

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Лабораторный практикум

Красноярск
СФУ
2008

УДК 62–83 (07)
П-17

Рецензент:

А. А. Федоренко, канд. техн. наук, доц. кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ПИ СФУ

Пахомов, А. Н.

П-17 Электрический привод: Учебное пособие по лабораторному практикуму для укрупненной группы направления подготовки бакалавров 140000 – «Энергетика, энергетическое машиностроение и электротехника»/ А. Н. Пахомов, Н. Ф. Лазовский. Красноярск: ИПЦ ПИ СФУ, 2008. 83 с.

Приведены расширенные теоретические сведения, программы и указания для выполнения лабораторных работ по исследованию механических характеристик двигателей в электроприводе; процессов нагрева и охлаждения электрических машин и регулировочных свойств систем электроприводов со статическими преобразователями.

Печатается по решению
Редакционно-издательского совета университета

УДК 62–83 (07)
© СФУ, 2008
© А. Н. Пахомов
Н. Ф. Лазовский

ВВЕДЕНИЕ

В учебных программах дисциплин «Электрический привод» и «Теория электропривода» наряду с теоретическим обучением значительное место отводится выполнению лабораторных работ. Правильное сочетание полученных теоретических знаний и проведенных практических экспериментов на лабораторных установках обеспечивает высокое качество подготовки специалистов.

Проведение лабораторных работ по электрическому приводу помогает выпускнику, обучающемуся в рамках направления подготовки 140200.62 – «Электроэнергетика и электротехника» по квалификации «бакалавр», экспериментально проверить и закрепить полученные теоретические знания и приобрести практические навыки по исследованию и наладке электроприводов. Предлагаемое учебное пособие по лабораторному практикуму содержит необходимые теоретические сведения, задания для домашней подготовки, программу и порядок проведения каждой работы, указания по содержанию отчета и контрольные вопросы. Перечень приведенных лабораторных работ включает изучение характеристик как отдельных двигателей постоянного или переменного тока, так и систем регулируемых электроприводов с современными статическими преобразователями.

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Перед выполнением лабораторной работы студенты должны:

- а) ознакомиться с содержанием работы;
- б) изучить теоретический материал, необходимый для проведения лабораторной работы;
- в) тщательно проработать методику проведения работы и изучить схему экспериментальной установки;
- г) произвести необходимые предварительные расчеты, составить схемы экспериментального исследования и таблицы для записи результатов экспериментов и вычислений.

Студенты, явившиеся на занятия не подготовленными, к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Каждую работу выполняют бригадой студентов в составе 3-5 человек. В процессе эксперимента каждый член бригады выполняет определенные обязанности: снятие показаний измерительных приборов, фиксирование измеренных данных в подготовленных заранее таблицах, управление пускорегулирующей аппаратурой и др.

Отчет о проделанной работе составляется каждым студентом. Требуемое содержание отчета (необходимые схемы, таблицы и графики) указано в методическом описании каждой работы. Графики снятых и рассчитанных зависимостей желательно вычерчивать на миллиметровой бумаге по коорди-

натным осям с соответствующими делениями и обозначениями. После нанесения точек графика их соединяют плавной кривой с учетом возможного «разброса» точек ввиду их неточного снятия во время проведения эксперимента или погрешности расчета.

Кроме того, студент приводит результаты разработки на уровне исследования одного из вопросов по заданию преподавателя. В конце отчета записываются краткие выводы по проделанной работе, дается сравнительная оценка полученных практических результатов с теоретическими сведениями.

Лабораторная работа засчитывается, если студент правильно ответил на вопросы преподавателя, посвященные знанию устройства и принципу работы установки, а также пониманию физических процессов, объясняющих полученные практические результаты при проведении эксперимента. Студент должен уметь объяснить порядок действий, необходимых для выполнения любого эксперимента в лабораторной работе.

Перед началом работы студенты обязаны изучить инструкцию по технике безопасности для работающих в лаборатории и расписаться о прохождении инструктажа в специальном журнале.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Лабораторные стенды в лаборатории электрического привода являются действующими электроустановками, отдельные элементы которых находятся под напряжением. Поэтому при определенных условиях, возникающих из-за нарушения установленных правил, лабораторные стенды могут стать источником поражения человека электрическим током и других видов травматизма. Положение усугубляется еще и особенностью монтажа элементов лабораторного стенда, предусматривающего максимальную доступность учащимся к приборам, машинам и пускорегулирующей аппаратуре, что создает дополнительные опасности при выполнении лабораторных работ.

