приведены параметры схемы замещения (активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток), поэтому вышеприведенные формулы имеют ограниченное применение для расчета статических характеристик АД.

В каталогах на асинхронные двигатели помимо номинальных данных ($P_{2н}$, $n_н$, $\cos \varphi_н$, $\eta_н$ и др.) приводится также кратность максимального момента в двигательном режиме по отношению к номинальному моменту: $\mu_k = M_k / M_н$. Кратность максимального момента иногда обозначают $\lambda = \mu_k$.

Умножив номинальный момент двигателя на кратность максимального момента, нетрудно найти значение критического момента, используемого в формулах (9.8), (9.9) и (9.10).

$$M_k = \mu_k M_н = \lambda M_н. \qquad (9.13)$$

Момент номинальный равен:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{2\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}. \tag{9.14}$$

Номинальную угловую скорость вала АД определяют, зная номинальную частоту вращения вала АД, по формуле

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi n_{\text{н}}}{30}. \tag{9.15}$$

Значение s_k в каталогах не приводится, но оно может быть найдено по известным параметрам асинхронного двигателя.

При этом для асинхронных двигателей малой мощности и асинхронных двигателей с фазным ротором, у которых $R_1 \approx R_2$, можно принять $a \approx 1$, тогда

$$s_k = s_{\text{н}} \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1 + 2s_{\text{н}}(\lambda - 1)}}{1 - 2s_{\text{н}}(\lambda - 1)}, \tag{9.16}$$

а для машин большой мощности, у которых $R_1 \approx 0$, можно принять $a \approx 0$, тогда

$$s_k = s_{\text{н}}(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \tag{9.17}$$

Таким образом, используя формулы Клосса, можно рассчитать статическую механическую характеристику асинхронного двигателя $\omega = f(M)$ по каталожным данным.

Для этого необходимо, изменяя скольжение в требуемых пределах с определенным шагом, вычислять значения момента по формуле (9.8), (9.9) или (9.10) и значения угловой скорости по формуле (9.7).

Следует иметь в виду, что рассчитанная таким образом характеристика будет представлять собой зависимость угловой скорости вала асинхронного двигателя от момента на его валу, так как критическое значение момента, используемое для расчета МХ в формулах Клосса, определялось через момент номинальный АД на его валу.

Статическая механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой множество точек установившегося режима работы,

в котором момент, развиваемый двигателем, равен моменту статической нагрузки, приведенному к валу двигателя (т. е. $M_{дв} = M_c$). Поэтому статической механической характеристикой АД пользуются, чтобы определить скорость, с которой будет вращаться вал двигателя при данном моменте нагрузки.

Чтобы определить скорость, с которой будет вращаться двигатель при заданном моменте нагрузки на валу, в уравнение Клосса необходимо подставить вместо M заданное значение момента статического M_c и решить его относительно скольжения. Следует иметь в виду, что решение даст два значения скольжения. Необходимо для дальнейших расчетов выбрать нужное значение s (оно должно быть больше нуля, но меньше s_k).

Затем для выбранного значения s по формуле (9.7) определить угловую скорость двигателя. Это и будет статическая скорость двигателя при данной нагрузке на его валу (ω_c).

Электромеханические характеристики $I_2 = f(s)$ и $I_1 = f(s)$ могут быть представлены в виде

$$I_2 = \frac{U_ф}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_k^2}}; \qquad (9.18)$$

$$I_1 = \sqrt{I_μ^2 + I_2^2(1 + 2α\sqrt{1 - a^2 s_k^2})}, \qquad (9.19)$$

где $I_μ = \frac{U_ф}{X_μ}$ – ток намагничивания, А;

$α = \frac{I_μ}{I_{пред}}$ – коэффициент;

$I_{пред} = \frac{U_ф}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}$ – предельное значение тока I_2.

Статическую электромеханическую характеристику асинхронного двигателя $\omega = f(I_1)$ можно рассчитать, используя приближенную формулу, предложенную В. А. Шубенко, – зависимость $I_1 = f(s)$, и формулу связи угловой скорости и скольжения двигателя.

Формула В. А. Шубенко имеет вид

$$I_1 \approx \sqrt{I_0^2 + (I_н^2 - I_0^2)\frac{Ms}{M_н s_н}}, \qquad (9.20)$$

где I_1 – ток фазы статора, А;

$I_{1н}$ – номинальный ток фазы статора двигателя, А;

I_0 – ток холостого хода двигателя, А;

M, $M_н$ – момент двигателя при скольжении s, который определяется при расчете механической характеристики, и номинальный момент двигателя соответственно, Н · м;

s, $s_н$ – скольжение двигателя текущее и номинальное соответственно.

Номинальный ток статора (если не задан) и ток холостого хода можно определить по каталожным данным асинхронного двигателя по следующим формулам:

$$I_{1н} = \frac{P_{2н}}{3U_{фн}\eta_н \cos\varphi_н} = \frac{P_{2н}}{\sqrt{3}U_{лн}\eta_н \cos\varphi_н}; \qquad (9.21)$$

$$I_0 \approx I_н\left(\sin\varphi_н - \frac{1}{2\mu_k}\cos\varphi_н\right). \qquad (9.22)$$

При необходимости номинальную угловую скорость двигателя можно определить, зная номинальную частоту вращения $n_н$ (об/мин) по выражению (9.15).

Номинальное скольжение двигателя равно:

$$s_н = \frac{\omega_0 - \omega_н}{\omega_0} = \frac{n_0 - n_н}{n_0}. \qquad (9.23)$$

Ниже на рис. 9.1 схематично представлен примерный вид естественной статической МХ АД $M = f(\omega)$, а на рис. 9.2 – естественной ЭМХ АД $I_1 = f(\omega)$.

МХ АД, рассчитанная по паспортным данным, и МХ АД, снятая экспериментально, несомненно, будут отличаться. Отличие будет сильнее заметно в области низких скоростей, что вызвано влиянием зубцовых гармоник и влиянием эффекта вытеснения тока при низких скоростях.

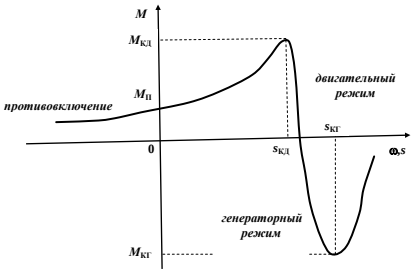


Рис. 9.1. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

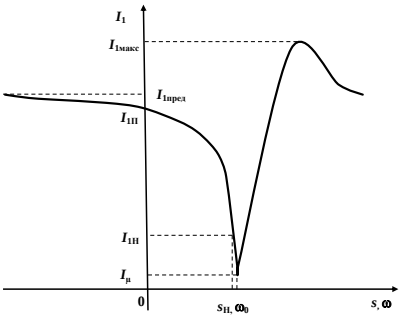


Рис. 9.2. Естественная электромеханическая характеристика асинхронного двигателя

9.2. Описание лабораторной установки

Универсальный стенд НТЦ-06.11 «Асинхронный электродвигатель с МПСУ» (рис. 9.3) оснащен двухдвигательным электромашинным агрегатом, в который входят:

- исследуемый двигатель – АД ФР с открытой схемой обмоток статора (выведены начала и концы фазных обмоток статора);
- нагрузочный двигатель – ДПТ НВ.

Требуемые коммутации на панели универсального стенда (рис. 9.3) осуществляют перемычками, реализуя требуемые схемы включения.

На панели универсального стенда расположен разъем (*USB*) для подключения (при необходимости) компьютера и использования программного обеспечения для комплексного проведения лабораторных работ.

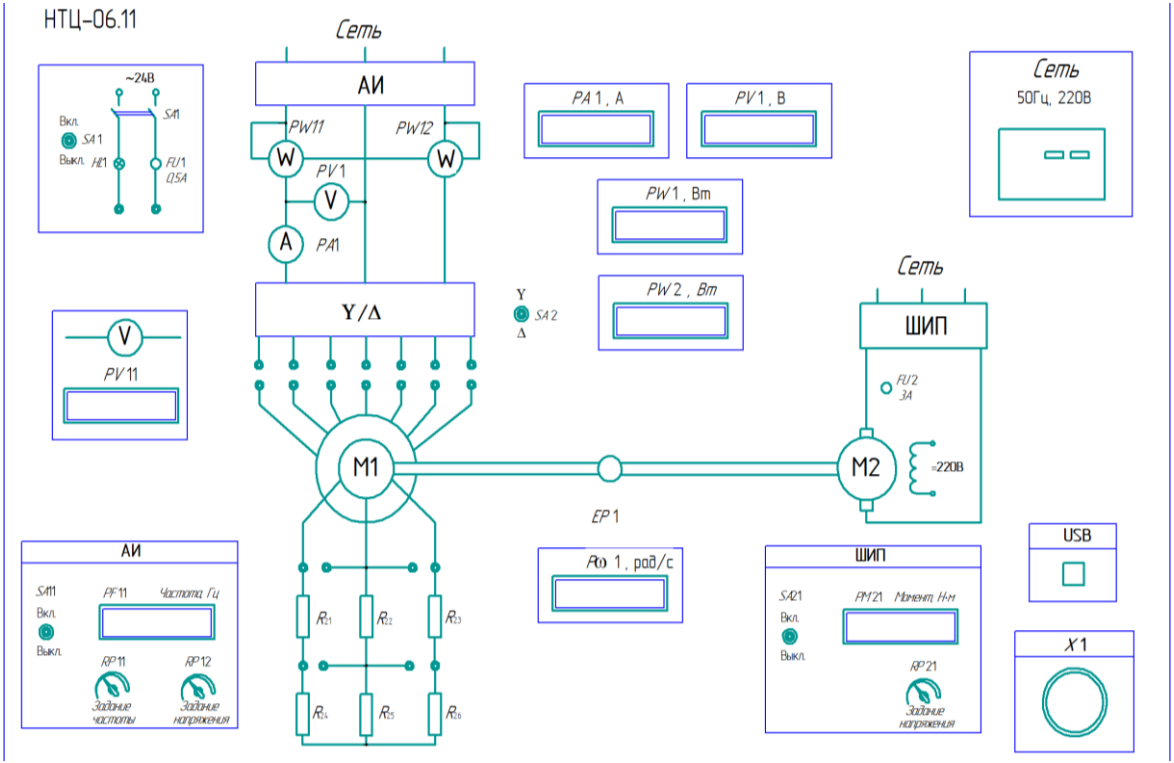


Рис. 9.3. Вид панели универсального стенда НТЦ-06.11

Для измерения скорости вращения электромашинного агрегата используется импульсный датчик положения. Для питания асинхронного двигателя с фазным ротором в универсальном стенде используется инвертор, представляющий собой трехфазный мост на *IGBT*-транзисторах, собранных в одном силовом модуле. Для питания обмоток якоря и возбуждения ДПТ НВ в состав стенда входит трехфазный широтно-импульсный преобразователь (ШИП), два плеча которого используются для питания якоря ДПТ, оставшееся плечо используется для питания обмотки возбуждения ДПТ. Для регистрации измеряемых величин в процессе выполнения экспериментальных исследований в состав универсального стенда входят цифровые измерительные приборы, которые позволяют проводить измерения: частоты; напряжения на статоре; тока обмотки статора; мощности (активной, реактивной, полной); угловой скорости; момента на валу, создаваемого двигателем *M*2.

9.3. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на рис. 9.4, используя комплект перемычек.

Внимание! *Перед включением стенда необходимо убедиться в том, что:*

- *тумблеры включения преобразователей* (*SA*11, *SA*21) *и тумблер включения дополнительного источника питания* (*SA*1) *находятся в положении «выключено»;*

- *регуляторы заданий выходных величин преобразователей* (*RP*11, *RP*12, *RP*21) *находятся в крайнем левом положении;*

- *тумблер переключения схемы соединения обмотки двигателя* (*SA*2) *находится в положении* «Y» *(«звезда») или* «Δ» *(«треугольник»);*

- *на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта перемычки* (*рис. 9.4*).

2. Подключить стенд к трехфазной сети (включить автоматический выключатель «Сеть»).

3. Тумблером *SA*2 выбрать требуемую схему соединения обмоток статора («звезда» либо «треугольник»).

4. Регулятором *RP*11 «Задание частоты» установить выходную частоту автономного инвертора (АИ), равную 50 Гц (контролировать по прибору *PF*11).

5. Тумблером *SA*11 включить АИ.

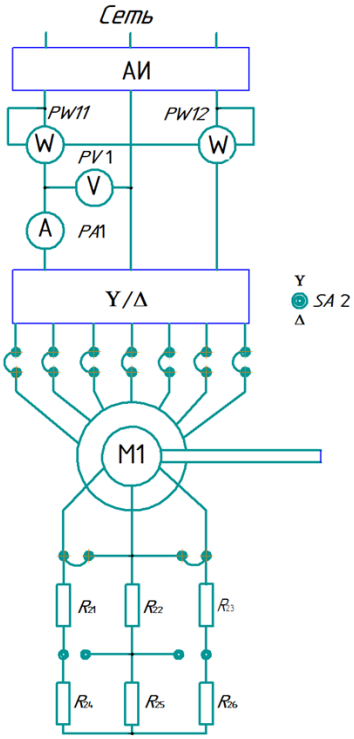


Рис. 9.4. Схема для исследования статических характеристик

6. Регулятором *RP*12 «Задание напряжения», плавно увеличивая напряжение на статоре асинхронного двигателя до 220 В, разогнать исследуемый двигатель (контролировать по вольтметру *PV*1).

7. Замерить (запомнить или записать) значение скорости вращения двигателя (по прибору *P*ω1).

8. Тумблером *SA*11 отключить АИ. Положения регуляторов *RP*11 и *RP*12 не изменять.

9. Тумблером *SA*21 включить ШИП.

10. Регулятором *RP*21, плавно увеличивая напряжение на якоре нагрузочного двигателя *M*2, разогнать исследуемый двигатель до скорости, полученной в п. 7 (контролировать по прибору *P*ω1).

11. Тумблером *SA*11 включить АИ.

12. Регулятором *RP*21, плавно увеличивая напряжение на якоре нагрузочного двигателя *M*2, разогнать исследуемый двигатель до скорости выше скорости холостого хода (314 рад/с), тем самым переводя двигатель *M*1 в генераторный режим работы параллельно с сетью.

13. Плавно увеличивая напряжение на якоре двигателя *M*2, снять ряд точек установившегося режима работы АД для генераторного режима работы.

14. Показания приборов (ток статора (амперметр *PA*1), момент на валу (прибор *PM*21) и скорость вращения (прибор *P*ω1)) занести в табл. 9.1.

Внимание! *Изменять напряжение на якоре нагрузочного двигателя M2 можно до тех пор, пока значение момента на валу двигателя M1 не превышает 0,8 Н · м (контролировать по прибору PM21).*

Таблица 9.1. **Результаты исследования характеристик для генераторного режима**

Параметр	Прибор	Данные опытов					
I_1, А	*PA*1						
ω, рад/с	*EP*1	320	330	340	350	360	370
M, Н · м	*PM*21						

15. Плавно уменьшая напряжение на якоре двигателя *M*2, снять ряд точек установившегося режима работы АД для двигательного режима работы.

16. Показания приборов (ток статора (амперметр *PA*1), момент на валу (прибор *PM*21) и скорость вращения (прибор *P*ω1)) занести в табл. 9.2.

Таблица 9.2. **Результаты исследования характеристик для двигательного режима**

Параметр	Прибор	Данные опытов					
I_1, А	*PA*1						
ω, рад/с	*EP*1	370	360	350	340	330	320
M, Н · м	*PM*21						

После проведения опытов необходимо:

- регулятором *RP*21 плавно уменьшить напряжение на якоре вспомогательного двигателя до такого значения, при котором момент на валу двигателя станет равным 0 Н · м (контролировать по прибору *PM*21);
- тумблером *SA*21 отключить ШИП;

- регулятором *RP*12 плавно уменьшить напряжение на статоре асинхронного двигателя до 0 (контролировать по вольтметру *PV*1);

- тумблером *SA*11 отключить АИ;

- выключить автоматический выключатель «Сеть»;

- снять с панели стенда установленные перемычки.

Обработка результатов исследований. По опытным данным (см. табл. 9.1, 9.2) построить естественную электромеханическую характеристику исследуемого двигателя (асинхронного двигателя с фазным ротором) $I_1 = f(\omega)$.

По оси абсцисс требуется отложить данные угловой скорости ω (рад/с), а по оси ординат – соответствующие значения тока статора I_1 (А).

Для построения естественной статической механической характеристики исследуемого двигателя $M = f(\omega)$ также необходимо воспользоваться экспериментальными данными из табл. 9.1, 9.2.

По оси абсцисс следует отложить значения угловой скорости ω (рад/с), а по оси ординат – соответствующие значения момента M (Н · м).

Вал исследуемого двигателя *M*1 и вал нагрузочного двигателя *M*2 механически соединены посредством муфты, следовательно, они имеют на валу одинаковый по значению момент (соединение абсолютно жесткое).

Но если исследуемый двигатель *M*1 работает в двигательном режиме, то у него момент на валу положительный, в то время как нагрузочный двигатель *M*2 работает в тормозном (генераторном) режиме работы и момент на его валу отрицательный.

На приборе *PM*21 отображается момент, создаваемый двигателем *M*2. Момент, создаваемый двигателем *M*1, будет равен:

$$M_{M1} = -(M_{M2} - dM), \qquad (9.24)$$

где dM – момент двигателя *M*2 при скорости идеального холостого хода двигателя *M*1 (314 рад/с).

Построенные таким образом по экспериментальным данным статические электромеханические и механические характеристики исследуемого двигателя (асинхронного двигателя с фазным ротором) следует сравнить с характеристиками, рассчитанными по паспортным данным исследуемого двигателя, и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что показывает статическая механическая характеристика асинхронного двигателя?

2. Что показывает статическая электромеханическая характеристика асинхронного двигателя?

3. Что такое естественная механическая характеристика? В чем заключается разница между естественной и искусственной механическими характеристиками?

4. Запишите выражение естественной механической характеристики асинхронного двигателя и проанализируйте его.

5. В чем заключается разница между моментом электромагнитным и моментом на валу двигателя? Как они соотносятся, например, в двигательном режиме работы?

6. Что такое критический момент асинхронного двигателя? От каких параметров он зависит?

7. В каких квадрантах плоскости (ω, M) изображают статические характеристики в тормозных режимах работы (генераторное торможение, торможение противовключением)?

8. Поясните работу универсального лабораторного стенда при работе исследуемого двигателя в двигательном режиме.

9. Поясните принцип создания регулируемой нагрузки на валу исследуемого двигателя в универсальном лабораторном стенде.

10. Поясните процессы преобразования энергии в электромашинном агрегате при работе исследуемого двигателя в режиме генераторного торможения.

11. Начертите электромеханическую и механическую характеристики асинхронного двигателя. На характеристиках укажите пусковой ток и пусковой момент. Почему кратность пускового тока велика, а пускового момента нет?

12. Что такое критическое скольжение? От каких параметров двигателя и питающей сети они зависят?

13. Покажите на статической механической характеристике рабочий участок. Почему он так называется?

Лабораторная работа 10.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ И МАХОВОГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕТОДОМ СВОБОДНОГО ВЫБЕГА

Цель работы:

1. Определить момент инерции и маховой момент электропривода.

2. Приобрести практические навыки опытного определения момента инерции электропривода.

Объект и средства исследования:

- универсальный стенд НТЦ-07.30 «Электропривод с сервоприводом», в который входят: асинхронный двигатель с фазным ротором с открытой схемой обмоток статора и двигатели постоянного тока с независимым возбуждением;

- электродвигатель АД ФР: тип – АИР56А2; номинальное напряжение – 220/380 В; номинальная мощность – 180 Вт; номинальный ток статора – 0,9 А; номинальное скольжение – 9 %; КПД – 65 %; cos φ – 0,78; $M_{max} / M_{ном} = 2,2$; $M_{п} / M_{ном} = 2,2$; $M_{min} / M_{ном} = 2,2$; $I_{п} / I_{ном} = 5,0$;

- электродвигатели ДПТ НВ: тип – ПЛ-062; номинальная мощность – 120 Вт; номинальное напряжение – 220 В; номинальный ток – 0,95 А; номинальный ток возбуждения – 0,17 А; частота вращения – 3 000 об/мин; номинальный КПД – 61 %; сопротивления якоря – 30 Ом; индуктивность якоря – 155 мГн;

- цифровые измерительные приборы.

10.1. Основные теоретические сведения

Состояние привода зависит от действующего вращающего момента двигателя $M_{дв}$ и статического момента сопротивлении $M_{с}$, определяемого нагрузкой производственного механизма. Каждый из моментов может быть движущим и тормозящим. Например, вращение диска пилы или крыльчатки вентилятора: $M_{дв}$ – тормозящий, $M_{с}$ – движущий; опускание краном груза при режиме противовключения двигателя: $M_{дв}$ – тормозящий, $M_{с}$ – движущий; силовой спуск груза – оба момента движущие; электрическое торможение прокатного стана – оба момента тормозящие.

В зависимости от причины, обусловливающей возникновение силы или момента сопротивления, различают активные и реактивные силы и моменты.

Активными (активная нагрузка) называют силы или моменты, которые появляются независимо от движения и создаются посторонними источниками механической энергии. Они всегда направлены в одну сторону, поэтому при изменении направления действия активной нагрузки направление действия этих сил сохраняется. Примеры: сила притяжение земли, энергия ветра, потока воды, потенциальная энергия грузов, моменты от силы тяжести, растяжения, сжатия и скручивания упругих тел и т. п.

Реактивные силы или моменты (реактивная нагрузка) появляются только вследствие движения и направлены против него, т. е. они будут всегда тормозящими. При изменении направления вращения двигателя изменяется на противоположное и направление действия реактивной нагрузки. Примеры: механизмы трения в движущих элементах, моменты на рабочих органах металлорежущих станков, механизмы обжатия, резания, подачи жидкости и газа, разрушения неупругих материалов.

Движение электропривода можно рассматривать на каком-либо одном элементе, к которому приведены все внешние силы и моменты, инерционные массы механических звеньев. За такой элемент обычно принимают вал двигателя.

Приведение моментов и сил сопротивления от одной оси вращения к другой выполняется на основании закона сохранения энергии (баланса мощности в механической части привода), например к валу двигателя:

$$M_{\text{с. м}}\omega_{\text{м}}\frac{1}{\eta_{\text{п}}} = M_{\text{с}}\omega_{\text{дв}}, \tag{10.1}$$

откуда

$$M_{\text{с}} = M_{\text{с. м}}\frac{\omega_{\text{м}}}{\omega_{\text{дв}}}\frac{1}{\eta_{\text{дв}}} = \frac{M_{\text{с. м}}}{i\eta_{\text{дв}}}, \tag{10.2}$$

где $M_{\text{с. м}}$ – момент сопротивления производственного механизма;

$M_{\text{с}}$ – тоже момент сопротивления, но приведенный к валу двигателя;

$i = \frac{\omega_{\text{дв}}}{\omega_{\text{м}}}$ – передаточное число (отношение угловой скорости двигателя $\omega_{\text{дв}}$ к угловой скорости механизма $\omega_{\text{м}}$);

$\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи.