Тело человека обладает электропроводностью, а поэтому при соприкосновении с двумя неизолированными элементами установки, находящимися под напряжением (одним из этих элементов может оказаться корпус электрической машины или установки), через тело человека проходит электрический ток. Достигнув опасных значений, этот ток приводит либо к сильным ожогам (электрическая травма), либо к тяжелым поражениям нервной, сердечной и дыхательной систем организма человека (электрический удар). Последствия поражения электрическим током бывают тяжелыми и могут привести к смертельному исходу.

Специфика работы учащихся с электрооборудованием состоит в том, что при несоблюдении правил техники безопасности учащийся подвергается не только опасности поражения электрическим током, но и опасности механических ударов со стороны вращающихся частей электрических машин и тормозных

устройств. Необходимо помнить, что многие элементы схемы лабораторной установки, находящиеся под напряжением, доступны для прикосновения, а вращающиеся части, хотя и имеют обычно защитные устройства, все же не исключают «захвата» частей одежды или механического удара. Поэтому учащиеся в лаборатории должны соблюдать исключительную осторожность и **правила техники безопасности**:

- 1) учащийся, находясь в лаборатории, должен:
 - быть предельно дисциплинированным и внимательным;
 - беспрекословно выполнять все указания преподавателей и лаборантов;
 - находиться непосредственно у исследуемой лабораторной установки;
- 2) при проведении лабораторных работ запрещается:
 - подходить к другим установкам, распределительным щитам и пультам и делать на них какие-либо включения или переключения;
 - включать схему под напряжение, если кто-нибудь касается ее изолированной токоведущей части;
 - производить какие-либо пересоединения в схеме, находящейся под напряжением;
 - во время работы электрической машины касаться вращающихся частей или наклоняться к ним близко;
 - оставлять без наблюдения лабораторную установку или отдельные приборы под напряжением;
- 3) при перемещениях движков и рукояток пускорегулирующей аппаратуры необходимо следить за тем, чтобы рука была в соприкосновении только с изолированной рукояткой;
- 4) одежда учащегося не должна иметь свободно свисающих концов шарфов, косынок, галстуков и т. п., а прическа или головной убор должны исключать возможность «свисания» прядей волос;
- 5) о всех замеченных случаях неисправности в работе установок и нарушении правил техники безопасности каждый учащийся должен немедленно доложить преподавателю;
- б) если произошел несчастный случай, лабораторную установку следует немедленно отключить и оказать пострадавшему первую помощь.

Выполнение работ следует производить в полном соответствии с методическими указаниями по работе, строгом соблюдении правил техники безопасности. Если в результате нарушения порядка выполнения лабораторных работ будет нанесен ущерб оборудованию лаборатории, то виновные несут как административную, так и материальную ответственность.

Лабораторная работа № 1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Цель работы: экспериментальным способом определить момент инерции системы электропривода с помощью методов свободного выбега и падающего груза.

1.1. Основные теоретические положения

Современный электропривод представляет собой сложную многомассовую электромеханическую систему, динамические режимы работы которой описываются дифференциальным уравнением высокого порядка. Исследование динамики электропривода существенно усложняется наличием изменяющихся со временем статического момента M_c и момента инерции J . В этом случае дифференциальные уравнения носят нелинейный характер, а их решение в аналитическом виде громоздко или просто нереализуемо. Поэтому практически для решения задач динамики электропривода приходится принимать некоторые допущения. Так, если механические связи многосвязной системы электропривода можно принять абсолютно жесткими и все инерционные массы привести к оси вращения вала двигателя, а также если приведенный момент инерции системы $J_{пр} = \text{const}$, то механический переходный процесс одностепенной системы будет описываться одним дифференциальным уравнением движения для вращательного движения

$$M_d = M_c + J_{пр} \frac{d\omega_d}{dt}, \quad (1.1)$$

устанавливающим связь между моментом M_d , развиваемым электродвигателем на валу, моментом статической нагрузки M_c и моментом динамической нагрузки

$$M_{дин} = J_{пр} \frac{d\omega_d}{dt}, \quad (1.2)$$

где $J_{пр}$ – приведенный момент инерции системы относительно оси вращения вала двигателя с угловой скоростью ω_d .

Из уравнения (1.1) следует, что при постоянной скорости электропривода $\omega_d = \text{const}$ момент, развиваемый электродвигателем, уравновешивается моментом статической нагрузки. Если же в электроприводе возникает режим

работы с изменением угловой скорости (переходной режим), то электродвигатель преодолевает не только на статическую, но и динамическую нагрузки.