При наличии нескольких передач между двигателем и механизмом с передаточными числами i_1, i_2, …, i_n и соответствующими КПД момент сопротивления, приведенный к валу электродвигателя, определим по формуле

$$M_{\text{с}} = M_{\text{с.м}} \frac{1}{i_1 i_2 ... i_n} \frac{1}{\eta_1 \eta_2 ... \eta_n}. \qquad (10.3)$$

Приведение сил сопротивления механизма $F_{\text{с. м}}$ к валу электродвигателя выполняется аналогично, на том же основании, что и для момента, т. е.

$$F_{\text{с. м}} \upsilon \frac{1}{\eta_{\text{п}}} = M_{\text{с}} \omega_{\text{дв}}, \qquad (10.4)$$

откуда

$$M_{\text{с}} = \frac{F_{\text{с. м}} \upsilon}{\omega_{\text{дв}} \eta_{\text{п}}}, \qquad (10.5)$$

где υ – линейная скорость движения рабочего органа механизма.

Приведение моментов инерции к одной оси вращения, например к валу электродвигателя, основано на том, что суммарный запас кинетической энергии движущих частей привода, отнесенный к одной оси, остается неизменным, т. е.

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{дв}} + I_1 (\frac{\omega_1}{\omega_{\text{дв}}})^2 + ... + I_{\text{п}} (\frac{\omega_{\text{п}}}{\omega_{\text{дв}}})^2 + m_1 (\frac{\upsilon_1}{\omega_{\text{дв}}})^2 + ... + m_{\text{п}} (\frac{\upsilon_{\text{п}}}{\omega_{\text{дв}}}), \qquad (10.6)$$

где I_1, ..., I_n – момент инерции вращающихся частей;

ω_1, ..., ω_n – угловые скорости вращающихся частей;

m_1, ..., m_n – массы поступательно движущихся частей;

υ_1, ..., υ_n – линейные скорости движущихся частей.

Пример. Необходимо определить приведенные к валу электродвигателя момент сопротивления $M_{\text{с}}$, момент инерции $I_{\text{пр}}$ и мощность на привод $P_{\text{дв}}$ шахтной лебедки (рис. 10.1), если известны: масса груза $G_{\text{гр}}$, масса каната $G_{\text{к}}$, угловая скорость вала электродвигателя $\omega_{\text{дв}}$, момент инерции вала электродвигателя $I_{\text{дв}}$, момент инерции зубчатого

колеса *1* I_1 и зубчатого колеса *2* вместе с барабаном I_2, диаметр барабана $Д_б$, передаточное отношение $i_п$ и КПД передачи $\eta_п$.

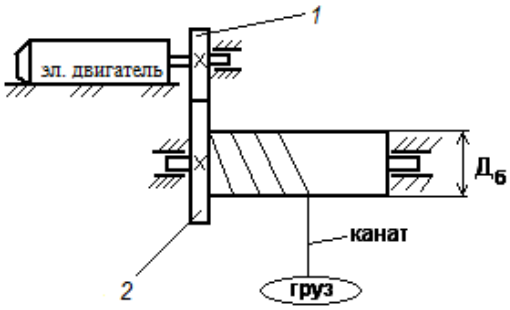


Рис. 10.1. Схема подъема груза с помощью лебедки

Применяя формулы (10.2), (10.5) и формулу (10.6) получим, что мощность, необходимая на привод, $P_{дв} = M_с\omega_{дв}$, имеем:

- момент сопротивления $M_с$, приведенный к моменту двигателя:

$$M_с = M_{с.м}\frac{1}{i_п\eta_п} = \frac{(G_{гр}+G_к)Д_б}{2}\frac{1}{i_п\eta_п}; \qquad (10.7)$$

- момент инерции, приведенный к валу двигателя:

$$I_{пр} = I_{дв} + I_1 + I_2\frac{1}{i_п^2} + \frac{G_{гр}+G_к}{g}\frac{Д_б^2}{4i_п^2}; \qquad (10.8)$$

- мощность, необходимую на привод (кВт), при размерностях момента $M_с$ (Н · м) и угловой скорости двигателя $\omega_{дв}$ ($с^{-1}$):

$$P_{дв} = M_с\omega_{дв}\cdot 10^{-3}. \qquad (10.9)$$

При изучении движения механической части электропривода возникает необходимость в определении различных механических величин, характеризующих его: пути и угла поворота, скорости и ускорения, моментов и сил, вызывающих движения, и других величин, имеющих место в практических вопросах. Для анализа физических про-

цессов в электроприводе в основном используют основное уравнение движения электропривода.

При вращательном движении между моментом, развиваемым двигателем $M_{дв}$, и сопротивлением $M_с$ нагрузки в системе электродвигатель – производственный механизм существует соотношение, называемое основным уравнением движения электропривода.

$$\pm M_{дв} \mp M_с = M_{дин} = I_{пр} \frac{d\omega}{dt}, \qquad (10.10)$$

где $M_{дин}$ – динамический момент системы;

$I_{пр}$ – момент инерции движущихся частей системы, приведенный к валу двигателя;

$\frac{d\omega}{dt}$ – угловое ускорение системы.

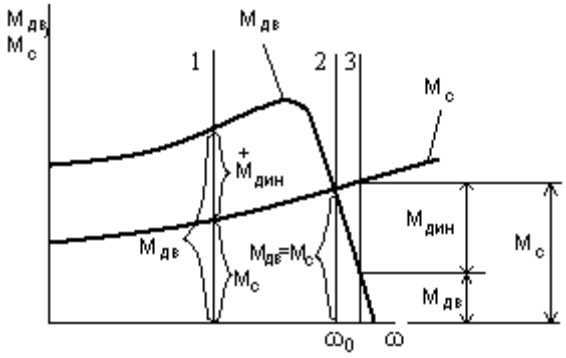


Рис. 10.2. Графическое изображение уравнения движения электропривода

Знак «+» перед $M_{дв}$ берется при работе двигателя в двигательном режиме, знак «–» – в тормозном режиме. Знак «–» перед $M_с$ показывает тормозящее действие статических сопротивлений (подъем груза, усилие резания, сжатие пружины и т. д.), знак «+» – когда $M_с$ помогает вращению привода (спуск груза, раскручивание пружины и т. д.). Знак «+» перед $M_{дин}$, а следовательно, и перед $d\omega / dt$ зависит от соотношения величины и знаков $M_{дв}$ и $M_с$. Когда $M_{дв} > M_с$, система получает ускорение $d\omega / dt$ со знаком «+». При $M_{дв} < M_с$ ускорение системы $d\omega / dt$ получает отрицательный знак, скорость падает. При $M_{дв} = M_с \times$ $\times (d\omega / dt) = 0$ привод работает в установившемся режиме. Динамиче-

ский момент проявляется только во время переходных режимов, когда изменяется скорость привода. При ускорении привода $M_{дин}$ направлен против движения, а при торможении он поддерживает движение.

Аналогичные соотношения получаются и для поступательного движения, являющегося простым следствием уравнения вращательного движения

$$\pm F_{дв} \mp F_{с} = F_{дин} = m\frac{d\upsilon}{dt}, \qquad (10.11)$$

где $F_{дв}$, $F_{с}$, $F_{дин}$ – соответственно усилия, развиваемые двигателем, при статических и динамических сопротивлениях;

m – приведенная масса движущихся частей;

$d\omega / dt$ – линейное ускорение движущихся масс.

Характер неустановившегося механического движения электропривода, исходя из формулы (10.10), однозначно определяется законом изменения динамического момента, который является функцией моментов двигателя и нагрузки. Рассмотрение неустановившегося движения электропривода позволяет получить зависимости изменения во времени выходных механических координат электропривода – момента $M(t)$, скорости $\omega(t)$ и положения вала двигателя $\varphi(t)$. Обычно законы изменения моментов двигателя и нагрузки должны быть предварительно заданы. В переходных режимах электропровод работает при пуске, торможении и изменении направления вращения, резких колебаниях нагрузки.

Определение времени переходных режимов, влияющих на производительность производственных механизмов, основано на интегрировании уравнения (10.10) движения привода.

Разделяя переменные, получим

$$dt = I_{пр}\frac{d\omega}{M_{дин}}. \qquad (10.12)$$

Время, необходимое для изменения скорости привода от ω_1 до ω_2, определим по формуле

$$t_{1,\,2} = I_{пр}\int_{\omega_1}^{\omega_2}\frac{d\omega}{M_{дин}}, \qquad (10.13)$$

где $M_{дин} = f(\omega)$ – динамический момент в функции скорости.

Для решения этого интеграла необходимо знать зависимость моментов двигателя и механизма от скорости. Функция $M_{дин} = f(\omega)$ должна иметь аналитическое выражение, которое поддается интегрированию. В простейшем случае, приняв $M_{дв}$ = const, $M_с$ = const и $I_{пр}$ = const, имеем

$$t_{1,\,2} = I_{пр}\frac{\omega_2 - \omega_1}{\pm M_{дв} \mp M_с} = I_{пр}\frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{дин}}. \qquad (10.14)$$

Если $M_{дин}$ и $M_с$ находятся в слишком сложной зависимости от скорости вращения или не поддаются аналитическому выражению, то для определения времени разбега и торможения используются приближенные графические и графоаналитические методы, интегрированные уравнения движения электропривода. Наиболее распространены графический метод в варианте метода пропорций или конечных пропорций и графоаналитический в варианте метода площадей или последовательных интервалов. Рассмотрим эти методы.

Сущность метода пропорций заключается в замене бесконечно малых приращений конечными приращениями, т. е. $d\omega$ и dt на $\Delta\omega$ и Δt. В основе этого метода лежит уравнение движения привода (10.10) $dt = I_{пр}d\omega / M_{дин}$ в виде приращений:

$$\Delta t = I_{пр}\frac{\Delta\omega}{M_{дв} - M_с} = I_{пр}\frac{\Delta\omega}{M_{дин}}. \qquad (10.15)$$

Построение осуществляется в виде, представленном на (рис. 10.3). Показываем ход графического построения кривой $t = f(\omega)$ и нахождения времени пуска двигателя на примере механических характеристик асинхронного двигателя и вентилятора.

В левом квадрате строим характеристики $M_{дв}$ и $M_с$ и графически находим зависимость динамического момента от скорости $M_{дин}(\omega)$. Ось скорости ω разбиваем на ряд участков (в данном случае на пять участков) до скорости установившегося значения и для каждого участка определяем $M_{дин} = M_{дв\,I} - M_{с\,I}$ в виде отрезков 1′, 2′, 3′, 4′, 5′. На оси абсцисс в масштабе μ_I откладываем пропорциональный моменту инерции $I_{пр}$ отрезок OA. Полученные на отдельных участках значения динамического момента откладываем от точки O вверх по оси ординат в виде отрезков $OB_1 = 1'$, $OB_2 = 2'$, $OB_3 = 3'$, $OB_4 = 4'$, $OB_5 = 5'$. Соединяем отмеченные на оси ординат точки B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 с точкой A. Про-

водим линии, параллельные оси абсцисс и ограничивающие каждый участок $M_{\text{дин }I}$.

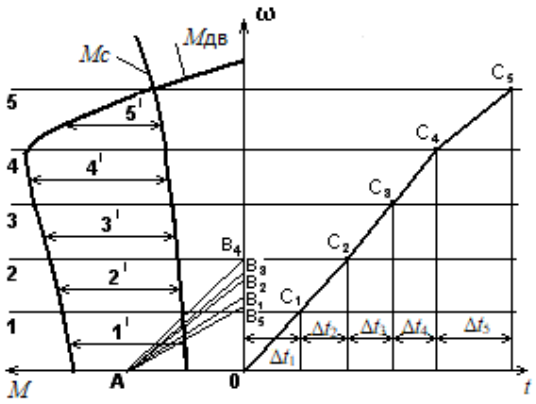


Рис. 10.3. Графический метод получения кривых переходного процесса

Затем из начала координат проводим линию OC_1, параллельную AB_1, до пересечения с горизонтальной линией, ограничивающую первый участок изменения скорости. Отрезок OC_1 представляет собой график скорости ω (t) на первом участке моментов. Проведя аналогичные построения для всех последующих участков $M_{\text{д }I}$ ($C_1C_2 \uparrow\uparrow AB_2$, $C_2C_3 \uparrow\uparrow AB_3$, $C_3C_4 \uparrow\uparrow AB_4$, $C_4C_5 \uparrow\uparrow AB_5$), строим кривую скорости двигателя и находим искомое время пуска привода. Масштаб времени t определяется из условия, что μ_i, μ_ω, μ_I известны, а масштаб времени – из условия (10.15), т. е.

$$\mu_t = \mu_I \frac{\mu_\omega}{\mu_{\text{м}}}. \qquad (10.16)$$

Кроме метода пропорции для построения кривой угловой скорости используется метод площадей, сводящийся к графоаналитическому интегрированному уравнению движения привода (рис. 10.4).

Задаем механические характеристики двигателя $M_{\text{дин}}$ и производственного механизма, совмещаем их и определяем момент $M_{\text{дин}} = M_{\text{дв }I} - M_{\text{с }I}$ для каждого участка. Предполагая, что для каждого участ-

ка $M_{дин}$ постоянный и равен среднему значению, перепад угловой скорости $\Delta\omega$ = const определяется временем на i-м участке:

$$\Delta t_i = I_{пр} \frac{\Delta\omega}{M_{дин\,i}}. \qquad (10.17)$$

Тогда общее время пуска определяется как

$$t = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta t_i, \qquad (10.18)$$

где n – число участков (в данном случае n = 5).

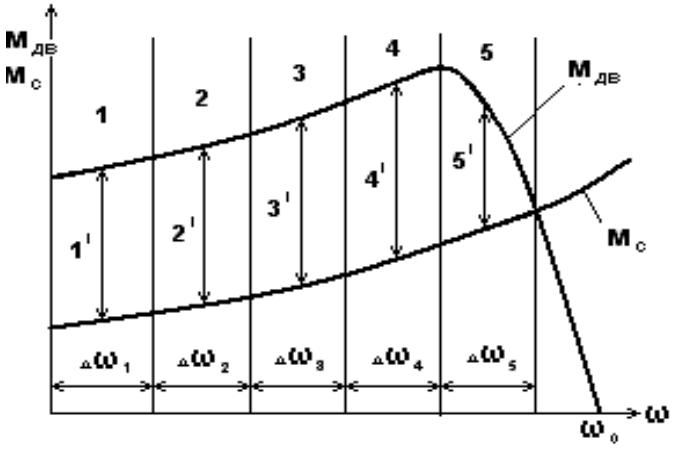


Рис. 10.4. Графоаналитический метод определения времени пуска привода вентилятора

Уменьшение потерь электроэнергии в переходных режимах позволяет улучшить энергетические показатели работы электропривода, облегчает тепловой режим двигателя.

Существуют два основных способа снижения потерь электроэнергии в переходных режимах: уменьшение инерции $I_{пр}$ и регулирование скорости идеального холостого хода ω_0.

Уменьшение момента инерции $I_{пр}$ возможно за счет малоинерционных применяемых электродвигателей, рационального конструирова-

ния механической передачи путем выбора оптимального передаточного числа, рациональных размеров и форм элементов механической передачи и замены одного двигателя двумя, имеющими половинную номинальную мощность заменяемого двигателя.

Регулирование скорости идеального холостого хода обеспечивается для асинхронных двигателей изменением частоты питающего напряжения или числа пар полюсов многоскоростного двигателя. Пуск асинхронного двигателя возможен двумя способами: включением обмотки статора на число пар полюсов P_1 при прямом пуске или включением обмотки статора вначале на число полюсов $P_2 = 2P_1$, а затем переключением обмотки статора на число полюсов P_1 при ступенчатом пуске. В общем случае при n ступеней регулирования скорости идеального холостого хода потери энергии в роторе уменьшатся в n раз:

$$\Delta A_2 = I_{\text{пр}} \frac{\omega_{0n}^2}{2n}, \qquad (10.19)$$

где ω_{0n} – максимальная скорость идеального холостого хода двигателя, соответствующая последней ступени.

Сокращаются потери в многоскоростном асинхронном двигателе и при ступенчатом торможении с высокой скоростью путем изменения числа пар полюсов с P_1 на $P_2 = 2P_1$, где на скорости ω_{02} двигатель тормозится с отдачей энергии в сеть, а затем путем изменения чередования фаз при том же числе пар полюсов осуществляется торможение противовключением.

Уменьшаются потери энергии и при пуске двигателя вхолостую, а остановка осуществляется под нагрузкой. При торможении с моментом сопротивления на валу двигателя время переходного процесса обратно пропорционально динамическому моменту, уменьшаются и потери энергии по сравнению с торможением вхолостую.

Рассмотрим один из методов экспериментального определения общего момента инерции и общего махового момента системы электропривода – метод свободного выбега.

Сущность этого метода состоит в следующем. Исследуемый агрегат, включающий в себя электродвигатель и механически соединенные с ним элементы, разгоняется до некоторой установившейся частоты вращения ω_0 в режиме холостого хода. После этого электродвигатель отключают от сети, и наступает процесс свободного выбега. Торможение происходит за счет внутренних сил трения.

На преодоление этих сил затрачивается кинетическая энергия A, запасенная во вращающихся частях агрегата:

$$A = \frac{J_{\text{общ}}\omega_0^2}{2}, \tag{10.20}$$

где $J_{\text{общ}}$ – общий момент инерции агрегата, кг · м^2;

ω_0 – угловая частота вращения холостого хода электродвигателя, рад/с.

С другой стороны, эта энергия может быть определена как произведение мощности, затраченной на приведение во вращение агрегата в режиме холостого хода $P_{\text{вр }0}$ на время свободного выбега t_0:

$$A = P_{\text{вр }0}t_0. \tag{10.21}$$

Приравняв выражения (10.20) и (10.21), получим выражение общего момента инерции для холостого хода:

$$J_{\text{общ}} = \frac{2P_{\text{вр }0}t_0}{\omega_0^2}. \tag{10.22}$$

По полученному значению момента инерции определяют маховый момент:

$$GD^2 = 4gJ_{\text{общ}} = \frac{8gP_{\text{вр }0}t_0}{\omega_0^2}, \tag{10.23}$$

где G – вес тела вращения, Н;

D – диаметр тела вращения, м;

g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения.

По опыту холостого хода и паспортным данным двигателя определяют $P_{\text{вр }0}$:

$$P_{\text{вр }0} = U_0I_0 - I_0^2R_{\text{я}} - U_{\text{щ}}I_0, \tag{10.24}$$

где U_0 – напряжение холостого хода, В;

I_0 – ток холостого хода, А;

$R_{\text{я}}$ = 30 Ом – сопротивление цепи якоря;

$U_{\text{щ}}$ = 2 В – падение напряжения на щетках.

По кривой выбега определяют t_0. Для этого проводят касательную к кривой выбега в точке ω_0. Пересечение касательной с осью времени t даст t_0.

10.2. Описание лабораторной установки

На универсальном стенде НТЦ-07.30 «Электропривод с сервоприводом» находятся: асинхронный двигатель (***M*4**) с фазным ротором с открытой схемой обмоток статора и двигатели постоянного тока (***M*1**, ***M*2** и ***M3***) с независимым возбуждением.

На данном стенде машины ***M*2** и ***M*3** включены в режиме «генератор – двигатель», асинхронный двигатель ***M*4** является гонным для машины ***M*3**, двигатель ***M1*** является гонным для машины ***M*2**.

Возбуждение машин постоянного тока регулируется широтно-импульсными преобразователями ШИП-1, ШИП-2, ШИП-3, управляемыми с помощью переменных резисторов *R*300, *R*301, *R*302.

Напряжение на якоре двигателя ***M*1** регулируется ШИП с помощью резистора *R*201.

Питание асинхронного двигателя ***M*4** осуществляется от инвертора, позволяющего изменять частоту (резистор *R*402) и амплитуду трехфазного напряжения (резистор *R*401).

Контроль частоты вращения машин ***M*1** и ***M*2** осуществляется измерителем *BR*1, машин ***M*3** и ***M*4** – измерителем *BR*2 (рис. 10.5).

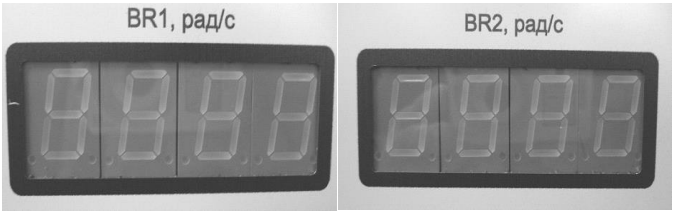


Рис. 10.5. Измерительные приборы для контроля частоты вращения машин

Сервопривод тумблер *SA*1 задает один из двух возможных режимом работы сервопривода.

1. *Программирование*. В этом режиме сервопривод после нажатия кнопки *SB*1 «Пуск» отрабатывает угол, заданный датчиком положения *A*1.

2. *Следящий.* В этом режиме сервопривод постоянно следит за датчиком положения *A*1.

Задание положения индицируется на левом индикаторе. Обратная связь от датчика скорости, установленного на машине ***M*1**, индицируется на правом индикаторе. Задание положения производится датчиком положения *A*1. При медленном вращении датчика *A*1 угол задания

изменяется по единицам. При быстром вращении датчика положения *A*1 угол задания изменяется по десяткам.

Программирование регуляторов. В сервоприводе используется ПИД-регулятор. *Для изменения коэффициентов регулятора нужно нажать и удерживать в нажатом состоянии датчик положения A1.*

При этом на левом индикаторе высветится составляющая регулятора, а на правом – его значение:

P_r – пропорциональная составляющая в пределах 0,0…25,5. ***По умолчанию – 20,0***;

P_i – интегральная составляющая в пределах 0,0…25,5. ***По умолчанию – 5,0***;

P_d – дифференциальная составляющая в пределах 0,0…25,5. ***По умолчанию – 2,0***;

U_p – ограничение выходного значения регулятора. Соответствует максимальному выходному напряжению ШИП. ***По умолчанию – 80***;

d_{ir} – направление обратной связи регулятора. ***По умолчанию – 1***;

reg – тип регулятора (0-ПИД-регулятор; 1-Полиномиальный). ***Должен быть 0.***

Для перехода между составляющими нужно нажимать датчик *A*1.

Для выхода из режима программирования нужно нажать и удерживать в нажатом состоянии датчик положения A1.

10.3. Порядок выполнения работы

Внимание! *Перед включением стенда необходимо:*

- убедиться в том, что все тумблеры находятся в нижнем положении и все переменные резисторы установлены в крайнее левое положение;

- с помощью перемычек собрать схему подключения якоря электродвигателя M1 (рис. 10.6);

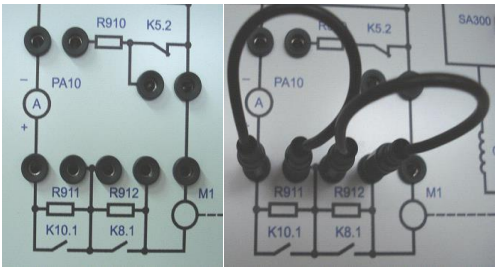


Рис. 10.6. Схема подключения на стенде НТЦ-07.30 якоря электродвигателя *M*1

- с помощью перемычек собрать схему подключения сигнала задания ШИП (рис. 10.7).

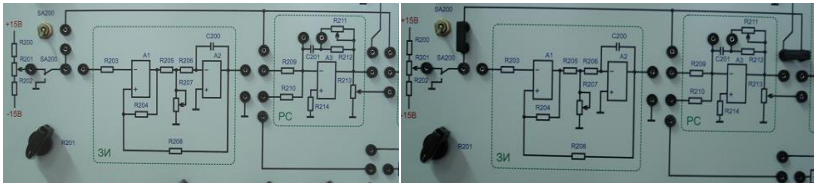


Рис. 10.7. Схема подключения на стенде НТЦ-07.30 сигнала задания ШИП

10.3.1. Определение момента инерции электромашинного агрегата *М*1-*М*2

1. Подключить стенд к сети с помощью автоматического выключателя *QF*1 «Сеть» (рис. 10.8);

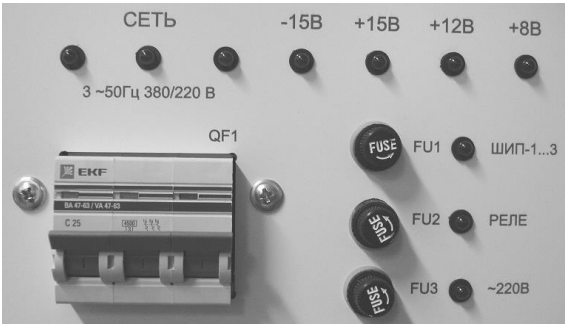


Рис. 10.8. Автоматический выключатель *QF*1 «Сеть» стенда НТЦ-07.30

2. Включить ШИП-1 тумблером *SA*300 и по прибору *PA*1, с помощью резистора *R*300, установить ток возбуждения двигателя ***М*1** равным **160 мА.**

3. Установить *R*201 в среднее положение.

4. Включить питание тумблером *SA*700.

5. Включить тумблер *SA*200.

6. Включить ШИП-1 тумблером *SA*100.

7. Кнопкой *SB*704 подключить якорь ***М*1** к ШИП-1.

8. Плавно вращая *R*201 против или по часовой стрелке, установить частоту вращения ***M*1** равной **300 рад/с**.

9. Измерить ток холостого хода I_0 (показания прибора *PA*10) и напряжение U_0 (показания прибора *PV*10).

Данные занести в табл. 10.1.

Таблица 10.1. **Результаты холостого хода электромашинного агрегата *M*1-*M*2**

Данные опыта		Результаты вычислений			
***PV*10**	***PA*10**	U_0I_0, Вт	$I_0^2R_я$, Вт	$U_щI_0$, Вт	$P_{вр\,0}$, Вт
U_0, В	I_0, А				

10. Одновременно нажать кнопки *SB*703 и «Пуск» секундомера (рис. 10.9).

Далее, следя за частотой вращения ***M*1** (прибор *BR*1), по возможности равномерно нажать кнопку «Пуск» секундомера (рис. 10.9) еще до 9 раз, занося значения частоты вращения и времени в память секундомера.

11. Нажать кнопку «Стоп» секундомера и с помощью кнопок прокрутки «↑» и «↓» на панели управления секундомером (рис. 10.9) извлечь из памяти значения ω и *t*.



Рис. 10.9. Общий вид секундомера на стенде

Данные занести в табл. 10.2.

Таблица 10.2. **Результаты свободного выбега электромашинного агрегата *М*1-*М*2**

№ опыта	Данные опыта		Данные вычислений	
	*BR*1	*t*	Момент инерции	Маховый момент
	ω, рад/с	*t*, с	$J_{общ}$, кг · м^2	GD^2, Н · м^2
1				
2				
…				
10				

12. Резистор *R*201 установить в среднее положение.

10.3.2. Определение момента инерции электромашинного агрегата *М*3-*М*4

1. Кнопкой «Выбор» установить секундомер в режим измерения времени и нажать кнопку «Сброс» (см. рис. 10.9).

2. Включить тумблерами *SA*301, *SA*302 соответственно ШИП-2 и ШИП-3, далее резисторами *R*301, *R*302 установить ток возбуждения машин ***М*2** и ***М*3** равным **160 мА** (приборы *PA*2, *PA*3).

3. Включить тумблер *SA*1.

4. Кнопкой *SB*704 подключить якорь ***М*1** к ШИП-1.

5. Плавно поворачивая *R*201 по или против часовой стрелки, разогнать ***М*3** до частоты вращения **300 рад/с**.

6. Измерить напряжение U_0 и ток I_0 (приборы *PV*2, *PA*4) двигателя ***М*3**. Данные занести в табл. 10.3.

Таблица 10.3. **Результаты холостого хода электромашинного агрегата *М*3-*М*4**

Данные опыта		Результаты вычислений			
*PV*2	*PA*4	U_0I_0, Вт	$I_0^2R_я$, Вт	$U_щI_0$, Вт	$P_{вр\,0}$, Вт
U_0, В	I_0, А				

7. Разомкнуть *SA*1 и одновременно нажать «Пуск» секундомера.

Далее, следя за частотой вращения ***М*3** (прибор *BR*2), по возможности равномерно нажать кнопку «Пуск» секундомера (см. рис. 10.9) еще 9 раз, занося значения частоты вращения и времени в память секундомера.

8. Отключить двигатель ***М*1** от ШИП-1 кнопкой *SB*703.

9. Отключить тумблеры *SA*300, *SA*301, *SA*302.

10. Тумблером *SA*100 отключить ШИП.

11. Нажать кнопку «Стоп» секундомера и с помощью кнопок прокрутки «↑» и «↓» (см. рис. 10.9) на панели управления секундомером извлечь из памяти значения ω и *t*. Данные занести в табл. 10.4.

Таблица 10.4. **Результаты свободного выбега электромашинного агрегата *М*3-*М*4**

№ опыта	Данные опыта		Данные вычислений	
	*BR*2	*t*	Момент инерции	Маховый момент
	ω, рад/с	*t*, с	$J_{общ}$, кг · м^2	GD^2, Н · м^2
1				
2				
…				
10				

Порядок завершения работы:

- выключить тумблеры *SA*200, *SA*700;
- выключить автоматический выключатель *QF*1 (см. рис. 10.8);
- изъять установленные на панели перемычки.

По результатам полученных данных рассчитать потери холостого хода $P_{вр\,0}$ и построить кривые свободного выбега $\omega = f(t)$.

Рассчитать момент инерции и маховый момент электромашинных агрегатов. Оценить моменты инерции электромашинных агрегатов, используя габаритные размеры маховиков и паспортные данные двигателей. Плотность железа принять равной 7 800 кг/м^3. Сравнить результаты. Сделать аргументированные выводы.

Контрольные вопросы

1. На какие свойства электропривода влияет величина момента инерции и махового момента?
2. Что такое маховый момент и какова его зависимость от момента инерции?
3. На чем основан метод свободного выбега для определения момента инерции?
4. Что представляет собой кривая выбега и каков порядок снятия данных для ее построения?
5. Как изменится время выбега агрегата, если на валу двигателя установить маховик?

Лабораторная работа 11.
ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы:

1. Изучить конструкцию и принцип действия двигателя постоянного тока.

2. Освоить приемы снятия характеристики холостого хода и рабочих характеристик.

3. Снять и построить рабочие характеристики двигателя постоянного тока.

Объект и средства исследования. Лабораторная работа выполняется на стенде НТЦ-23 «Электрические машины».

Объектом исследования является машина постоянного тока типа 2ПН90LУХЛ4 с номинальными параметрами: номинальная мощность $P_{\text{м. ном}} = 0{,}55$ кВт, номинальное напряжение $U_{\text{м. ном}} = 220$ В, номинальная сила тока $I_{\text{м. ном}} = 3{,}32$ А, номинальная частота вращения $n_{\text{м. ном}} = 1\,500$ об/мин.

Средствами исследования служат:

- для создания механической нагрузки на валу – трехфазный асинхронный короткозамкнутый электродвигатель типа АИР71В6У3, работающий в режиме генератора. Номинальные параметры: схема соединения обмоток – Δ/Y, напряжение $U_{\text{ном}} = 220/380$ В, сила тока $I_{\text{ном}} = 3{,}1/1{,}8$ А, номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 0{,}55$ кВт, номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 920$ об/мин, номинальный коэффициент полезного действия $\eta_{\text{ном}} = 69$ %, номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0{,}68$;

- инвертор на базе силового модуля Mitsubishi ASIPM PS11035, предназначенный для создания симметричной трехфазной сети с плавным регулированием частоты и напряжения (номинальная мощность – 1,5 кВт, номинальный ток – 7 А, диапазон задания линейного напряжения – 0…220 В с дискретностью 1 В, диапазон задания частоты тока – 0…163 Гц с дискретностью 0,63 Гц);

- широтно-импульсные преобразователи ШИП1, ШИП2 и ШИП3, в состав которых входят: интеллектуальный силовой модуль ASIPM Mitsubishi PS11035, полевой транзистор IRF840 (для питания обмотки возбуждения ДПТ), микроконтроллер ATMega16, шунты для измерения токов с платами гальванической развязки на основе изолирующего усилителя HCPL-788J;

- цифровые измерительные приборы, входящие в состав стенда, с номинальным напряжением 500 В и номинальным током 5 А.

11.1. Основные теоретические сведения

Классификация двигателей постоянного тока производится по способу их возбуждения – соответственно с независимым, параллельным, последовательным или смешанным возбуждением.

У двигателей с параллельным возбуждением обмотка возбуждения получает питание от независимого источника, что позволяет в широких пределах регулировать магнитный поток возбуждения и в результате – момент на валу двигателя.

У двигателей с параллельным возбуждением обмотка возбуждения получает питание от того же источника, что и якорь. Ток возбуждения можно регулировать с помощью сопротивления (реостата), включенного последовательно с обмоткой возбуждения.

Согласно ГОСТ 183-74 для машин постоянного тока принято следующее обозначение выводов обмоток: обмотки якоря – Я1-Я2, независимой обмотки возбуждения – Н1-Н2, параллельной обмотки возбуждения – Ш1-Ш2, последовательной обмотки возбуждения – С1-С2, обмотки дополнительных полюсов – Д1-Д2, компенсационной обмотки – К1-К2. Цифра 1 обозначает начало, а цифра 2 – конец соответствующей обмотки.

По конструктивному выполнению машина постоянного тока с параллельным возбуждением подобна машине с независимым возбуждением, у которой обмотка якоря расположена на роторе, а обмотка возбуждения – на статоре.

Основные соотношения, характеризующие работу двигателя постоянного тока, можно представить в виде приведенных ниже уравнений. Эти уравнения справедливы для всех генераторов независимо от способа их возбуждения.

ЭДС якоря (противо-ЭДС) пропорциональна магнитному потоку обмотки возбуждения и току якоря:

$$E_{я} = C_E n \Phi, \tag{11.1}$$

где C_E – конструктивная постоянная машины;

n – частота вращения якоря, об/мин;

Ф – магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, Вб.

$$C_E = \frac{pN}{30 \cdot 2a}, \tag{11.2}$$

где p – число полюсов;

N – общее число проводников в обмотке якоря;

$2a$ – число параллельных ветвей в обмотке якоря.

Напряжение питания двигателя

$$U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}}\Sigma R_{\text{я}} + \Delta U_{\text{щ}}, \tag{11.3}$$

где $I_{\text{я}}\Sigma R_{\text{я}}$ – падения напряжения в обмотках якоря;

$\Delta U_{\text{щ}}$ – падения напряжения в щеточном контакте.

Сопротивление $\Sigma R_{\text{я}}$ включает в себя сопротивления обмотки якоря и всех последовательно соединенных с ней обмоток:

$$\Sigma R_{\text{я}} = R_{\text{я}} + R_{\text{д}} + R_{\text{с}} + R_{\text{к}}, \tag{11.4}$$

где $R_{\text{я}}$, $R_{\text{д}}$, $R_{\text{с}}$, $R_{\text{к}}$ – сопротивления обмоток якоря, дополнительных полюсов, последовательной (сериесной) и компенсационной обмоток соответственно (часть сопротивлений у конкретного типа двигателей может отсутствовать).

Для приближенных расчетов используется упрощенное уравнение

$$U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{щ}}), \tag{11.5}$$

где $R_{\text{щ}}$ – переходное сопротивление щеточного контакта, которое приближенно принимается постоянным и равным:

$$R_{\text{щ}} = \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{I_{\text{я. ном}}}. \tag{11.6}$$

Ток якоря двигателя (А)

$$I_{\text{я}} = \frac{M}{C_{\text{м}}\Phi}, \tag{11.7}$$

где M – момент на валу двигателя, Н · м;

$C_{\text{м}}$ – конструктивная постоянная момента машины.

$$C_{\text{м}} = \frac{pN}{2\pi a}. \tag{11.8}$$

Частота вращения двигателя (об/мин)

$$n = \frac{E_{\text{я}}}{C_E\Phi} \approx \frac{U - I_{\text{я}}R_{\text{я}}}{C_E\Phi}. \tag{11.9}$$

Из последней формулы следует, что частоту вращения якоря можно регулировать магнитным потоком Ф, создаваемым обмоткой возбуждения, изменяя напряжение питания якоря U либо изменяя сопротивление в цепи якоря $R_я$. Наибольшее распространение получил первый способ.

Механическая характеристика двигателя постоянного тока с независимым или параллельным возбуждением называется жесткой, так как при увеличении момента сопротивления на валу до номинального значения частота вращения n уменьшается незначительно – на 1…2 %.

Рабочие характеристики отражают зависимость основных величин – тока якоря $I_я$, частоты вращения n, момента на валу M, коэффициента полезного действия η – от механической мощности на валу $P_{мех}$.

11.2. Порядок выполнения работы

1. Пользуясь схемой (рис. 11.1), изучить расположение используемых узлов и органов управления на панели лабораторного стенда (рис. 11.2).

2. Все переключатели стенда установить в положение «Выключено», регулировочные рукоятки перевести в положение, соответствующее нулевому значению напряжения или тока (против часовой стрелки до упора).

3. Собрать электрическую цепь (см. рис. 5.2) с помощью соединительных проводников. Установить переключатель *PV*2/*PW*2 в положение «*PW*2».

4. Включить автоматический выключатель «Сеть» и выключатель *SA*2. Переключателем *SA*2 зашунтировать катушки *L*1…*L*3 в цепи питания асинхронного двигателя, переключателем *SA*3 включить схему соединения его обмоток в «треугольник».

5. Установить режим работы инвертора «U / f = const». Задать частоту тока $f = 0$.

6. Включить в работу электродвигатель постоянного тока кнопкой *SB*1. Увеличивая частоту тока регулятором «Задание частоты» инвертора, разогнать двигатель до угловой скорости $\omega = 157$ рад/с (контролировать по прибору *BR*1). Выключить инвертор.

7. Установить режимы работы ШИП1 «Двигательный режим», «Отключить замкнутую СУ». Вывести регулятор «Задание тока» в крайнее левое положение. Включить ШИП1 и регулятором «Задание тока» ШИП1 разогнать исследуемый двигатель постоянного тока до угловой скорости $\omega = 157$ рад/с.

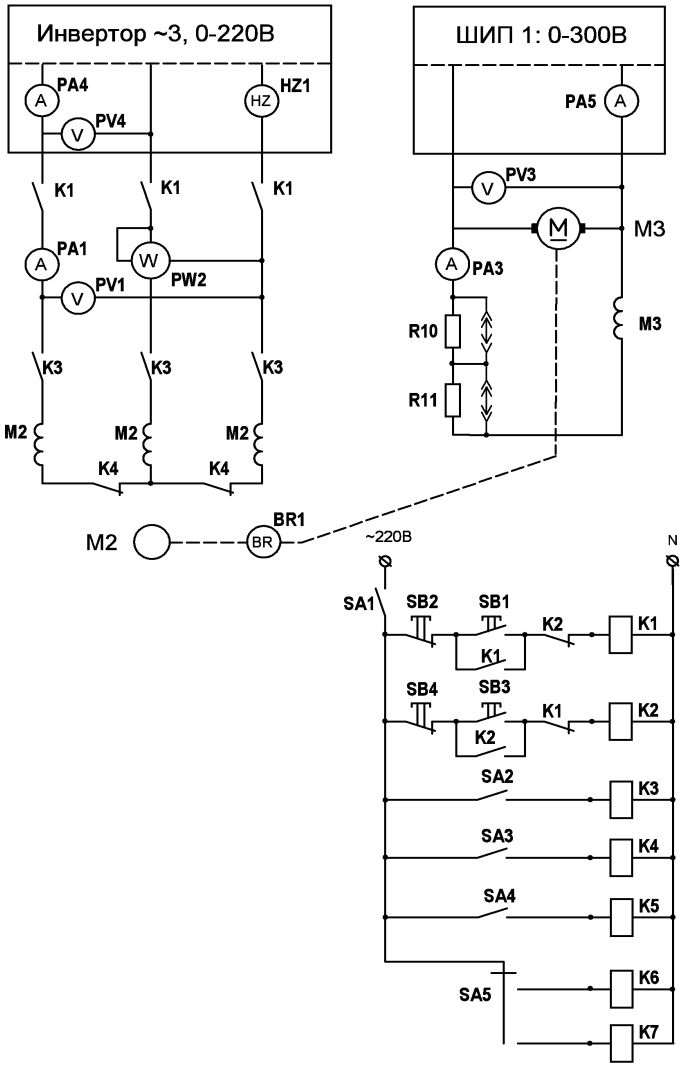


Рис. 11.1. Электрическая схема исследования двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

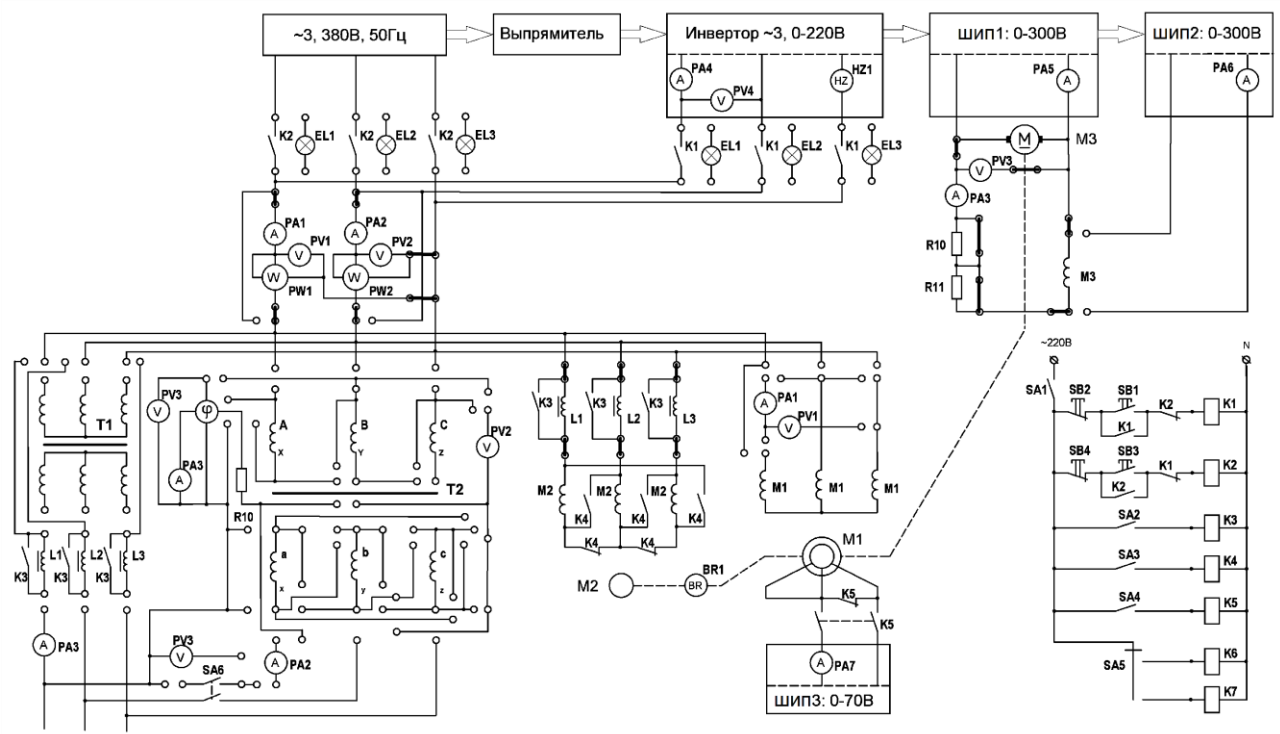


Рис. 11.2. Схема подключения на панели стенда для испытания двигателя постоянного тока

8. Включить инвертор и подобрать такое положение регуляторов «Задание тока» ШИП1 и «Задание частоты» инвертора, чтобы при угловой скорости ω = 157 рад/с ток якоря был равным нулю.

9. Уменьшая частоту инвертора регулятором «Задание частоты» (контролировать по прибору *BR*1), снять внешнюю характеристику двигателя постоянного тока. Результаты измерений записать в табл. 11.1.

10. Снять внешнюю характеристику двигателя при других значениях тока возбуждения $I_в$, для чего необходимо последовательно снять перемычки, шунтирующие резисторы *R*10 и *R*11, и повторить пп. 8, 9, записывая результаты измерений соответственно в строки 6…10 и 11…15 табл. 11.1.

Таблица 11.1. **Внешняя характеристика двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением**

№ п/п	Измерения					Вычисления					
	$I_м$, А	$I_в$, А	$U_я$, В	ω, рад/с	P', Вт	n, об/мин	P_1, Вт	$I_я$, А	M, Н · м	P_2, Вт	η, %
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											

11. По результатам измерений рассчитать величины, необходимые для построения механической и рабочих характеристик двигателя.

Скорость вращения ротора (об/мин) определяется по формуле

$$n = 30\omega / \pi. \qquad (11.10)$$

Сила тока якоря вычисляется следующим образом:

$$I_я = I_м - I_в. \qquad (11.11)$$

Активную мощность электродвигателя постоянного тока, работающего в режиме генератора (Вт), можно найти по формуле

$$P_1 = \sqrt{3}P'. \qquad (11.12)$$

Механическая мощность на валу определяется по параметрам работы электродвигателя постоянного тока, работающего в режиме генератора, по формуле

$$P_{мех} \approx 3P_1\eta_{АД\ ном}, \qquad (11.13)$$

где $\eta_{АД\ ном}$ – КПД асинхронного электродвигателя, зависящий от степени его загрузки по активной мощности $P_1 / P_{1ном}$ (рис. 11.3):

$$P_{1ном} = P_{ном} / \eta_{ном} = 550 / 0{,}69 = 797 \text{ Вт}. \qquad (11.14)$$

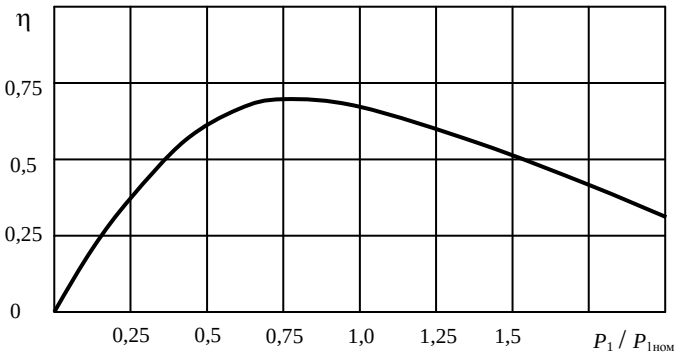


Рис. 11.3. Зависимость КПД машины постоянного тока от степени ее загрузки

Момент на валу двигателя рассчитывается следующим образом:

$$M = \frac{9{,}55P_{мех}}{n}. \qquad (11.15)$$

Коэффициент полезного действия двигателя постоянного тока определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{I_{\text{м}} U_{\text{я}}} 100. \qquad (11.16)$$

12. По результатам опыта построить:

1) механические характеристики двигателя постоянного тока $n = f(M)$ при различных значениях тока возбуждения $I_{\text{в}}$;

2) рабочие характеристики двигателя – в одной системе координат зависимости $I_{\text{я}}$, n, M, $\eta = f(P_{\text{мех}})$.

Контрольные вопросы

1. Каковы устройство и принцип действия машины постоянного тока?
2. Перечислите способы возбуждения двигателей постоянного тока.
3. Перечислите способы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока.
4. Что называют механической характеристикой двигателя?
5. Почему механическая характеристика двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением называется жесткой?
6. Как влияет величина тока возбуждения на момент и частоту вращения двигателя?
7. Чем искусственная механическая характеристика отличается от естественной?
8. От чего зависит сопротивление цепи якоря?
9. Укажите обозначение выводов обмоток двигателей постоянного тока.

Лабораторная работа 12.
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель работы:

1. Изучить устройство синхронного генератора.
2. Экспериментально определить основные характеристики синхронного генератора.

Объект и средства исследования. Лабораторная работа выполняется на стенде НТЦ-23 «Электрические машины».

Объектом исследования является синхронный генератор (машина М1), в качестве которого используется трехфазный асинхронный электродвигатель с фазным ротором типа МТН011-6У1. Номинальные параметры электродвигателя: схема соединения обмоток статора – Δ/Y, номинальное напряжение $U_{ном}$ = 220/380 В, номинальная сила тока $I_{ном}$ = 8,5/4,9 А, номинальная мощность $P_{ном}$ = 1,4 кВт, номинальная частота вращения $n_{ном}$ = 890 об/мин, номинальное напряжение ротора – 114 В, номинальный ток ротора – 8,8 А, номинальный режим работы – *S*3 при повторности нагрузки 40 %.

Средствами исследования служат:

- инвертор на базе силового модуля Mitsubishi ASIPM PS11035, предназначенный для создания симметричной трехфазной сети с плавным регулированием частоты и напряжения (номинальная мощность – 1,5 кВт, номинальный ток – 7 А, диапазон задания линейного напряжения – 0…220 В с дискретностью 1 В, диапазон задания частоты тока – 0…163 Гц с дискретностью 0,63 Гц);

- широтно-импульсные преобразователи ШИП1, ШИП2 и ШИП3, в состав которых входят: интеллектуальный силовой модуль ASIPM Mitsubishi PS11035, полевой транзистор IRF840 (для питания обмотки возбуждения ДПТ), микроконтроллер ATMega16, шунты для измерения токов с платами гальванической развязки на основе изолирующего усилителя HCPL-788J;

- машина постоянного тока типа 2ПН90LУХЛ4, предназначенная для привода генератора, с номинальными параметрами: номинальная мощность $P_{м.\ ном}$ = 0,55 кВт, номинальное напряжение $U_{м.\ ном}$ = 220 В, номинальная сила тока $I_{м.\ ном}$ = 3,32 А, номинальная частота вращения $n_{м.\ ном}$ = 1 500 об/мин;

- цифровые измерительные приборы, входящие в состав стенда, с номинальным напряжением 500 В и номинальным током 5 А.

12.1. Основные теоретические сведения

Синхронная машина (рис. 12.1) представляет собой машину переменного тока, по своему устройству отличающуюся от асинхронных машин только конструкцией ротора, который может быть явнополюсным или неявнополюсным. Важные отличия:

1) скорость вращения ротора синхронной машины равна скорости вращения магнитного поля статора при любой нагрузке ($n_2 = n_1 =$ = const);

2) возможность регулирования коэффициента мощности.

Синхронные машины обратимы и могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Синхронные генераторы составляют основу электротехнического оборудования электростанций, так как практически вся электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами. В крупных электроэнергетических установках синхронные машины иногда используются в качестве компенсаторов – генераторов реактивной мощности, позволяющих повысить коэффициент мощности всей установки.

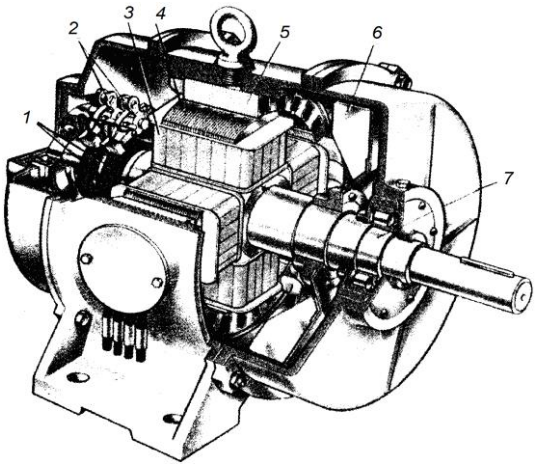


Рис. 12.1. Устройство синхронного генератора: *1* – контактные кольца; *2* – щеткодержатели; *3* – полюсная катушка ротора; *4* – полюсный наконечник; *5* – сердечник статора; *6* – вентилятор; *7* – вал

Синхронная машина состоит из неподвижного статора и вращающегося ротора. Статор синхронной машины состоит из корпуса, сердечника и трехфазной обмотки, соединенной по схеме «звезда».

Роторы синхронных машин могут иметь две принципиально различающиеся конструкции – явнополюсную и неявнополюсную.

Если первичным двигателем является гидравлическая турбина, то синхронный генератор называют гидрогенератором. Гидравлическая

турбина обычно развивает небольшую частоту вращения (60…500 об/мин), поэтому для получения переменного тока промышленной частоты (50 Гц) в гидрогенераторе применяют ротор с большим числом полюсов. Ротор гидрогенератора имеет явнополюсную конструкцию, при которой каждый полюс выполняют в виде отдельного узла, состоящего из сердечника, полюсного наконечника и полюсной катушки. Все полюсы ротора закреплены на ободе, являющемся также и ярмом магнитной системы машины. Гидрогенераторы обычно изготовляют с вертикальным расположением вала.

Турбогенератор является быстроходной синхронной машиной, так как его первичный двигатель – паровая турбина – работает при большой скорости вращения. Роторы этих генераторов выполняют двухполюсными (n_1 = 3 000 об/мин) либо четырехполюсными (n_1 = 1 500 об/мин).

При работе турбогенератора на его ротор действуют значительные центробежные силы. Поэтому по условиям механической прочности в турбогенераторах применяют неявнополюсный ротор, имеющий вид удлиненного стального цилиндра с профрезерованными на поверхности продольными пазами для обмотки возбуждения. Обмотка возбуждения неявнополюсного ротора занимает лишь две трети его поверхности по периметру, оставшаяся поверхность образует полюсы. Для защиты лобовых частей обмотки ротора от разрушения действием центробежных сил ротор с двух сторон прикрывают стальными бандажными кольцами (каппами), изготовляемыми обычно из немагнитной стали. Турбогенераторы и дизель-генераторы изготовляют с горизонтальным расположением вала.

Дизель-генераторы рассчитывают на частоту вращения 600…1 500 об/мин и выполняют с явнополюсным ротором. Сердечник статора, запрессованный в стальной корпус, состоит из пакетов-сегментов, собранных из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Для лучшего охлаждения двигателя пакеты разделены радиальными вентиляционными каналами шириной по 10 мм. Обмотка статора двухслойная с укороченным шагом.

Сердечники полюсов ротора крепятся к корпусу шпильками. Обмотка ротора состоит из полюсных катушек. Контактные кольца крепятся на конце вала. Подшипники скольжения установлены на подшипниковых щитах. В обшивке корпуса имеются вентиляционные окна, прикрытые жалюзи. Наружное охлаждение обеспечивается лопатками центробежного вентилятора, закрепленными на валу. На боковой поверхности корпуса расположена коробка выводов.

Между ротором и статором имеется воздушный зазор, который по оси полюса имеет минимальное значение, а на краях – максимальное. Такая форма полюсного наконечника необходима для синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре.

Основным способом возбуждения синхронных машин является электромагнитное возбуждение.

В современных синхронных генераторах получила применение бесконтактная система электромагнитного возбуждения, при которой синхронный генератор не имеет контактных колец на роторе. Отсутствие скользящих контактов в цепи возбуждения синхронной машины позволяет повысить ее эксплуатационную надежность и увеличить КПД.

В синхронных генераторах, в том числе гидрогенераторах, получил распространение принцип самовозбуждения, когда энергия переменного тока, необходимая для возбуждения, отбирается от обмотки статора синхронного генератора и через понижающий трансформатор и выпрямительный полупроводниковый преобразователь преобразуется в энергию постоянного тока. Принцип самовозбуждения основан на том, что первоначальное возбуждение генератора происходит за счет остаточного магнетизма магнитопровода машины, так как ротор не перемагничивается и по его сердечнику замыкается постоянный поток возбуждения.

В синхронных машинах малой мощности находит применение принцип возбуждения постоянными магнитами, когда на роторе машины располагаются постоянные магниты. Такой способ возбуждения дает возможность избавить машину от обмотки возбуждения. В результате конструкция машины упрощается, становится более экономичной и надежной. Однако из-за дефицитности материалов для изготовления постоянных магнитов с большим запасом магнитной энергии и сложности их обработки применение возбуждения постоянными магнитами ограничивается лишь машинами мощностью не более нескольких киловатт.

Основными характеристиками синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку, являются характеристики: холостого хода, короткого замыкания, внешняя, регулировочная и нагрузочная.

Характеристику холостого хода снимают при постоянной номинальной скорости вращения ротора в функции тока возбуждения $E = U = f(I_в)$ (рис. 12.2). При увеличении тока возбуждения от нуля ЭДС и магнитный поток сначала изменяются по линейному закону, а затем

из-за насыщения магнитной цепи – по нелинейному. При больших насыщениях характеристика холостого хода снова становится линейной.

По характеристике холостого хода определяют коэффициент насыщения:

$$k_{\text{нс}} = \frac{ac}{ab}.$$

Отрезок *bc* определяет МДС, приходящуюся на стальные участки магнитной системы. Если машина ненасыщенная, то характеристика холостого хода линейная. Чтобы обеспечить лучшее использование материалов, при проектировании рабочая точка *c* выбирается на изгибе характеристики холостого хода (рис. 12.2).

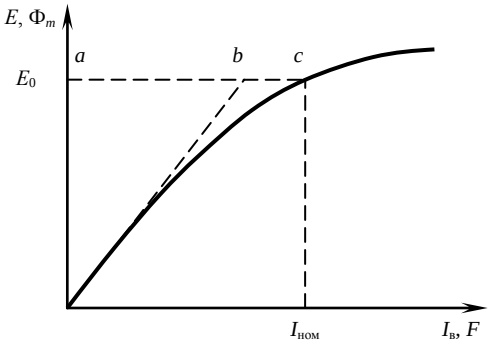


Рис. 12.2. Характеристика холостого хода синхронного генератора

При холостом ходе генератора ток в обмотке статора равен нулю. Поле в воздушном зазоре создается током возбуждения $I_{\text{в}}$, протекающим в обмотке возбуждения, и при вращении ротора в обмотке статора наводится ЭДС (В):

$$E_0 = 4{,}44 k_{\text{в}} k_{\text{об}} \Phi_m f_1 w_1, \qquad (12.1)$$

где $k_{\text{в}}$ – коэффициент, зависящий от насыщения магнитной цепи и формы воздушного зазора;

$k_{\text{об}}$ – обмоточный коэффициент;

Φ_m – амплитуда магнитного потока, создаваемого в воздушном зазоре, Вб;

f_1 – частота тока статора;

w_1 – число витков в обмотке фазы статора.

При исследовании характеристики холостого хода сначала строят восходящую ветвь при увеличении тока возбуждения, а затем при уменьшении – нисходящую. При расчетах используется средняя кривая.

Внешней характеристикой синхронного генератора называется зависимость $U = f\ (I_н)$ при n = const, cos φ = const, установленная при неизменном токе возбуждения $I_в$ = const (рис. 12.3).

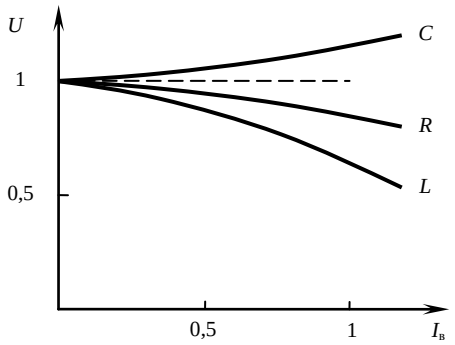


Рис. 12.3. Внешние характеристики синхронного генератора при разных видах нагрузки

При увеличении тока активной нагрузки напряжение на выходе генератора уменьшается вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении машины и влияния поперечной реакции статора.

При индуктивной нагрузке за счет более сильного размагничивающего действия продольной реакции статора внешняя характеристика идет ниже внешней характеристики при активной нагрузке.

При емкостной нагрузке реакция статора подмагничивающая, поэтому с ростом нагрузки растет напряжение на выводах генератора.

Номинальным изменением напряжения синхронного генератора $\Delta U_{ном}$ называется изменение напряжения при изменении нагрузки от нуля до номинальной при неизменном токе возбуждения.

Номинальное изменение напряжения определяется по формуле

$$\Delta U_{ном} = \frac{E_0 - U_{ном}}{U_{ном}} 100, \qquad (12.2)$$

где E_0 – ЭДС холостого хода генератора при токе возбуждения $I_в$ (определяется по характеристике холостого хода).

Регулировочная характеристика синхронного генератора представляет собой зависимость тока возбуждения от тока статора $I_в = f(I_н)$ при постоянном напряжении $U = \text{const}$, постоянной скорости вращения $n = \text{const}$ и неизменном cos φ нагрузки.

Регулировочная характеристика показывает, как нужно изменять ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение на выводах генератора оставалось постоянным (рис. 12.4).

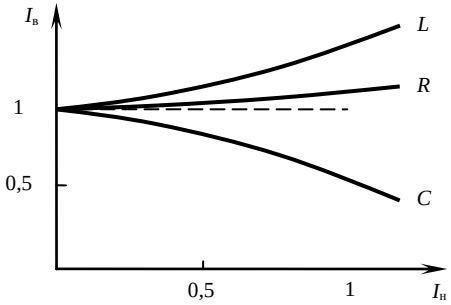


Рис. 12.4. Регулировочные характеристики синхронного генератора при различных видах нагрузки

Регулировочная характеристика может быть построена, если известна внешняя характеристика $U = f(I_н)$. При увеличении индуктивной нагрузки напряжение уменьшается. Чтобы напряжение оставалось неизменным, надо увеличивать ток возбуждения. Если нагрузка имеет емкостный характер, то при увеличении тока в статоре машины напряжение U на выводах генератора растет. Чтобы оно оставалось неизменным, надо уменьшать ток возбуждения $I_в$.

Так же как и внешние характеристики, регулировочные характеристики при небольших нагрузках линейны. При нагрузках, близких к номинальному значению, из-за насыщения регулировочные характеристики становятся нелинейными.

Нагрузочная характеристика синхронного генератора представляет собой зависимость напряжения на генераторе от тока возбуждения $U = f(I_в)$ при постоянных значениях тока статора $I = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$ нагрузки и скорости вращения $n = \text{const}$.

12.2. Порядок выполнения работы

1. Получение характеристики холостого хода генератора:

1.1. Пользуясь схемами (рис. 12.5, 12.6), изучить расположение используемых узлов и органов управления на панели лабораторного стенда.

1.2. Все переключатели стенда установить в положение «Выключено», регулировочные рукоятки перевести в положение, соответствующее нулевому значению напряжения или тока (против часовой стрелки до упора).

1.3. Собрать электрическую цепь (рис. 12.5) с помощью соединительных проводников.

1.4. Включить автоматический выключатель «Сеть» и выключатель *SA*1.

1.5. Переключателем *SA*4 подключить обмотку возбуждения машины *M*1 к источнику постоянного тока (ШИП3). Регулятором «Задание тока» ШИП3 установить значение тока возбуждения $I_в = 0$ (контролировать по прибору *PA*7).

1.6. Включить ШИП2 и установить регулятором «Задание тока» ток 0,4 А в обмотке возбуждения машины *M*3 (контролировать по прибору *PA*6).

1.7. Установить режимы работы ШИП1 «Задание скорости» и «Включить замкнутую СУ», затем включить ШИП1. Регулятором «Задание скорости» ШИП1 установить синхронную скорость вращения ротора машины *M*1 $\omega = 104$ рад/с (контролировать по прибору *BR*1).

1.8. Регулятором «Задание тока» ШИП3 увеличивать ток возбуждения машины *M*1 до значения, при котором ЭДС холостого хода $E_0 = 1{,}3U_{ном}$ (контролировать по прибору *PV*1), а затем постепенно уменьшать ток возбуждения машины *M*1 до нуля (контролировать по прибору *PA*7).

1.9. Измерить ЭДС синхронного генератора (машины *M*1) при пяти значениях тока возбуждения $I_в$ (при намагничивании и размагничивании). Результаты измерений записать в табл. 12.1.

Внимание! *При снятии данных восходящей ветви характеристики холостого хода необходимо, чтобы изменение тока возбуждения происходило только в направлении нарастания, при снятии данных нисходящей ветви – только в направлении убывания.*

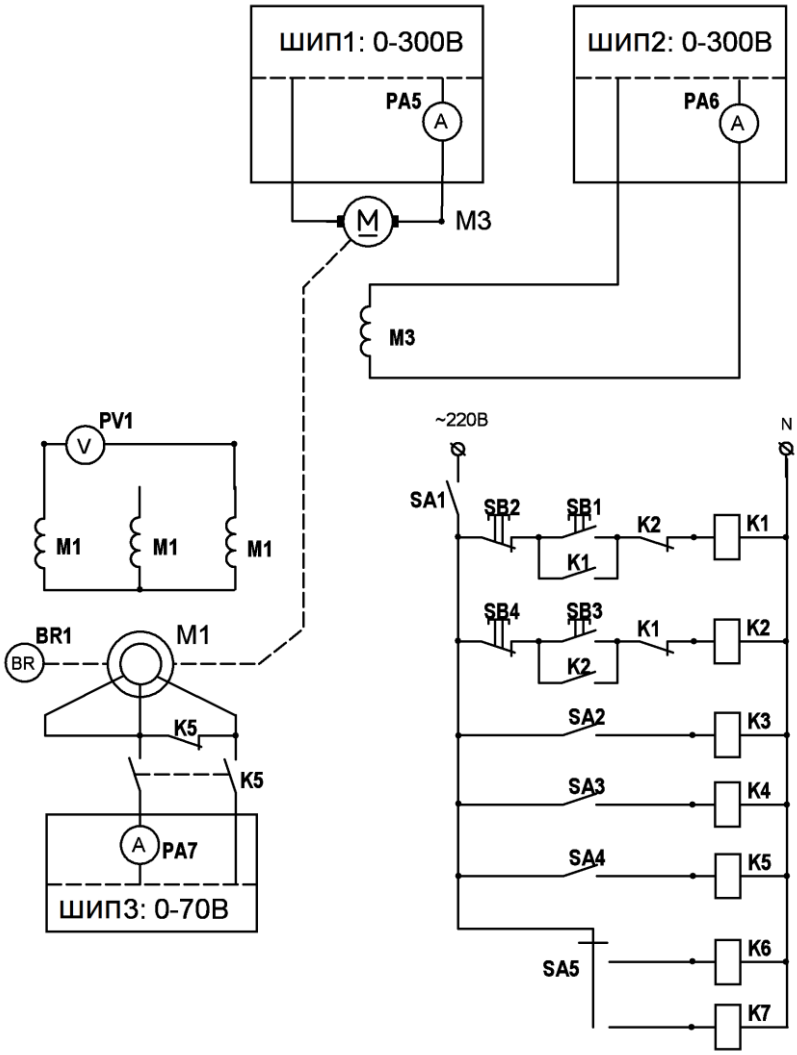


Рис. 12.5. Схема опыта холостого хода синхронного генератора

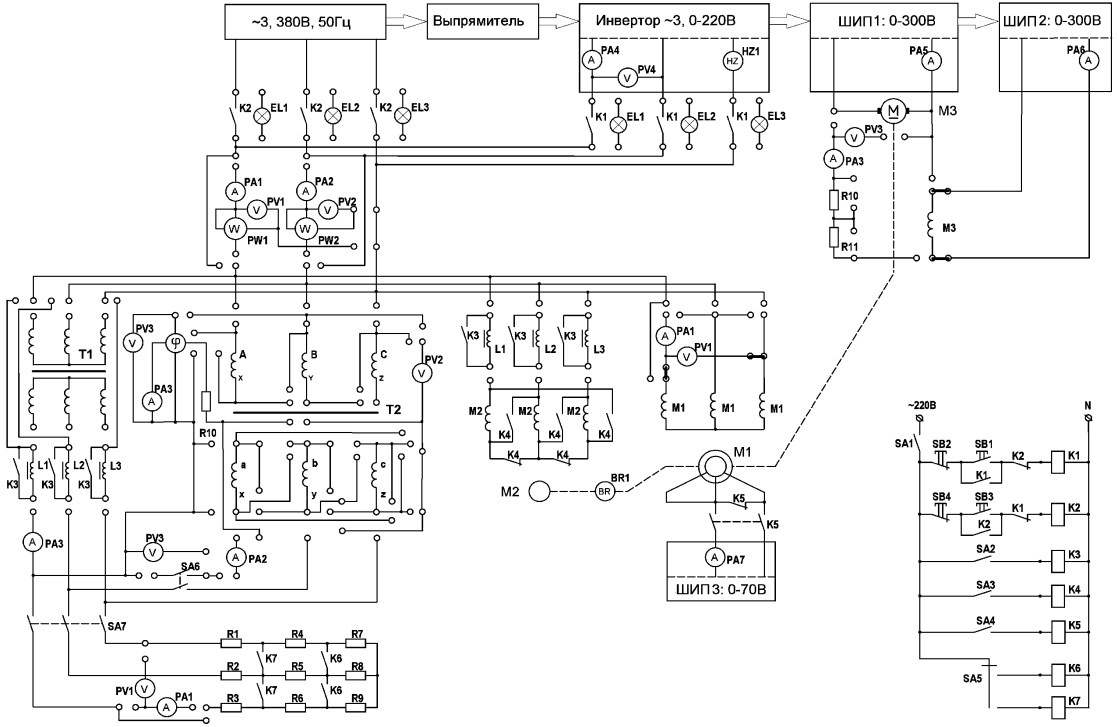


Рис. 12.6. Схема подключения синхронного генератора на панели стенда для проведения опыта холостого хода

Таблица 12.1. **Результаты опыта холостого хода**

№ п/п	Намагничивание		Размагничивание	
	$I_в$, А	E_0, В	$I_в$, А	E_0, В
1				
2				
3				
4				
5				

1.10. Завершив эксперимент, необходимо:

1) регулятором «Задание скорости» ШИП1 уменьшить до нуля скорость вращения ротора машины *M*1 (контролировать по прибору *BR*1), затем выключить ШИП1;

2) установить регулятором «Задание тока» ток в обмотке возбуждения машины *M*3, равный нулю (контролировать по прибору *PA*6), затем выключить ШИП2;

3) выключить выключатели *SA*1 и «Сеть».

1.11. По результатам измерений и вычислений построить характеристику холостого хода $E_0 = f(I_в)$. Показания приборов при увеличении тока возбуждения $I_в$ (при намагничивании) соответствуют восходящей ветви характеристики холостого хода, а при уменьшении тока возбуждения (при размагничивании) – нисходящей ветви. За характеристику холостого хода принимают среднюю линию, проведенную между восходящей и нисходящей ветвями характеристики.

2. Получение внешних характеристик синхронного генератора:

2.1. Пользуясь рис. 12.7, 12.8, собрать схему для получения внешних характеристик синхронного генератора.

2.2. Включить автоматический выключатель «Сеть» и выключатель *SA*1.

2.3. Установить переключатель *SA*4 в положение «Включено» и подключить обмотку возбуждения машины *M*1 к источнику постоянного тока (ШИП3). Регулятором «Задание тока» ШИП3 установить значение тока возбуждения $I_в = 0$ (контролировать по прибору *PA*7).

2.4. Включить ШИП2 и установить регулятором «Задание тока» ток 0,4 А в обмотке возбуждения машины *M*3 (контролировать по прибору *PA*6).

2.5. Установить режимы работы ШИП1 «Задание скорости» и «Включить замкнутую СУ», затем включить ШИП1. Регулятором «Задание скорости» ШИП1 установить синхронную скорость вращения ротора машины *M*1 $\omega = 104$ рад/с (контролировать по прибору *BR*1).

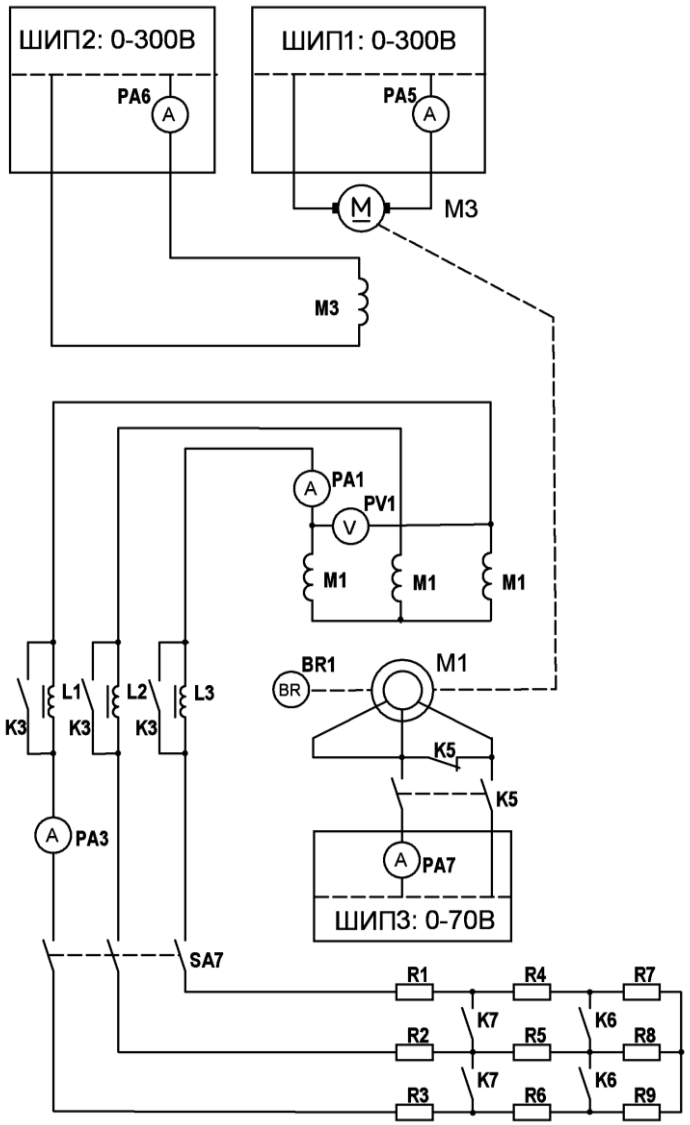


Рис. 12.7. Электрическая схема опыта по определению внешних и регулировочных характеристик синхронного генератора

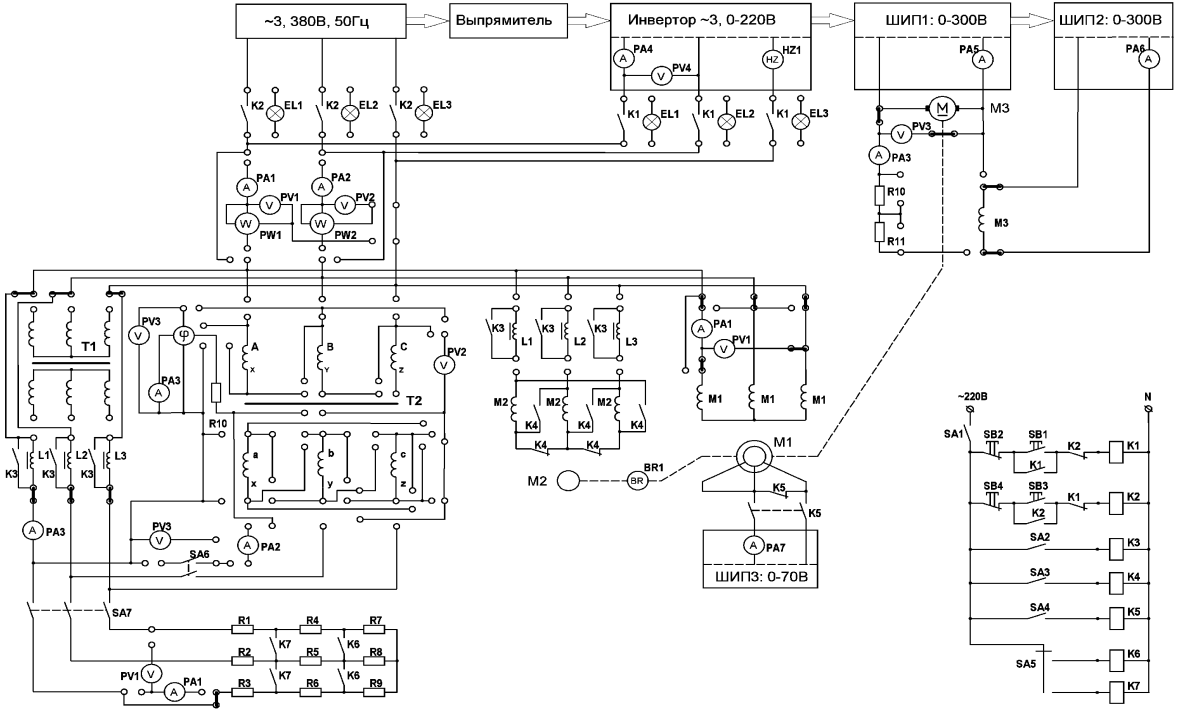


Рис. 12.8. Схема подключения на панели стенда для определения внешней и регулировочной характеристик синхронного генератора

2.6. Регулятором «Задание тока» ШИП3 увеличить значение тока возбуждения машины *M*1 до значения, при котором ЭДС холостого хода $E_0 = U_{ном}$ (контролировать по прибору *PV*1).

2.7. Переключателем *SA*2 зашунтировать катушки *L*1…*L*3. Изменяя активное сопротивление нагрузки переключателем *SA*5, измерить ток (контролировать по прибору *PA*1) и напряжение генератора (контролировать по прибору *PV*1). Результаты измерений записать в табл. 12.2.

Таблица 12.2. **Результаты опыта по определению внешних характеристик синхронного генератора**

№ п/п	Включенные ступени реостата	Активная нагрузка		Активно-индуктивная нагрузка	
		I_1, А	U_1, В	I_1, А	U_1, В
1	*R*1…*R*9				
2	*R*1…*R*6				
3	*R*1…*R*3				

2.8. Переключателем *SA*2 отключить шунтирование катушек *L*1…*L*3. Изменяя величину активно-индуктивной нагрузки переключателем *SA*5, измерить ток (контролировать по прибору *PA*1) и напряжение генератора (контролировать по прибору *PV*1). Результаты измерений записать в табл. 12.2.

2.9. Завершив эксперимент, необходимо:

1) регулятором «Задание скорости» ШИП1 установить скорость вращения ротора машины *M*1, равную нулю (контролировать по прибору *BR*1), затем выключить ШИП1;

2) регулятором «Задание тока» установить ток возбуждения машины *M*3, равный нулю (контролировать по прибору *PA*6), затем выключить ШИП2;

3) выключить выключатели *SA*1 и «Сеть».

2.10. По результатам измерений построить внешние характеристики синхронного генератора $U = f(I_в)$. По внешним характеристикам определить номинальное изменение напряжения синхронного генератора в процентах по формуле

$$\Delta U_{ном} = \frac{E_0 - U_{ном}}{U_{ном}} 100, \qquad (12.3)$$

где E_0 – ЭДС холостого хода генератора при токе возбуждения $I_в$ (определяется по характеристике холостого хода).

3. Получение регулировочных характеристик генератора:

3.1. Включить автоматический выключатель «Сеть» и выключатель *SA*1.

3.2. Переключателем *SA*4 подключить обмотку возбуждения машины *M*1 к источнику постоянного тока (ШИП3). Регулятором «Задание тока» ШИП3 установить ток возбуждения $I_в = 0$ (контролировать по прибору *PA*7).

3.3. Включить ШИП2 и установить регулятором «Задание тока» ток 0,4 А в обмотке возбуждения машины *M*3 (контролировать по прибору *PA*6).

3.4. Установить режимы работы ШИП1 «Задание скорости» и «Включить замкнутую СУ», затем включить ШИП1. Регулятором «Задание скорости» ШИП1 установить синхронную скорость вращения $\omega = 104$ рад/с ротора машины *M*1 (контролировать по прибору *BR*1).

3.5. Регулятором «Задание тока» ШИП3 увеличить значение тока возбуждения машины *M*1 до значения, при котором ЭДС холостого хода $E_0 = U_{ном}$ (контролировать по прибору *PV*1).

3.6. Переключателем *SA*2 зашунтировать катушки *L*1…*L*3. Переключателем *SA*5 изменять величину активной нагрузки машины *M*1, при этом регулятором «Задание тока» ШИП3 изменять значение тока возбуждения машины *M*1 так, чтобы напряжение на выходе генератора в течение опыта оставалось неизменным и равным номинальному: $U_1 = U_{ном}$ (контролировать по прибору *PV*1). Измерить ток нагрузки $I_н$ по прибору *PA*1 и ток возбуждения синхронного генератора $I_в$ по прибору *PA*7. Результаты измерений записать в табл. 12.3.

Таблица 12.3. **Регулировочные характеристики генератора**

№ п/п	Включенные ступени реостата	Активная нагрузка		Активно-индуктивная нагрузка	
		I_1, А	$I_в$, А	I_1, А	$I_в$, А
1	*R*1…*R*9				
2	*R*1…*R*6				
3	*R*1…*R*3				

3.7. Переключателем *SA*2 отключить шунтирование катушек *L*1…*L*3. Переключателем *SA*5 изменять величину активно-индуктивной нагрузки машины *M*1, при этом регулятором «Задание тока» ШИП3 изменять значение тока возбуждения машины *M*1 так, чтобы напряжение на выходе генератора в течение опыта оставалось неизменным и равным номинальному: $U_1 = U_{ном}$ (контролировать по прибору *PV*1). Измерить

ток нагрузки $I_н$ по прибору $PA1$ и ток возбуждения синхронного генератора $I_в$ по прибору $PA7$. Результаты измерений записать в табл. 12.3.

3.8. Завершив эксперимент, необходимо:

1) регулятором «Задание скорости» ШИП1 установить скорость вращения ротора машины $M1$, равную нулю (контролировать по прибору $BR1$), затем выключить ШИП1;

2) регулятором «Задание тока» установить ток в обмотке возбуждения машины $M3$, равный нулю (контролировать по прибору $PA6$), затем выключить ШИП2;

3) выключить выключатели $SA1$ и «Сеть».

3.9. По результатам измерений построить регулировочные характеристики $I_в = f(I_н)$. По регулировочным характеристикам определить номинальное изменение тока возбуждения в процентах:

$$\Delta I_{в.\ ном} = \frac{I_{в.\ ном} - I_{в0\ ном}}{I_{в0\ ном}} 100, \qquad (12.4)$$

где $I_{в.\ ном}$ и $I_{в0\ ном}$ – значения токов возбуждения, соответствующие номинальному напряжению генератора $U_{ном}$ при номинальной нагрузке и в режиме холостого хода соответственно.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы возбуждения синхронных машин?
2. Объясните назначение тиристорного преобразователя в системе самовозбуждения синхронного генератора.
3. Объясните устройство явнополюсных и неявнополюсных роторов.
4. Объясните устройство синхронного генератора.
5. Для чего необходим и чем обеспечивается неравномерный воздушный зазор между полюсами ротора и статором в синхронных машинах?
6. Из каких участков состоит магнитная цепь явнополюсной синхронной машины?
7. Объясните явление реакции статора в синхронном генераторе.
8. Какие виды потерь имеют место в синхронной машине?
9. Можно ли регулировать напряжение синхронного генератора изменением скорости вращения ротора?
10. Почему характеристики холостого хода синхронного генератора при намагничивании и размагничивании не совпадают?

11. Что называют регулировочной характеристикой синхронного генератора?

12. Почему внешние и регулировочные характеристики синхронного генератора, снятые при разных видах нагрузки, не совпадают?

Лабораторная работа 13.
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ

Цель работы:

1. Изучить устройство, принцип действия, правила монтажа, эксплуатации и техники безопасности элементных водонагревателей.

2. Изучить выбор и принципы автоматического управления процессом нагрева воды в элементном водонагревателе.

3. Экспериментально определить энергетические параметры аккумуляционного (емкостного) водонагревателя.

Объект и средства исследования. На рабочем месте смонтирована лабораторная установка, в которой ***объектом изучения и исследования*** является однофазный элементный водонагреватель, имеющий металлический корпус, трубчатый электронагреватель, клеммы на контактных стержнях для присоединения к сети.

Основные параметры элементного водонагревателя: емкость $V = 0{,}012$ м^3, мощность ТЭНа – 2 000 Вт.

Средствами исследования служат: вольтметр *PV* типа Э59 электромагнитной системы с пределами измерения 150, 300 В; амперметр *PA* типа Э59 на 5, 10 А; жидкостный объемный термометр на пределы 0–100 °С; часы наручные любого типа.

13.1. Основные теоретические сведения

По способу нагрева электрические водонагреватели подразделяют на элементные (косвенного нагрева), электродные (прямого нагрева) и индукционные. По принципу действия различают проточные (прямоточные, быстродействующие) и непроточные (аккумуляционные или емкостные) водонагреватели. Проточные водонагреватели позволяют получать горячую воду сразу же после их включения, однако имеют следующие недостатки: сравнительно высокая установленная мощность при низком коэффициенте использования и необходимость в дополнительной мощности трансформатора и пропускной способности сетей при включении их в часы максимума нагрузки. Емкостные

нагреватели способны запасать (аккумулировать) горячую воду, имея меньшую установленную мощность на единицу полезного объема, могут включаться в часы «провалов» суточных графиков нагрузки подстанций и сетей, обеспечивая при этом высокие экономические показатели нагрева воды.

Индукционные водонагреватели представляют собой трехфазный понижающий трансформатор, вторичные обмотки которого выполнены из стальной трубы и электрически замкнуты между собой (вторичный ток трансформатора нагревает трубку, заполненную текущей в ней водой).

Элементные водонагреватели выполняются с герметическими резистивными нагревателями (ТЭНами), поэтому более безопасны в эксплуатации по сравнению с электродными, не загрязняют воду, имеют практически неизменную мощность. Однако они менее надежны из-за ограниченного срока службы нагревателей, имеют более высокие стоимостные показатели. По сравнению с электродными водонагревателями элементные имеют невысокую мощность и используются для горячего водоснабжения сравнительно мелких разбросанных потребителей и в тех случаях, где важны требования к электробезопасности.

Элементный аккумуляционный водонагреватель состоит из цилиндрического бака с теплоизоляцией и металлического кожуха. В баке установлены трубчатые электронагреватели (ТЭНы), терморегулятор и термометр. Для забора воды из водонагревателя открывают вентиль на входном патрубке. При этом вода из водопровода поступает в нижнюю часть бака и вытесняет из верхней части водонагревателя теплую воду. Также имеется шкаф управления работой электрического водонагревателя.

В сельскохозяйственном производстве используются элементные емкостные водонагреватели типов УАП, ВЭТ, САОС, ЭВА, проточные САЗС, ВНС, ВЭП, ЭВ-Ф-15, ЭВПЗ-15 (приложение).

Выбор электрических водонагревателей производят по массе расходуемой воды m, подаче q_{max}, начальной $\Theta_{нач}$ и конечной $\Theta_{кон}$ температурам воды. Эти параметры определяют мощность водонагревателя:

- аккумуляционного:

$$\eta = \frac{mc(\Theta_{кон} - \Theta_{нач})}{60Pt}, \qquad (13.1)$$

где η – КПД водонагревателя;

m – масса нагреваемой воды, кг;

c – теплоемкость воды (c = 4 186 Дж / кг · °С);

$\Theta_{кон}$, $\Theta_{нач}$ – соответственно конечное и начальное значения температуры нагреваемой воды, °С;

P – потребляемая мощность, Вт;

t – время нагрева, ч;

- проточного:

$$P = \frac{q_{max} c(\Theta_{кон} - \Theta_{нач})}{3600\eta}, \qquad (13.2)$$

где q_{max} – подача воды, м^3/ч.

Регулирование мощности водонагревателей осуществляется путем разбиения, а также (в установках небольшой мощности) за счет последовательно-параллельного соединения нагревателей.

Регулирование и поддержание температуры воды в системе осуществляется с помощью терморегулятора.

Рассмотрим простейшие схемы автоматического управления поддержания заданного уровня с использованием релейно-контактной аппаратуры управления (рис. 13.1, *а*, *б*).

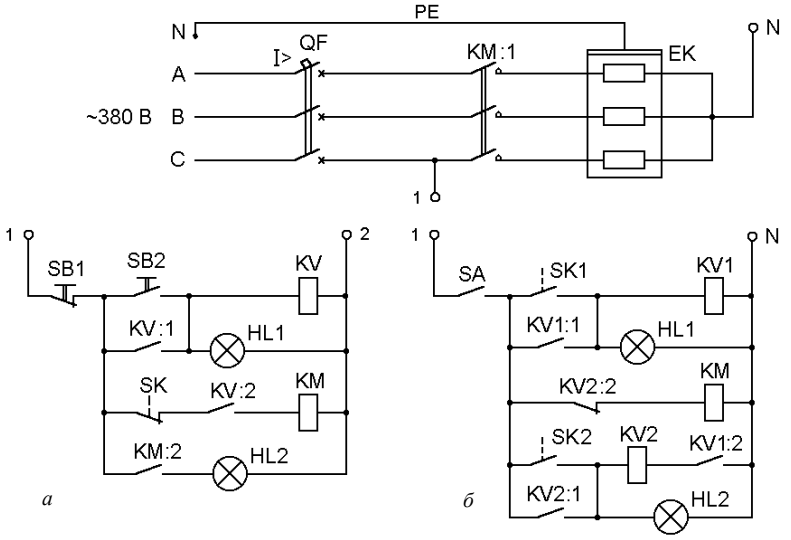


Рис. 13.1. Принципиальная электрическая схема управления водонагревателем с поддержанием температуры воды:
а – на одном уровне; *б* – на нижнем и верхнем уровне

В схеме, представленной на рис. 13.1, *а*, напряжение сети подается на нагреватель при нажатии на кнопку *SB*2. При этом срабатывает промежуточное реле *KV*, которое своими нормально разомкнутыми контактами блокирует кнопку *SB*2, при этом загорается сигнальная лампочка контроля напряжения *HL*1. Через контакты термосигнализатора *SK* другим нормально разомкнутым контактом промежуточного реле *KV* подается напряжение электромагнитного пускателя *KM*, который своими силовыми контактами подключает нагреватель к сети, а блок-контактом – сигнальную лампочку нагрева воды *HL*2.

При достижении температуры заданного уровня размыкаются контакты термосигнализатора, которые обесточивают катушку электромагнитного пускателя *KM*. Лампа *HL*2 гаснет, и нагревательные элементы отключаются от сети.

Для пуска водонагревателя в работу необходимо включить выключатель *SA* в цепи управления (рис. 13.1, *б*). При этом цепь тока замыкается через нормально замкнутые контакты промежуточных реле *KV*1 и *KV*2 и катушку электромагнитного пускателя *KM*. Срабатывает электромагнитный пускатель *KM*, и нагревательные элементы *EK* подключаются к сети через линейные контакты *KM*, начинается нагрев воды.

При достижении температуры воды нижнего уровня замыкаются контакты нижнего температурного уровня *SK*1 термосигнализатора, срабатывает промежуточное реле *KV*1, которое своим нормально разомкнутым контактом блокирует контакт *SK*1, и включается сигнальная лампа *HL*1 нижнего уровня температуры. Вода продолжает нагреваться. При достижении температуры воды верхнего уровня замыкаются контакты верхнего температурного уровня *SK*2 термосигнализатора, срабатывает промежуточное реле *KV*, вследствие чего включается сигнальная лампочка *HL*2 верхнего уровня температуры и нагревательные элементы отключаются от сети.

Принципиальная электрическая схема лабораторной установки приведена на рис. 13.2.

При нажатии на кнопку *SB*2 «Пуск» напряжение сети подается на катушку промежуточного реле *KV*1, которое своим нормально разомкнутым контактом *KV*1 блокирует кнопку *SB*2, при этом загорается сигнальная лампочка контроля напряжения *HL*1. Другими нормально разомкнутыми контактами промежуточного реле *KV*1 замыкается цепь в питании промежуточного реле *KV*2, и подается напряжение сети на катушку электромагнитного пускателя *KM*. Электромагнитный пускатель *KM* срабатывает и своими силовыми контактами *KM* подключает нагревательный элемент к сети, а блок-контакт электромагнитного

пускателя *KM* подключает сигнальную лампочку контроля нагрева воды *HL*2 к сети. При достижении температуры воды верхнего уровня замыкаются контакты термосигнализатора *SK*. При этом срабатывает промежуточное реле *KV*2, которое своим нормально замкнутым контактом обесточивает катушку электромагнитного пускателя *KM*. Гаснет лампочка *HL*2, и нагреватель отключается от сети.

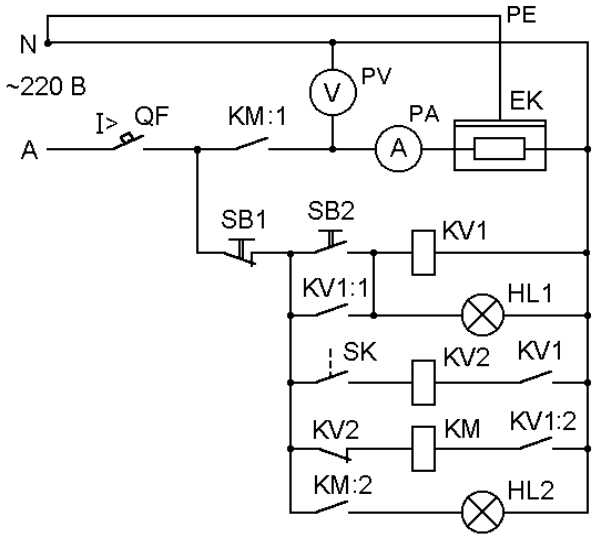


Рис. 13.2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

Основные правила ввода водонагревателя в эксплуатацию заключаются в следующем:

- перед вводом в действие необходимо убедиться в правильности соединения нагревателей, плотности контактных соединений и проверить надежность заземления;

- проверить мегаомметром на 1 000 В сопротивление изоляции электрических нагревателей, которое должно быть не менее 10 МОм, а сопротивление изоляции токоподводов от корпуса водонагревателя – не менее 220 кОм. Если сопротивление изоляции электронагревателей снизилось, их необходимо тщательно просушить до тех пор, пока сопротивление изоляции не войдет в норму, и залить компаундом узлы

соединений трубок с изоляторами выводов. При просушке температура поверхности нагревателей не должна превышать 150 °С;

- на подводящем и отводящем патрубках водопроводной сети должны быть изолирующие вставки из резинового или пластмассового шланга такой длины, чтобы сопротивление воды во вставках было не менее 2 000 Ом;

- проверить электропитание щита управления, убедившись в его работоспособности.

Основные правила эксплуатации и техники безопасности при обслуживании элементных водонагревателей следующие:

- корпус водонагревателя должен быть заземлен. В сети напряжением 380/220 В с заземленной нейтралью для заземления корпус присоединяют к нулевому проводу сети;

- при отсутствии устройств для выравнивания потенциалов и защитно-отключающих устройств по току утечки водонагреватель к водопроводной сети необходимо присоединить через изоляционную вставку длиной не менее 1 м;

- эксплуатация нагревателя в неисправном состоянии, а также при отсутствии защиты и предохранительных устройств запрещается;

- запрещается включать незаполненный водой водонагреватель в сеть, так как в этом случае из-за уменьшения теплоотдачи ТЭНы перегорают.

13.2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными данными оборудования и измерительных приборов рабочего места. Выписать технические данные объекта исследования.

2. Начертить принципиальную электрическую схему лабораторной установки (см. рис. 13.2) и таблицу результатов опытов (измерений и вычислений).

3. Записать формулы, необходимые для расчета мощности, подводимой к водонагревателю P, подачи водонагревателя q, его КПД и удельного расхода электроэнергии $A_{уд}$.

4. Собрать цепь в соответствии со схемой (см. рис. 13.2) с помощью проводников и подсоединить ее к силовому настенному щитку с напряжением 220 В. После разрешения преподавателя включить установку в сеть и приступить к непосредственному испытанию лабораторной установки. Снять показания измерительных приборов и данные измерений (напряжение $U_с$ по вольтметру *PV*, ток I по амперметру *PA*

при температуре воды в интервале 20–80 °С через каждые 20 °С, время нагрева при каждом значении температуры Θ) занести в табл. 13.1.

Таблица 13.1. **Результаты опытов по определению основных параметров электрического процесса нагрева воды (элементный нагрев воды)**

Показатель	Θ, °С			
	20	40	60	80
U_c, В				
I, А				
P, Вт				
T, мин				

5. Исходя из результатов проведенных опытов вычислить по формуле мощность P, подводимую к водонагревателю, и записать в таблицу величину мощности:

$$P = U_c I, \tag{13.3}$$

где U_c – напряжение сети, В;

I – ток в цепи нагревателя, А.

6. Определить по опытным данным для водонагревателя:

- подачу q по формуле

$$q = 60V / t, \tag{13.4}$$

где V – объем нагреваемой воды, м^3;

t – общее время нагрева, мин;

- КПД η по формуле (13.1);
- удельный расход электроэнергии $A_{уд}$ по зависимости

$$A_{уд} = P / q. \tag{13.5}$$

7. По полученным данным построить графическую зависимость $\Theta = f(t)$. При этом следует по оси абсцисс откладывать значения времени нагрева t, а по оси ординат – температуры воды Θ.

Контрольные вопросы

1. Каковы устройство и принцип действия аккумуляционного (емкостного) элементного водонагревателя?
2. В чем заключаются особенности эксплуатации элементных водонагревателей?

3. Каковы основные правила техники безопасности при использовании элементных водонагревателей?

4. Каким образом работают рассматриваемые электрические схемы автоматического управления нагревом воды?

5. Как регулируется мощность элементного водонагревателя и температура воды в нем?

6. Как рассчитать мощность водонагревателя по заданным технологическим условиям?

Лабораторная работа 14.
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ

Цель работы:

1. Ознакомиться с основами электродного нагрева и элементами расчета электродных систем.

2. Изучить конструкцию, принцип работы электродного водонагревателя и схему автоматического управления процессом нагрева воды в нем.

3. Определить удельное сопротивление нагреваемой воды в зависимости от ее температуры.

4. Экспериментально определить основные зависимости и параметры электрического процесса нагрева воды в электродном водонагревателе.

Объект и средства исследования. На рабочем месте смонтирована лабораторная установка, в которой ***объектом изучения и исследования*** являются простейший прибор для определения удельного сопротивления воды и трехфазный электродный водонагреватель, состоящий из трех электродов в виде стальных пластин, изогнутых под углом 120° и смонтированных на изолирующей подставке. Прибор состоит из двух расположенных коаксиально металлических цилиндрических электродов (внутреннего и наружного), изолированных друг от друга в нижней части изоляционным основанием. Основные параметры прибора для определения удельного сопротивления воды: высота средней части уровня воды H = 90 мм, диаметры наружного электрода $d_н$ = 50 мм, внутреннего электрода $d_в$ = 8 мм.

Непроточный водонагреватель вместимостью 0,012 м^3 имеет металлический корпус, токопроводящие стержни с клеммами для присоединения к сети трех стальных электродов, изогнутых под углом 120°, фазной площадью S = 170 см^2 при расстоянии между электродами l = 1 см.

Средствами исследования служат: вольтметр *PV*1 типа Э59 электромагнитной системы с пределами измерения 150, 300 В; вольтметр *PV*2 типа Э59 с пределами измерения 75, 150, 300, 600 В; амперметр *PA*1 типа Э59 на 0,25, 0,50, 1,00 А; амперметр *PA*2 типа Э59 на 5, 10 А; две жидкостные объемные термопары на пределы 0–100 °С; часы наручные любого типа.

14.1. Основные теоретические сведения

В мелиоративно-строительном производстве применяются электрические водонагреватели различных конструкции и принципа работы. Их преимущества по сравнению с огневым способом нагрева воды: в пожарном отношении более безопасны, возможна установка в любом месте, высокий термический КПД (92–97 %), экономия рабочей силы, возможна автоматизация процесса и управление на расстоянии (пуск, остановка, регулирование температуры). Электрические водонагреватели позволяют комплексно использовать электроэнергию, выравнивать суточный график нагрузки и повышать коэффициент использования установленной мощности источника электроснабжения.

Наиболее распространены электродные, элементные и индукционные водонагреватели периодического и непрерывного действия, при этом они могут быть однофазными и трехфазными. Остановимся на рассмотрении электродных водонагревателей. Электродные нагреватели в основном применяются для нагрева воды, обогрева почвы и при электросилосовании. Они являются наиболее простыми по устройству и надежными в работе.

В электродном водонагревателе нагревание воды, обладающей электропроводимостью и находящейся между электродами, производится в результате прохождения через нее электрического тока.

Электродный нагрев является разновидностью нагрева методом сопротивления, основанным на том, что твердые и жидкие проводники оказывают активное сопротивление протеканию электрического тока. Энергия источника тока, затраченная на преодоление этого сопротивления, выделяется в проводнике в виде теплоты (закон Джоуля – Ленца).

$$Q = I^2Rt, \qquad (14.1)$$

где I – величина тока в проводнике, А;

R – сопротивление проводника, Ом;

t – время прохождения электрического тока, с.

Различают непосредственный (прямой) нагрев по методу сопротивления, когда проводником тока является сам нагреваемый материал, и косвенный – электрический ток проходит по особому проводнику (нагревательному элементу) и выделенная в нем теплота передается нагреваемому материалу путем теплопередачи. При прямом электронагреве тепловая энергия выделяется в самом нагреваемом материале, что позволяет достигнуть высоких скоростей нагрева и уменьшить потери в окружающую среду. В случае когда нагреваемый материал является проводником 1-го рода (например, металл), электрическая энергия подводится к нему с помощью специальных контактных устройств (контактный электронагрев). Когда нагреваемый материал является проводником 2-го рода (например, вода, водные растворы, влажные корма), подвод электроэнергии к нему осуществляется с помощью электродов (электродный электронагрев).

Особенности работы электродных водонагревателей в основном определяются конструкцией электродов, их взаимным расположением, свойствами нагреваемой среды (рис. 14.1).

В трехфазных водонагревателях при любом расположении электродов имеется соединение как в треугольник, так и в звезду. Однако в зависимости от формы расположения электродов одно из этих соединений будет основным, по которому часто и ведутся все расчеты. В целом расчет водонагревателей зависит от формы, размещения и схемы соединения электродов.

Материалом электродов могут быть медь, железо, нержавеющая сталь, графит, титан. Лучшими являются электроды из нержавеющей стали, графита и титана (нагрев питьевой воды). Применение оцинкованного железа, алюминия для изготовления электродов недопустимо из-за большого выделения гремучего газа. Включение водонагревателя в цепь постоянного тока также недопустимо, так как при этом происходит разложение (электролиз) воды и выделение гремучего газа.

Существенным недостатком электродных водонагревателей является значительное увеличение потребляемой ими мощности с увеличением температуры (примерно в 5 раз при изменении температуры воды от 10 до 100 °С) из-за уменьшения удельного электрического сопротивления воды. Это объясняется увеличением концентрации и подвижности ионов при повышении температуры воды. Из других недостатков следует отметить высокую электроопасность (при зануленном корпусе с водой частично выносится потенциал), загрязнение электродов и наличие электролиза даже на переменном токе.

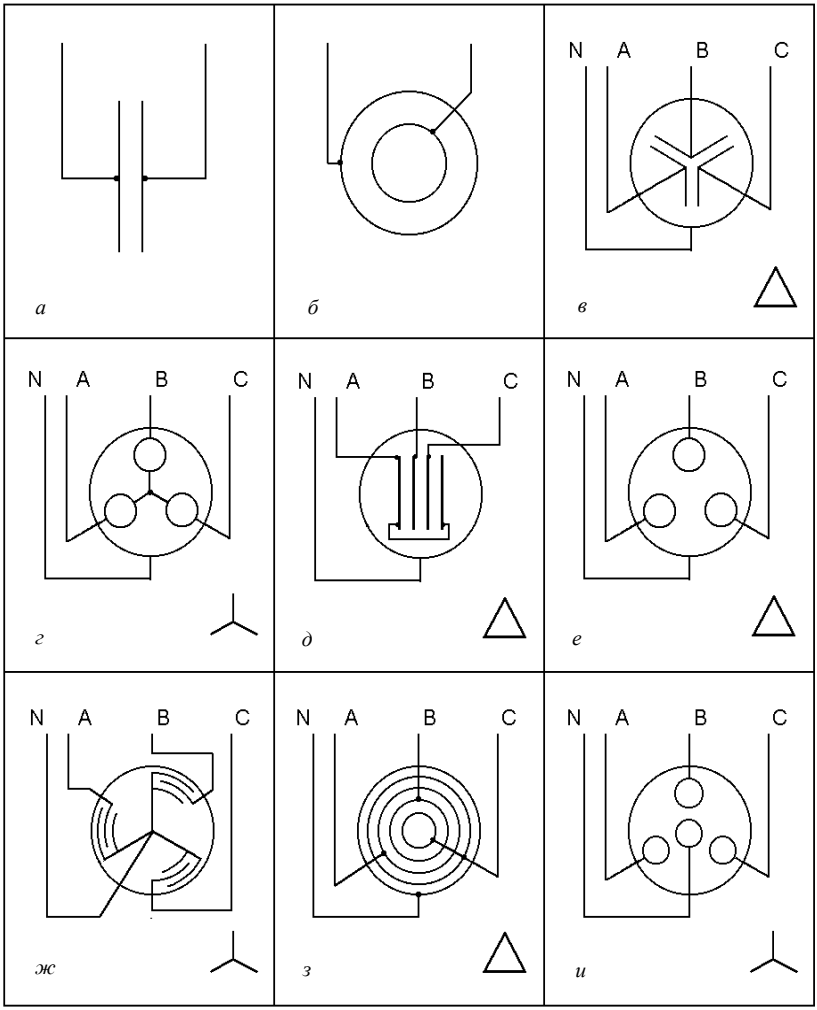


Рис. 14.1. Некоторые типы электродных систем: *а* – однофазная с плоскими электродами; *б* – однофазная с цилиндрическими коаксиальными электродами; *в* – трехфазная с угловыми электродами; *г* – трехфазная с коаксиальными электродами; *д* – трехфазная с пластинчатыми электродами; *е* – трехфазная с цилиндрическими электродами; *ж* – трехфазная с концентрическими электродами и антиэлектродами (экранами); *з* – трехфазная с цилиндрическими коаксиальными электродами; *и* – трехфазная с четырьмя цилиндрическими электродами

Трехфазный электродный водонагреватель простейшего типа (рис. 14.1, *в*), используемый в лабораторной установке, состоит из трех электродов в виде стальных пластин, изогнутых под углом 120°. Такое расположение электродов в баке с водой аналогично соединению нагрузки треугольником, так как ток проходит в основном между электродами.

Однако если бак выполнен из металла, возникает дополнительное соединение звездой между электродами и баком, который выполняет роль нейтральной точки. Если расстояние между электродами значительно меньше, чем между электродами и стенками бака, то преобладающим будет соединение в треугольник. Электрическое поле в нагревателе неодинаково, оно изменяется в пространстве в зависимости от формы электродов и во времени в зависимости от изменения мгновенного значения напряжения. Все это усложняет расчет электродного водонагревателя. Кроме трех пластинчатых электродов, изогнутых под углом 120°, смонтированных на изолирующей подставке, данный непроточный водонагреватель имеет металлический корпус, токопроводящие стержни с клеммами для присоединения к сети.

Электрическая схема управления водонагревателем позволяет автоматизировать процесс нагрева воды (рис. 14.2, *б*). Водонагреватель к сети подключается через силовые контакты электромагнитного пускателя *KM*. В качестве датчика температуры *T* использован контактный ртутный термометр типа ТПК, максимально допустимый ток контактов которого составляет 0,5 мА. Поэтому для усиления контактов использовано промежуточное реле *KV*.

При нажатии на кнопку *SB*2 подается напряжение на катушку электромагнитного пускателя *KM*, в цепи управления которой установлены нормально замкнутые контакты промежуточного реле *KV*. По достижении заданной температуры воды (температура, на которую настроен термометр) ртутный столбик термометра контактирует с вольфрамовым контактом (датчик сработал) и подается напряжение на катушку промежуточного реле *KV*. При этом размыкаются контакты *KV* в цепи катушки электромагнитного пускателя *KM*, напряжение с нее снимается и водонагреватель отключается от сети. Нагрев воды прекращается.

Контактный ртутный стеклянный термометр типа ТПК имеет двойную шкалу (верхнюю и нижнюю) и магнитно-поворотное приспособление. Для настройки термометра на заданную температуру вращают винтовой вал магнитом. Винт при вращении поднимает или опускает гайку,

к которой прикреплена тонкая вольфрамовая струна (контакт), входящая своим контактом в капилляр с ртутью. При настройке термометра вращают винт до тех пор, пока гайка нижним обрезом не установится на штрихе заданной температуры верхней шкалы. При этом конец подвижного контакта находится против такого же температурного штриха нижней шкалы. При достижении заданной температуры ртутный столбик соприкасается с вольфрамовым контактом, что означает срабатывание датчика.

Вода без примесей практически не проводит электрический ток. При 20 °С ее проводимость составляет около 0,3 · 10–3 $Ом^{-1} \cdot см^{-1}$ (для сравнения – проводимость меди составляет 0,6 · 106 $Ом^{-1} \cdot см^{-1}$). Проводимость обычной воды обусловлена наличием растворимых солей, кислот и щелочей, молекулы которых диссоциируют на ионы. Величина, обратная проводимости, представляет собой удельное сопротивление, и для воды удельное сопротивление изменяется в широких пределах (200–10 000 Ом · см). Для разных источников и географических зон удельное сопротивление воды различно.

На удельное сопротивление воды значительное влияние оказывает ее температура. С возрастанием температуры увеличивается степень диссоциации молекул солей на ионы и их подвижность, вследствие чего удельное сопротивление уменьшается:

$$\rho_t = \frac{\rho_{20}}{1 + \alpha(t - 20)}, \qquad (14.2)$$

где ρ_{20}, ρ_t – удельное сопротивление воды при температуре 20 °С и t °С;

α – температурный коэффициент проводимости, $°С^{-1}$ (α = 0,025–0,035 $°С^{-1}$);

t – температура воды, °С.

Во избежание проявления гремучего газа (разложение воды на водород и кислород) при работе водонагревателя должна быть определенная плотность тока $i_{доп}$, допустимое значение которой при использовании обычной стали в качестве электродов составляет 0,5 $А/см^2$ для плоских и 2 $А/см^2$ для цилиндрических. Для электродов из титана и нержавеющей стали величина плотности тока по условиям образования гремучего газа не ограничивается. Допустимая напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве $E_{доп}$ не должна превышать пробивной прочности нагреваемой воды во избежание за-

мыкания электродов ($E_{доп}$ = 125–250 В/см). По величине допустимой напряженности поля находят расстояние между электродами:

$$l = \frac{U}{E_{доп}} = \frac{U}{i_{доп}\rho_t}, \qquad (14.3)$$

где U – напряжение между электродами, В;

$i_{доп}$ – допустимая плотность тока, А/см^2;

ρ_t – удельное сопротивление при конечной температуре нагрева, Ом · см.

Площадь поверхности электродов и расстояние между ними ограничиваются максимально допустимыми значениями плотности тока на электродах и напряженности поля. При большой напряженности поля между электродами наблюдается пробой, а при большой плотности тока – электролитическое разложение воды с образованием взрывоопасного гремучего газа.

Электрическое сопротивление слоя воды R_t между электродами зависит от их площади, расстояния между ними, температуры воды, наличия примесей и ряда других факторов. Для простейшего случая однофазной плоскопараллельной системы электродов (см. рис. 14.1, *а*)

$$R_t = \rho_t \frac{l}{bh}, \qquad (14.4)$$

где l – расстояние между электродами, см;

b и h – соответственно ширина и высота электрода, см.

При эксплуатации электродных водонагревателей необходимо соблюдать следующие основные меры электробезопасности:

1. Водонагреватели электродного типа не допускается устанавливать в особо опасных помещениях (животноводческих, душевых и др.). Их, как правило, размещают в специально выделенных помещениях.

2. Эксплуатация водонагревателя в неисправном состоянии, а также при отсутствии защиты и предохранительных устройств запрещена.

3. Корпус водонагревателя должен быть заземлен. В сети напряжением 220/380 В с заземленной нейтралью для заземления корпус присоединяют к PE-проводу, соединенному с нейтральным проводом сети.

4. При отсутствии устройств для выравнивания потенциалов и защитно-отключающих устройств по току утечки водонагреватель к водопроводной сети следует подключать через изоляционную вставку из резины, фторопласта, полиэтилена и др. Сопротивление столба воды в

изолирующей вставке должно быть таким, чтобы напряжение прикосновения даже в аварийном режиме не превышало 12 В. Кроме того, следует предусмотреть защиту от неполнофазных режимов работы установки.

5. Необходимо периодически производить очистку водонагревателя от солевых отложений различного рода во избежание закорачивания межэлектродного промежутка.

14.2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными данными оборудования и измерительных приборов рабочего места. Выписать технические данные объектов исследования.

2. Начертить принципиальные электрические схемы лабораторных установок (рис. 14.2, *а*, *б*) и табл. 14.1 и 14.2 для записи результатов опытов.

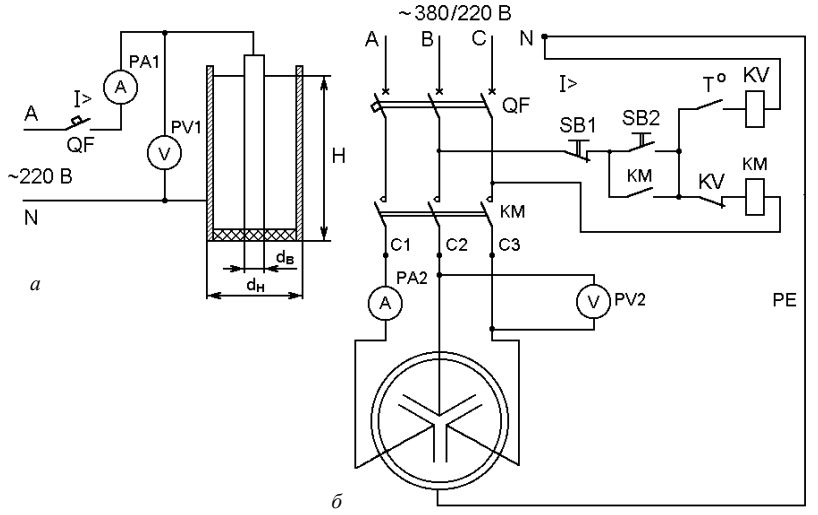


Рис. 14.2. Электрическая схема лабораторной установки

3. Собрать цепь в соответствии со схемами (рис. 14.2, *а*, *б*) с помощью проводников и подсоединить ее к силовому настенному щитку с

напряжением 220/380 В. После разрешения преподавателя включить установку в сеть и приступить к непосредственному испытанию лабораторной установки. Снять показания измерительных приборов (напряжение *Uc* по вольтметру *PV*1, ток *I* по амперметру *PA*1 при температуре воды, начиная с 20 °С через 10 °С и кончая 60 °С; напряжение $U_с$ по вольтметру *PV*2, ток $I_ф$ по амперметру *PA*2 при температуре воды, начиная с 30 °С через 10 °С и кончая 60 °С, время нагрева при каждом значении температуры Θ) и данные измерений занести в табл. 14.1 и 14.2.

Таблица 14.1. **Результаты опытов по определению удельного сопротивления воды**

Показатель	Θ, °С				
	20	30	40	50	60
$U_с$, В					
I, А					
ρ_t, Ом · см					

Таблица 14.2. **Результаты опытов по определению основных параметров электрического нагрева воды (электродный нагрев)**

Показатель	Θ, °С			
	30	40	50	60
$U_с$, В				
$I_ф$, А				
P, Вт				
t, мин				

4. По результатам проведенных опытов вычислить и записать в табл. 14.1 величину удельного сопротивления воды ρ_t, вычисленную по формуле (14.5), а в табл. 14.2 – величину мощности P, подводимую к водонагревателю, вычисленную по формуле (14.9).

5. Определить по опытным данным для водонагревателя по формулам:

- удельное сопротивление воды:

$$\rho_t = \frac{U_с}{I} \cdot \frac{2\pi H}{\ln (d_н / d_в)}, \qquad (14.5)$$

где $U_с$ – напряжение сети, В;

I – ток в цепи, А;

H – высота средней части (уровня воды), H = 90 мм;
$d_н$ – диаметр наружного электрода, $d_н$ = 50 мм;
$d_в$ – диаметр внутреннего электрода, $d_в$ = 8 мм.
Тогда после подстановки значений H, $d_н$, $d_в$:

$$\rho_t = 30{,}86U_с / I; \tag{14.6}$$

- фазное сопротивление воды при 20 °С или 60 °С:

$$R_ф = \rho_{20}L / S, \tag{14.7}$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление воды при 20 °С или 60 °С, Ом · см;
L – расстояние между электродами, L = 1 см;
S – фазная площадь электрода, S = 170 см^2;
- фазная мощность:

$$P_ф = U_с^2 / R_ф; \tag{14.8}$$

- мощность, подводимая к водонагревателю:

$$P = \sqrt{3}\, U_с I_ф, \tag{14.9}$$

где $U_с$ – напряжение сети, В;
$I_ф$ – ток в фазе, А;
- средняя мощность водонагревателя:

$$P_{ср} = (P_1 + P_2) / 2; \tag{14.10}$$

- подача водонагревателя:

$$q = 60V / t, \tag{14.11}$$

где V – объем нагреваемой воды, м^3;
t – общее время нагрева, мин;
- КПД водонагревателя:

$$\eta = \frac{mC(\Theta_{кон} - \Theta_{нач})}{60P_{ср}t}, \tag{14.12}$$

где m – масса нагреваемой воды, кг;
C – теплоемкость воды, C = 4 186 Дж / кг · °С;
$\Theta_{кон}$, $\Theta_{нач}$ – соответственно конечное и начальное значения температуры нагреваемой воды, °С;
- удельный расход электроэнергии:

$$A_{уд} = P_{ср} / q. \tag{14.13}$$

6. По полученным данным построить графические зависимости: $\rho_t = f_1(\Theta)$ и $P = f_2(\Theta)$. При построении графиков зависимостей изменения удельного сопротивления воды от ее температуры $\rho = f_1(\Theta)$ и изменения мощности водонагревателя от температуры $P = f_2(\Theta)$ по оси абсцисс откладывается значение температуры воды, а по оси ординат – соответственно удельное сопротивление воды и мощность водонагревателя P.

Контрольные вопросы

1. Каковы отличия, преимущества и недостатки электродных, элементных и индукционных проточных и непроточных водонагревателей?
2. В чем заключается сущность электродного нагрева и для каких материалов он используется?
3. Каким образом работает схема автоматического нагрева воды (на примере лабораторной установки)?
4. Чем объясняется изменение тока и мощности электродного нагревателя в процессе нагрева?
5. Как влияет на величину тока и мощности изменение поверхности электродов и расстояния между ними?
6. Как определяется минимальное расстояние между электродами и прочность тока на электродах?
7. Какие меры по технике безопасности необходимо обеспечить при монтаже и эксплуатации водонагревателей различного типа?

Лабораторная работа 15.
ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДАЧИ ВЕНТИЛЯТОРА

Цель работы:

1. Исследовать зависимости мощности, момента сопротивления, КПД и подачи вентилятора от его частоты вращения при регулировании подачи вентилятора изменением скорости вращения электродвигателя и постоянном сечении выходного патрубка.
2. Исследовать зависимости мощности, КПД, динамического и полного напоров вентилятора от его подачи при регулировании подачи вентилятора заслонкой и постоянной скорости вращения электродвигателя.

Объект и средства исследования. Лабораторная установка, в которой ***объектом изучения и исследования*** является центробежный вентилятор Ц-4-70 № 3. Центробежный вентилятор представляет собой расположенное в специальном кожухе лопастное колесо, при вращении которого воздух, поступающий через входное отверстие, попадает в каналы между лопатками и под действием центробежной силы направляется в выпускное отверстие. Привод вентилятора осуществляется трехфазным асинхронным короткозамкнутым электродвигателем типа 4А71В2У3, соединенным через блок бесступенчатого тиристорного регулятора напряжения и измерительные приборы монтажными проводами с трехфазной четырехпроводной сетью напряжением 220/380 В.

Основные параметры центробежного вентилятора: тип – Ц-4-70 № 3; подача Q = 550–3 300 м/ч при изменении полного давления в диапазоне H = 157–1 128 Па, частоты вращения n = 1 410–2 850 об/мин, полезной мощности $P_{вен}$ = 0,6–1 кВт; масса – не более 21 кг.

Основные технические данные вентиляционного электродвигателя: номинальная мощность $P_н$ = 1,1 кВт; номинальный ток $I_н$ = 2,5 А; соединение фаз – звезда; коэффициент полезного действия $\eta_н$ = 77,5 %; коэффициент мощности cos $\varphi_н$ = 0,87; номинальная частота вращения $n_н$ = 2 810 об/мин; режим работы – $S1$; класс изоляции – В; маховый момент GD^2 = 0,0 589 Н · м^2; масса – 14,5 кг.

Средствами исследования служат: блок бесступенчатого тиристорного регулятора напряжения (устройство управления ТСУ-2-КЛУ3 «Климатика-1») *UZ*; ваттметр *PW* типа Д542 электродинамической системы с пределом измерения 1 500 Вт; амперметр *PA* типа Э59 электромагнитной системы с пределами измерения 2,5 и 5 А; вольтметры *PV*1 типа Э545 электромагнитной системы с пределами измерения 75, 150, 300, 450, 600 В и *PV*2 типа Э59 электромагнитной системы с пределами измерения 75, 150, 300, 600 В; тахометр ТЧ10-Р часового типа с пределом измерения 100 000 об/мин.

Блок бесступенчатого тиристорного регулятора напряжения типа ТСУ-2-КЛУ3 «Климатика-1» (далее – устройство) предназначен для плавного регулирования скорости вращения трехфазных асинхронных электродвигателей вытяжных вентиляторов с целью автоматического поддержания температуры воздуха в производственных помещениях. В данной лабораторной работе устройство используется как бесступенчатый тиристорный регулятор напряжения для регулирования выходного трехфазного напряжения, подаваемого на электрический двигатель вентилятора.

Основные технические данные и характеристики устройства «Климатика-1»: номинальное напряжение силовой цепи $U_н$ = 380 В: номинальный ток $I_н$ = 63 А; диапазон регулирования выходного напряжения – не менее 1:6; мощность потребления системы управления – не более 100 Вт; отклонение температуры воздуха от заданного значения, вызывающее изменение выходного напряжения, от наименьшего значения до наибольшего должно быть не более 4 °С; КПД – 97 %; степень защиты – IP54; средний срок службы – 10 лет; масса блока регулятора – не более 29,5 кг. Устройство предназначено для работы при температуре воздуха 0…+40 °С, относительной влажности воздуха 80…98 % при 20 °С. Для получения требуемого режима работы на панели устройства имеются соответствующие органы управления и сигнализации: переключатель режима работы «Управление» («Автоматическое» – «Ручное»); резистор «Ручное управление», являющийся задатчиком частоты вращения двигателя. В опытах используется ручной режим работы устройства.

15.1. Основные теоретические сведения

Для поддержания качественного состава воздуха в производственных помещениях необходима систематическая вентиляция с обменом воздуха во всех слоях.

В установках с механическим побуждением для вентиляции производственных помещений применяют вентиляторы: центробежный типа Ц-4-70, осевой типа Ц3-04 или специальный осевой с двумя рядами лопаток, колеса которого расположены непосредственно на валу электродвигателя.

Основными параметрами вентиляторов являются подача и полное давление. Необходимая для привода вентилятора мощность электродвигателя определяется выражением

$$P_{дв} = \frac{kQH}{\eta_{вен}\eta_{пер}} \cdot 10^{-3}, \qquad (15.1)$$

где k – коэффициент запаса мощности, учитывающий не выявленные расчетом факторы (k = 1,05...1,15);

Q – подача вентилятора, м^3/с;

H – полный напор вентилятора, Н/м^2;

$\eta_{вен}$ – КПД вентилятора;

$\eta_{пер}$ – КПД передачи.

Подачу вентилятора вычисляют по вентиляционной норме $L_н$ и числу животных $k_г$ в помещении:

$$Q = L_н k_г. \qquad (15.2)$$

Полное давление H выбирают из расчета подачи воздуха к самой удаленной точке воздухопровода.

Для правильной эксплуатации вентиляторов необходимо знать их важнейшие характеристики (рис. 15.1): зависимости мощности, момента, подачи, статического, динамического и полного напоров от угловой скорости вращения, а также мощности, напора и КПД от подачи.

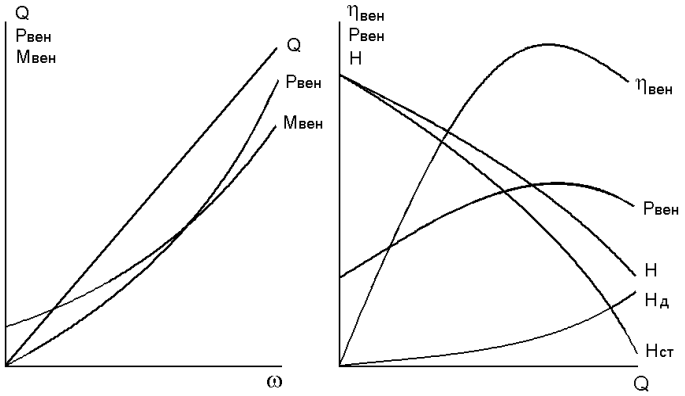


Рис. 15.1. Характеристики центробежных вентиляторов

Механическая характеристика вентилятора – зависимость статического момента от угловой скорости рабочего колеса.

$$M_{ст} = M_0 + k\omega^2, \qquad (15.3)$$

где M_0 – момент сопротивления трогания, не зависящий от скорости, Н · м;

k – коэффициент пропорциональности, Н · м/с$^{-2}$;

ω – коэффициент вращения вентилятора, с$^{-1}$.

Подачу вентиляционной установки можно регулировать путем изменения площади сечения воздухопровода; частоты вращения электродвигателя; числа включенных вентиляторов; поворота лопаток рабочего колеса.

Регулирование подачи изменением площади поперечного сечения воздухопровода осуществляется с помощью задвижек, дросселя и других устройств. Данный способ позволяет регулировать подачу от некоторой номинальной в сторону уменьшения. Способ прост, но неэкономичен, так как $Q = \omega$ и, следовательно,

$$P_{\text{вен}} \equiv Q. \tag{15.4}$$

При постоянном сечении выходного патрубка $F = \text{const}$ и переменной скорости вращения ω имеем $Q \equiv \omega$ и, следовательно,

$$Q_1 / Q_2 = \omega_1 / \omega_2, \tag{15.5}$$

т. е. подача вентилятора изменяется пропорционально угловой скорости рабочего колеса. Динамический напор $H_{\text{д}} = V^2$, а поэтому

$$P_{\text{вен1}} / P_{\text{вен2}} = (\omega_1 / \omega_2)^2. \tag{15.6}$$

Учитывая, что $P_{\text{вен}} = Q \cdot H$, при изменении угловой скорости подачи имеем $Q \equiv \omega^3$ и, следовательно, $P_{\text{вен}} = Q^3$.

В данной лабораторной работе изменение частоты вращения асинхронного трехфазного электродвигателя переменного тока с вентиляторным моментом на валу путем регулирования напряжения питания основано на квадратичной зависимости между моментом электродвигателя $M_{\text{дв}}$ и напряжением U на его зажимах. При постоянных параметрах электродвигателя в области скольжений меньше критического ($S < S_{\text{к}}$) момент двигателя пропорционален квадрату напряжения и скольжения:

$$M_{\text{дв}} = U^2 S. \tag{15.7}$$

Следовательно, при постоянном моменте

$$S \equiv 1 / U^2. \tag{15.8}$$

Поэтому, снижая напряжение, можно увеличивать скольжение, а тем самым уменьшать частоту вращения электродвигателя от номинальной до критической. Со снижением угловой скорости ω в роторе увеличиваются токи, так как они пропорциональны скольжению:

$$\begin{aligned} P_s = P_1 - P_2 = M_{\text{дв}}\omega_{\text{о}} - M_{\text{дв}}\omega = M_{\text{дв}} [\omega_{\text{о}} - \omega_{\text{о}} (1 - S)] = \\ = M_{\text{дв}}\omega_{\text{о}} S = P_1 S, \end{aligned} \tag{15.9}$$

где P_1 – мощность, подводимая к электродвигателю из сети;

P_2 – полезная мощность на валу электродвигателя;

$\omega_{\text{о}}$ – синхронная угловая скорость магнитного поля статора.

Зависимость тока электродвигателя с вентилятором от подаваемого напряжения имеет ярко выраженный максимум тока, который соответствует напряжению 120…160 В и скольжению 0,33…0,39. При этом скольжении имеет место максимум роторных потерь, что естественно, отражается на значении тока статора.

Таким образом, одной из особенностей электровентиляторов является то, что номинальный ток не является максимальным, и это необходимо учитывать при выборе уровня питающего напряжения и мощности регулирующего аппарата. Увеличение потерь при регулировании частоты вращения требует усиления теплосъема с электродвигателя. Этот вопрос удачно решен в конструкциях электровентиляторов, где специально разработанный электродвигатель охлаждается основным воздушным потоком.

15.2. Порядок выполнения работы

1. Начертить принципиальную электрическую схему лабораторной установки (рис. 15.2) и табл. 15.1 и 15.2 для результатов опытов. Записать паспортные величины, характеристики объекта и средств исследования.

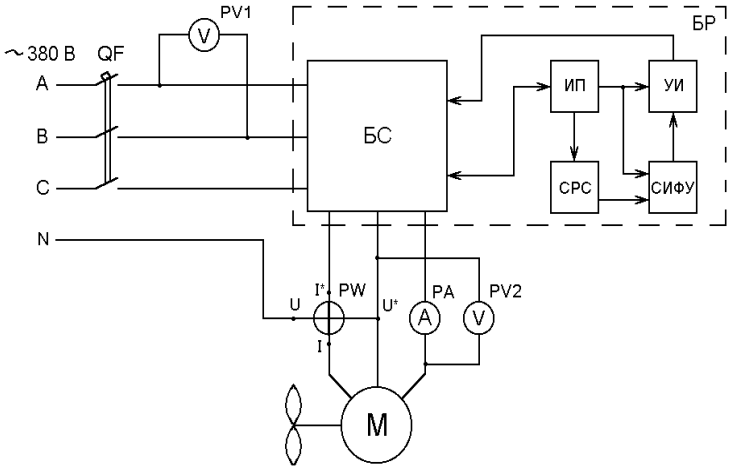


Рис. 15.2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки:
БР – блок регулятора; БС – блок силовой; ИП – источник питания;
УИ – усилитель импульсов; СРС – система регулирования сигнализации;
СИФУ – система импульсно-фазового управления

2. Собрать электрическую цепь с помощью монтажных проводников и подсоединить ее к силовому щитку с линейным напряжением $U_н$ = 380 В. Получив разрешение преподавателя, включить установку в сеть. Измерения величин выполнять при двух способах регулирования подачи вентилятора: путем изменения частоты вращения электродвигателя (вентилятора) при постоянстве сечения выходного патрубка и изменением сечения выходного патрубка заслонкой при постоянстве частоты вращения электродвигателя. Данные измерений (частоту вращения электродвигателя n, линейное напряжение сети U_1, линейное напряжение, подаваемое на электродвигатель с блока регулятора U_2, фазный ток $I_ф$, фазную активную мощность $P_ф$, статическое $H_{ст}$ и полное H давления, создаваемые вентилятором) занести в табл. 15.1 и 15.2.

Таблица 15.1. **Результаты измерений и расчетов частоты вращения электродвигателя**

№ п/п	Степень открытия заслонки, %	Измерения							Вычисления								
		n	U_1	U_2	$I_ф$	$P_ф$	$H_{ст}$	H	P	$P_м$	$M_{ст}$	$H_д$	V	Q	$P_{вен}$	$\eta_{вен}$	$\eta_{уст}$
		$мин^{-1}$	В	В	А	Вт	мм вод. ст.	мм вод. ст.	Вт	Вт	Н · м	Па	м/с	$м^3/с$	Вт	–	–
1																	
…	75																
5																	

Таблица 15.2. **Результаты измерений и расчетов сечения выходного патрубка**

№ п/п	Степень открытия заслонки, %	Измерения					Вычисления								
		n	$I_ф$	$P_ф$	$H_{ст}$	H	P	$P_м$	$M_{ст}$	$H_д$	V	Q	$P_{вен}$	$\eta_{вен}$	$\eta_{уст}$
		$мин^{-1}$	А	Вт	мм. вод. ст.	мм. вод. ст.	Вт	Вт	Н · м	Па	м/с	$м^3/с$	Вт	–	–
1	0														
2	25														
3	50														
4	75														
5	100														

3. Для измерения частоты вращения электродвигателя необходимо кнопку «Управл.» установить в режим «Ручн.», создав тем самым управляемый ручной режим работы блока регулятора. Переменным

резистором «Ручное управление» выполнить ручное управление частоты вращения электропривода от минимальной до максимальной, обеспечив как минимум пять значений частоты вращения по усмотрению студента. Данные измерений занести в табл. 15.1.

4. Для измерения сечения выходного патрубка заслонку необходимо установить в пять положений, обеспечив степень открытия заслонки 0, 25, 50, 75 и 100 %. При полностью закрытой заслонке обеспечивается холостой ход установки. Частоту вращения электродвигателя вентилятора следует поддерживать постоянной и равной номинальной частоте электродвигателя. Данные измерений занести в табл. 15.2.

5. Измерять динамический $H_д$, статический $H_{ст}$ и полный H напоры, развиваемые вентилятором в выходном патрубке *1*, необходимо с помощью *U*-образного водяного манометра, соединенного с измерительной трубкой *4* (рис. 15.3).

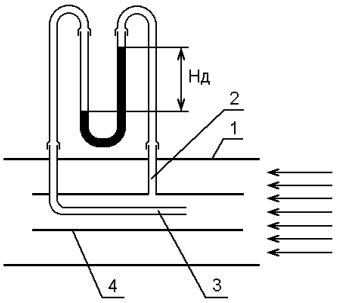


Рис. 15.3. Схема измерения напоров

Измерительная трубка для соединения с манометром имеет внешний канал *2*, направленный перпендикулярно движению потока воздуха, и внутренний канал *3*, направленный навстречу потоку воздуха. Для измерения динамического напора $H_д$ оба колена манометра соединяют с каналами измерительной трубки. Если соединить одно колено манометра с внешним каналом *2*, то разность уровней воды в коленах укажет статический напор $H_{ст}$. При соединении одного колена с внутренним каналом *3* разность уровней воды показывает полный напор H.

6. По данным измерений и расчетов построить графики зависимостей:

- при F = const – $P_{вен} = f_1(\omega)$; $M_{ст} = f_2(\omega)$; $\eta_{вен} = f_3(\omega)$; $Q = f_4(\omega)$;
- при ω = const – $P_{вен} = f_5(Q)$; $\lambda_{вен} = f_6(Q)$; $H_д = f_7(Q)$; $H = f_8(Q)$.

7. Проанализировать полученные данные экспериментов и дать заключение по энергетическому сравнению способов регулирования подачи вентилятора.

8. Результаты расчетов по данным опытов определяются следующим образом:

- мощность, потребляемая двигателем из сети по формуле

$$P = 3P_{ф}, \tag{15.10}$$

где $P_{ф}$ – активная фазная мощность электродвигателя, Вт;

- механическая мощность на валу вентилятора в виде выражения

$$P_{м} = P - 3I^{2}_{ф}R_{ф} - P_{о}, \tag{15.11}$$

где $I_{ф}$ – фазный ток электродвигателя, А;

$R_{ф}$ = 7,5 Ом – омическое сопротивление фазы статора, Ом;

$P_{о}$ – потери в двигателе, связанные с электрическими, в обмотках статора, ротора и добавочные, Вт.

Потери в двигателе определяются по данным холостого хода установки (заслонка полностью закрыта):

$$P_{о} = 3P_{ф} - 3I_{ф}R_{ф}, \tag{15.12}$$

где $I_{ф}$, $P_{ф}$ – соответственно фазный ток и фазная мощность при холостом ходе установки. В расчетах принять $P_{о}$ = 132 Вт;

- статический момент на валу вентилятора определяется по формуле

$$M_{ст} = P_{м} / \omega, \tag{15.13}$$

где $\omega = \pi n / 30$ – соответствующая угловая скорость вращения вала электродвигателя, с (n – частота вращения электродвигателя, об/мин);

- динамический или скоростной напор, характеризующий кинетическую энергию потока воздуха и представляющий собой давление, оказываемое движущимся потоком воздуха на поверхность, непараллельную движению потока, вычисляется следующим образом:

$$H_{д} = H - H_{ст}, \tag{15.14}$$

где H – полное давление (депрессия), определяемое как сумма динамического $H_{д}$ и статического $H_{ст}$ давлений и характеризующее полную энергию движущегося воздуха в поперечном сечении воздуховода, Н/м^2;

$H_{ст}$ – статическое давление, характеризующее потенциальную энергию потока и действующее с одинаковой силой во все стороны, Н/м^2;

- скорость движения воздуха в трубопроводе в виде

$$V = \sqrt{\frac{2H_{д}}{\rho}}, \qquad (15.15)$$

где ρ = 1,2 – плотность воздуха, кг/м^3;

- подача вентилятора или количество воздуха, подаваемого в единицу времени, рассчитывается по формуле

$$Q = VF, \qquad (15.16)$$

где F – площадь сечения трубопровода, м^2;

- площадь сечения трубопровода определяется в зависимости от степени открытия заслонки. Степень открытия заслонки равна 0; 25; 50; 75; 100 %, площадь сечения трубопровода при этом составляет 0; 0,0 125; 0,0 250; 0,0 375; 0,0 500 м^2 соответственно;

- полезная мощность вентилятора определяется по выражению

$$P_{вен} = QH, \qquad (15.17)$$

- коэффициент полезного действия вентилятора рассчитывается по формуле

$$\eta_{вен} = P_{вен} / P_{м}, \qquad (15.18)$$

- коэффициент полезного действия вентиляторной установки вычисляется следующим образом:

$$\eta_{уст} = P_{вен} / P. \qquad (15.19)$$

При выполнении расчетов необходимо иметь в виду, что давление в 1 мм вод. ст. = 1 кг/м^2 = 9,81 Н/м^2 = 9,81 Па.

9. Графики зависимостей $P_{вен} = f_1(\omega)$; $M_{ст} = f_2(\omega)$; $\eta_{вен} = f_3(\omega)$; $Q = f_4(\omega)$ при F = const и $P_{вен} = f_5(Q)$; $\eta_{вен} = f_6(Q)$; $H_{д} = f_7(Q)$; $H = f_8(Q)$ при ω = const рекомендуется строить в соответствующем масштабе, выбирая в качестве оси абсцисс ось ω при F = const и ось Q при ω = const, а в качестве оси ординат $P_{вен}$, $M_{ст}$, $\eta_{вен}$, Q при F = const и оси $P_{вен}$, $\eta_{вен}$, $H_{д}$, H при ω = const.

Контрольные вопросы

1. Поясните способы регулирования подачи вентилятора. Какой из них является наиболее экономичным и почему?
2. Каким образом определяются коэффициенты полезного действия вентилятора и вентиляторной установки и в чем заключается их различие между собой?
3. Какой вид имеет механическая характеристика вентилятора?
4. В каких случаях привод центробежных вентиляторов развивает максимальную мощность?
5. Как определить момент и мощность на валу вентилятора?
6. Поясните зависимости подачи и коэффициента полезного действия вентилятора от частоты вращения.
7. Поясните зависимости динамического и полного напоров вентилятора от его подачи.
8. Как в производственных условиях подобрать электрический двигатель для привода вентилятора?

Лабораторная работа 16.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОМПЛЕКСА ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ «КЛИМАТ-4М»

Цель работы:

1. Изучить электропривод комплекса вентиляционного оборудования «Климат-4М» (состав и основные характеристики электропривода оборудования), особенности электродвигателей и режимов их работы по частоте вращения.
2. Исследовать электропривод комплекса вентиляционного оборудования «Климат-4М» при ручном и автоматическом управлении.

Объект и средства исследования. Объектом исследования лабораторной установки является комплекс вентиляционного оборудования «Климат-4М», включающий осевой вентилятор ВО5, 6МУЗ и бесступенчатый тиристорный регулятор напряжения (устройство управления ТСУ-2-КЛУЗ «Климатика-1»), соединенные монтажными проводами с трехфазной четырехпроводной сетью напряжением 220/380 В.

Основные параметры вентилятора: подача должна быть не менее Q = 5 000 м/ч; давление полное H = 42,14 Па; регулирование подачи

воздуха – не менее 1:6; максимальный полный КПД – не менее $\eta_{вен}$ = 0,67; максимальная частота вращения n = 900 об/мин; масса – не более 25,0 кг; тип электродвигателя Д80В6ПУ2.

Основные технические данные вентиляционного электродвигателя: номинальная мощность $P_н$ = 0,37 кВт; номинальный ток $I_н$ = 1,4 А; соединение фаз – звезда; коэффициент полезного действия $\eta_н$ = 63 %; частота вращения $n_н$ = 900 об/мин; кратность пускового тока К = 5; кратность пускового момента μ_0 = 1,7; режим работы *S*1; класс изоляции *B*; масса – 1,58 кг.

Используемое устройство управления комплектное «Климатика-1» типа ТСУ-2-КЛУ3 (далее устройство) представляет собой бесступенчатый тиристорный регулятор напряжения и предназначено для плавного регулирования скорости вращения асинхронных электродвигателей вытяжных вентиляторов с целью автоматического поддержания температуры воздуха в производственных сельскохозяйственных помещениях. В ручном режиме работы устройство «Климатика-1» может служить в качестве трехфазного регулятора переменного напряжения для питания различных электроустановок.

Основные технические данные и характеристики устройства «Климатика-1»: номинальное напряжение силовой цепи $U_н$ = 380 В; номинальный ток $I_н$ = 6,3 А; диапазон регулирования выходного напряжения – не менее 1:6; отклонение температуры воздуха от заданного значения, вызывающее изменение выходного напряжения от наименьшего значения до наибольшего, – не более 4 °С; коэффициент полезного действия $\eta_н$ = 97 %; степень защиты *IP*54. Устройство предназначено для работы в следующих условиях: температура воздуха – от 0 до +40 °С, относительная влажность – 80...98 % при 20 °С.

В качестве датчика температуры используется термопреобразователь сопротивления ТСМ-6114 с диапазоном измеряемых температур от –50 до +100 °С.

Средствами исследования служат: двигатель трехфазный асинхронный типа АМЛ 11/4 привода вспомогательного вентилятора для охлаждения датчика температуры; электромагнитный пускатель ПМЕ-111 *KM* с катушкой на 220 В для подключения электродвигателя типа АМЛ 11/4 к сети; промежуточное реле *KL* типа ПЭ-21У3 с катушкой на 220 В, служащее для подачи напряжения на катушку элек-

тромагнитного пускателя и лампу накаливания *EL* мощностью 150 Вт и напряжением 245…255 В; лампа накаливания *EL*, предназначенная для имитации теплового режима путем нагрева датчика температуры; термометр с пределом измерения температуры 0...60 °С; ваттметр *PW* астатический типа АСТД электродинамической системы с пределом измерения 750 Вт (с добавочным сопротивлением 1 500 Вт); амперметр *PA* типа Э8021 электромагнитной системы с пределом измерения 2 А; вольтметры *PV*1 и *PV*2 типа Э8021 электромагнитной системы с пределом измерения 250 В.

16.1. Краткие теоретические сведения

В комплексе вентиляционного оборудования «Климат-4М» предусмотрены ручной и автоматический режимы работы устройства.

Для получения требуемых режимов работы на установке имеются соответствующие органы управления и сигнализации. Блок переключателя устройства «Климатика-1» выполняет функции обводного устройства, а также защиты устройства от коротких замыканий. При включении выключателей *QF*1, *QF*2 (рис. 16.1) обеспечивается управляемый режим работы вентиляторов.

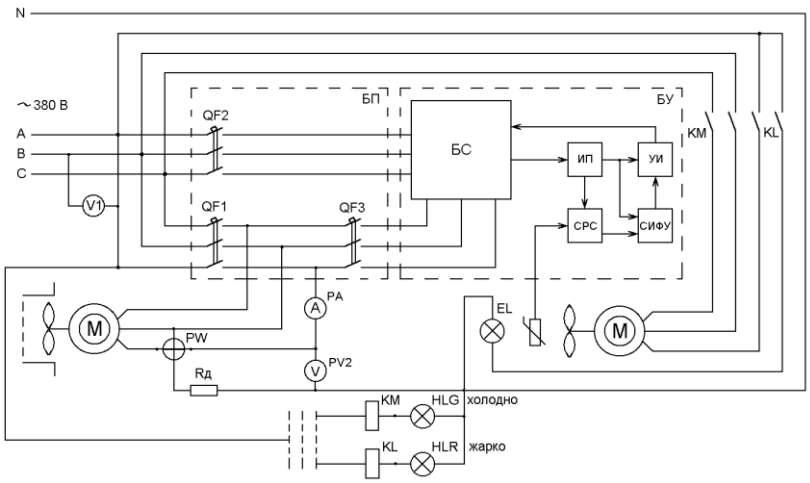


Рис. 16.1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

При включении выключателя *QF*1 напряжение подается на электродвигатели вентиляторов, минуя устройство, при котором отключение выключателей *QF*2, *QF*3 обеспечивает снятие напряжения с устройства как со стороны сети, так и со стороны нагрузки.

На панели управления блока регулятора имеются: блок переключателей диапазона *S*1 и резистор *R*6 «Установка температуры», которые служат задатчиком температуры УТ; блок переключателей *S*2 «Датчики», положение которого соответствует количеству подключенных термопреобразователей (до трех штук, включаемых параллельно и распределяемых по длине помещения); резистор *R*1 «Минимальное напряжение», с уровнем которого сравнивается сигнал управления; резистор *R*2 и лампа *HL* «Аварийное отключение температуры», позволяющее выбирать значение аварийного отключения температуры в пределах от 2 до 6 °С; переключатель *S*3 режима работы «Управление» (автоматическое – ручное); резистор *R*3 «Ручное управление», являющийся задатчиком ручного управления. Задатчик температуры УТ позволяет производить установку температуры в диапазоне от 0 до 40 °С.

Для обеспечения точной установки заданной температуры задатчик настроен следующим образом: резистором *R*6 осуществляется установка температуры в пределах от 0 до 10 °С. Для задания диапазона измерения температуры служит блок переключателей *S*1 диапазонов «0 °С», «10 °С», «20 °С» и «30 °С».

Установка температуры определяется суммированием величин, соответствующих положению резистора и позиции переключателя. Переключатель *SA* режима «Жарко-холодно», расположенный на панели дополнительного оборудования и приборов установки, обеспечивает в режиме «Жарко» через промежуточное реле K*L* и магистральный пускатель *KM* работу электродвигателя вспомогательного вентилятора для обдува датчика температуры с целью более быстрого снижения его температуры нагрева (лампа накаливания *EL* не горит), а в режиме «Холодно» через промежуточное реле K*L* подключает лампу накаливания *EL* для имитации нагрева датчика температуры (электродвигатель вспомогательного вентилятора не работает). Переключатель *S*5 предназначен для шунтирования амперметра *A* на момент пуска электрической установки.

16.2. Порядок выполнения работы

1. Начертить принципиальную электрическую схему лабораторной установки (см. рис. 16.1) и занести в табл. 16.1 результаты опытов. Записать паспортные величины, характеристики объекта и средств исследования.

Таблица 16.1. **Результаты опыта**

№ п/п	Измерения					Вычисления				
	$U_{1Ф}$	$U_{2Ф}$	$I_Л$	$P_Ф$	n	S	ω	P	$M_{дв}$	cos φ
	В	В	А	Вт	об/мин	ВА	$С^{-1}$	Вт	Н · м	–
Неуправляемый режим										
1										
Управляемый ручной режим										
1										
2										
3										
Управляемый автоматический режим										
Температура внутри помещения _____ °С, заданная _____ °С										
1										

2. Собрать цепь с помощью монтажных проводников и подсоединить ее к силовому настенному щитку с линейным напряжением $U_н$ = 380 В. Получив разрешение преподавателя, включить установку в сеть, выполнив при этом три режима работы установки: неуправляемый, управляемый ручной, управляемый автоматический.

3. Автоматический выключатель *QF*1 установить в положение «Включено», создав тем самым неуправляемый режим работы электропривода комплекса вентиляционного оборудования (в дальнейшем – электропривод). Данные измерений занести в таблицу («Неуправляемый режим»).

4. Выключить автоматический выключатель *QF*1, включить автоматические выключатели *QF*2 и *QF*3, создав тем самым управляемый режим.

5. Кнопку «Управл.» установить в режим ручного управления. Переменным резистором «Ручное управление» выполнить ручное управление частотой вращения электропривода от минимальной до максимальной, обеспечив как минимум пять значений по усмотрению студента. Снять показания приборов, данные измерений занести в таблицу.

6. Для получения управляемого автоматического режима необходимо выполнить следующее. Переключатель *S*1 и резистор «Установка температуры» установить в положение, при котором установка температуры будет больше, чем температура воздуха в помещении. Переключатель «Датчики» установить в положение 1, что соответствует подключению одного датчика (термопреобразователя) температуры. Переключатель *SA* перевести в положение «Жарко», при этом нагревается датчик от лампы накаливания *EL*, что имитирует нагрев воздуха в животноводческом помещении с помощью трубчатых электронагревателей.

При достижении заданной температуры происходит автоматическое включение электропривода вентиляционной установки. После достижения установившегося состояния работы вентиляционной установки необходимо снять показания приборов и данные измерения занести в таблицу («Управляемый автоматический режим»).

Затем установить переключатель *SA* в положение «Холодно», при этом происходит искусственное охлаждение датчика температуры от вентилятора, установленного на валу вспомогательного двигателя *M*2. При снижении температуры датчика происходит отключение электропривода вентиляционной установки и включение трубчатых электронагревателей (ТЭНов). В дальнейшем процесс работы электропривода вентиляционной установки повторяется по схеме, описанной выше.

7. Обработку результатов эксперимента проводить в следующей последовательности:

- полная мощность, ВА:

$$S = 3U_{Ф}I_{Л}; \qquad (16.1)$$

- активная мощность, Вт:

$$P = 3P_{Ф}; \qquad (16.2)$$

- угловая скорость ротора электродвигателя, $с^{-1}$:

$$\omega = \pi n / 30; \qquad (16.3)$$

- вращающий момент электродвигателя, Н · м;

$$M_{дв} = (P - 0{,}12\ P_н) / \omega, \qquad (16.4)$$

где $0{,}12\ P_н$ – потери в двигателе, связанные с электрическими в обмотках статора и ротора, а также добавочными, Вт;

- коэффициент мощности:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P_ф}{U_{2ф}\ I_л}. \qquad (16.5)$$

8. По данным измерений построить графики зависимостей: $I_Л = f_1\ (U_{2Ф})$; $I_Л = f_2\ (\omega)$; $\cos\varphi = f_3\ (\omega)$; $\cos\varphi = f_4\ (P)$; $M_{дв} = f_5\ (\omega)$.

9. Выполнить анализ полученных зависимостей.

Контрольные вопросы

1. Какова характеристика комплекса вентиляционного оборудования «Климат-4М»?
2. Какое оборудование включает в себя комплекс вентиляционного оборудования «Климат-4М»?
3. Укажите особенности конструкции электродвигателей вентиляторов осевых серии ВО.
4. Какой режим частоты вращения наиболее тяжелый для электродвигателей вентиляторов серии ВО?
5. Что входит в состав силового блока устройства управления комплектного «Климатика-1» ТСУ-2-КЛУ3?
6. Приведите функциональную схему устройства управления комплектного «Климатика-1»ТСУ-2-КЛУ3.
7. Какие органы управления расположены на панели управления?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизированный электропривод технологического оборудования пищевой промышленности и АПК : учеб. пособие / М. М. Кожевников, О. В. Понталев, К. Л. Пузевич [и др.] ; под общ. ред. В. А. Шаршунова. – Мн. : Мисанта, 2019. – 436 с.

2. Бородин, И. Ф. Автоматизация технологических процессов : учеб. / И. Ф. Бородин, Ю. А. Судник. – М. : КолосС, 2007. – 344 с.

3. Дайнеко, В. А. Электрооборудование сельскохозяйственного производства : учеб. пособие / В. А. Дайнеко, А. И. Ковалинский. – Мн. : Новое знание, 2008. – 319 с.

4. Дайнеко, В. А. Электрооборудование сельскохозяйственного производства : пособие / В. А. Дайнеко, И. Н. Шаукат. – Мн. : Беларусь, 2011. – 286 с.

5. Дайнеко, В. А. Электрооборудование сельскохозяйственного производства. Практикум : пособие / В. А. Дайнеко, И. Н. Шаукат, Т. Г. Базулина. – Мн. : Беларусь, 2011. – 271 с.

6. Гайшун, И. А. Основы теории сельскохозяйственного электропривода : курс лекций : в 3 ч. / И. А. Гайшун. – Горки : БГСХА, 2010. – 3 ч.

7. Ерошенко, Г. П. Эксплуатация электрооборудования : учеб. / Г. П. Ерошенко. – М. : Колос, 2008. – 344 с.

8. Электропривод и электрооборудование : учеб. / А. П. Коломиец, Н. П. Кондратьева, И. Р. Владыкин [и др.]. – М. : КолосС, 2007. – 328 с.

9. Кленин, Н. И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины : учеб. / Н. И. Кленин, В. Г. Егоров. – М. : КолосС, 2007 – 464 с.

10. Радченко, Г. Е. Автоматизация сельскохозяйственной техники : учеб. пособие / Г. Е. Радченко. – Мн. : Технопринт, 2005. – 362 с.

11. Радченко, Г. Е. Автоматизация сельскохозяйственной техники : учеб. пособие / Г. Е. Радченко. – Мн. : Технопринт, 2011. – 496 с.

12. Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий : практикум / В. С. Сергеев, А. В. Кузьмицкий, И. А. Гайшун, И. В. Дубень. – Мн. : Техноперспектива, 2005. – 224 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Основные технические характеристики элементных водонагревателей

Тип	Вместимость резервуара, л	Мощность, кВт	Максимальная температура нагрева, °С	Время нагрева, ч	Масса, кг
УАП-200/0,9-И2	200	6	90	4,0	150
УАП-400/0,9-М1	400	12	90	3,3	180
УАП-800/0,9-М1	800	18	90	4,5	310
УАП-1600/0,9-И1	1 600	30	90	6,0	500
ВЭТ-200	200	6	90	3,5	150
ВЭТ-400	400	10,5	90	3,8	200
ВЭТ-800	800	16,5	90	4,7	350
ВЭТ-1600	1 600	31,5	90	5,0	720
САОС-400/90-И1	400	12	90	3,5	128
САОС-800/90-И1	800	18	90	6,0	196
САОС-1600/90-И1	1 600	30	90	6,0	314
ЭВ-150М	150	6,5	80	–	70
ЭВА-450	450	15	85	3,5	110
ЭВАД-50/1,6	50	1,6	40	–	23
ЭВАД-80/1,6	80	1,6	40	–	30
ЭВАО-10/1,6	10	1,6	40…85	0,5	9
САЗС-400/0,9-И1	400	12	95	3,3	195
ВНС-120/0,9	100	3,5	95	–	–
ВНС-120/0,2	350	3,5	20	–	–
ВЭП-210	210	15	65	1,0	25
ВЭП-600	600	10,5	22; 80	1,0	125
ЭВ-Ф-15	14	15	75	–	30
ЭВПЗ-15	–	15	35…80	–	15

СОДЕРЖАНИЕ

Введение ... 3
Список рекомендуемой литературы ... 8
Лабораторная работа 1. Подготовка к пуску трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя переменного тока и включение его в работу ... 9
Лабораторная работа 2. Исследование работы трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором ... 22
Лабораторная работа 3. Исследование работы трехфазного асинхронного электродвигателя с фазным ротором ... 31
Лабораторная работа 4. Исследование способов улучшения коэффициента мощности асинхронного короткозамкнутого электродвигателя ... 43
Лабораторная работа 5. Исследование работы автоматического выключателя ... 55
Лабораторная работа 6. Исследование контакторов и магнитных пускателей переменного тока ... 66
Лабораторная работа 7. Изучение схемы тепловой защиты асинхронного электродвигателя ... 80
Лабораторная работа 8. Изучение схем управления асинхронным электродвигателем переменного тока с короткозамкнутым ротором ... 101
Лабораторная работа 9. Исследование естественных статических электромеханической и механической характеристик асинхронного двигателя ... 106
Лабораторная работа 10. Определение момента инерции и махового момента электропривода методом свободного выбега ... 123
Лабораторная работа 11. Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения ... 140
Лабораторная работа 12. Исследование работы трехфазного синхронного генератора ... 148
Лабораторная работа 13. Исследование работы элементного водонагревателя ... 165
Лабораторная работа 14. Исследование работы электродного водонагревателя ... 172
Лабораторная работа 15. Исследование способов регулирования подачи вентилятора ... 182
Лабораторная работа 16. Исследование электропривода комплекса вентиляционного оборудования «Климат-4М» ... 192
Библиографический список ... 199
Приложение ... 200

Учебное издание

Пузевич Константин Леонидович
Козлов Степан Иванович

ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

Редактор *О. Н. Минакова*
Технический редактор *Н. Л. Якубовская*

Подписано в печать 13.10.2026. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 11,86. Уч.-изд. л. 9,53.
Тираж 60 экз. Заказ .

Белорусская государственная сельскохозяйственная академия.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/52 от 09.10.2013.
Ул. Мичурина, 13, 213407, г. Горки.

Отпечатано в Белорусской государственной сельскохозяйственной академии.
Ул. Мичурина, 5, 213407, г. Горки.