Момент статической нагрузки, соответствующий установившемуся режиму работы электропривода, можно представить в виде суммы моментов – момента статического сопротивления рабочего органа M_{po} механизма, обусловленного его полезной работой (например, работой грузоподъемного механизма крана), и момента трения $M_{тр}$, обусловленного силами трения в кинематических звеньях механической части электропривода, Н·м:

$$M_c = M_{po} + M_{тр}. \quad (1.3)$$

Момент трения можно учесть введением в уравнение (1.3) значений КПД механизма η_m и КПД передаточного устройства, например, редуктора η_p . В этом случае момент статического сопротивления механизма равен:

$$M_c = \frac{M_{po}}{\eta i}.$$

где $\eta = \eta_m \eta_p$ – общий КПД устройств механической части электропривода, б/р; $i = \omega_d / \omega_{po}$ – передаточное отношение редуктора, б/р; ω_{po} – угловая скорость вращения вала рабочего органа механизма, c^{-1} .

Динамический момент $M_{дин}$ согласно (1.2) возникает под влиянием ускорений при изменениях скорости движения ω_d . Приведенный момент инерции системы электропривода определяется суммой, $кг \cdot м^2$:

$$J_{пр} = J_d + \sum_{k=1}^n \frac{J_k}{i_k^2},$$

где J_d – момент инерции ротора электродвигателя; J_k – момент инерции k -го элемента механической части, угловая скорость которого меньше в i_k раз по сравнению со скоростью двигателя ω_d .

Мерой инерции вращающихся тел является также маховый момент GD^2 ($кг \cdot м^2$), связанный с моментом инерции зависимостью:

$$GD^2 = m \cdot (2\rho)^2 = 4J, \quad (1.4)$$

где $G = m$ – масса вращающегося тела, кг; D и ρ – диаметр и радиус инерции, м.

Иногда в каталогах для ранее выпускавшихся двигателей указывается значение махового момента $G'D^2$ в $\text{Н}\cdot\text{м}^2$, который больше чем GD^2 в g раз, где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, а G' – сила тяжести вращающегося тела, Н.

Следует иметь в виду, что большинство параметров трудно поддаются расчету и их приходится определять экспериментально. Кроме того, значения многих параметров, приводимых в каталогах, также устанавливаются в результате эксперимента, а их отклонение от фактических значений может достигать 10-20 % [6].

Рассмотрим некоторые способы определения момента инерции электромашинного устройства, определяющего его поведение в динамических режимах работы. Поскольку ротор электродвигателя представляет собой сложную сборку элементов различной формы, изготовленных из различных материалов, поэтому значение момента инерции J_d , как правило, определяется опытным путем.

В данной лабораторной работе рассматривается два метода экспериментального определения приведенного момента инерции и махового момента системы электропривода – метод свободного выбега и метод падающего груза [6]. Сущность первого метода состоит в следующем. Исследуемая установка, включающая в себя электродвигатель и механически соединенные с ним элементы, разгоняется до некоторой установившейся скорости $\omega_{д0}$ в режиме холостого хода (ХХ). После этого электродвигатель отключают от сети и наступает процесс самоторможения, т. е. торможения исключительно за счет внутренних сил трения (трения в подшипниках электродвигателя и сочлененных с ним вращающихся частей о воздух, трения щеток о коллектор и др.). На преодоление этих сил трения затрачивается кинетическая энергия (Дж) запасенная во вращающихся частях агрегата:

$$W_{\text{кин}} = \frac{J_{\text{пр}} \omega_{д0}^2}{2}. \quad (1.5)$$

С другой стороны, эта энергия может быть определена как произведение мощности, затраченной на приведение во вращение агрегата в режиме ХХ $P_{2\text{ХХ}}$ (потери ХХ) на время работы $t_{\text{ХХ}}$:

$$W_{\text{кин}} = P_{2\text{ХХ}} t_{\text{ХХ}}. \quad (1.6)$$

Приравняв (1.5) и (1.6), получим выражение для определения приведенного момента инерции исследуемой системы электропривода:

$$J_{\text{пр}} = \frac{2P_{2\text{xx}}t_{\text{xx}}}{\omega_{\text{д0}}^2}. \quad (1.7)$$

По полученному значению приведенного момента инерции $J_{\text{пр}}$, воспользовавшись зависимостью (1.4), определяют маховый момент системы:

$$GD_{\text{пр}}^2 = 8 \frac{P_{2\text{xx}}t_{\text{xx}}}{\omega_{\text{д0}}^2}. \quad (1.8)$$

Значения $P_{2\text{xx}}$ и t_{xx} , входящие в выражения (1.7) и (1.8), определяют экспериментально, выполнив опыт XX и опыт свободного выбега, предполагающий построение кривой выбега $\omega = f(t)$ (рис. 1.1, а).

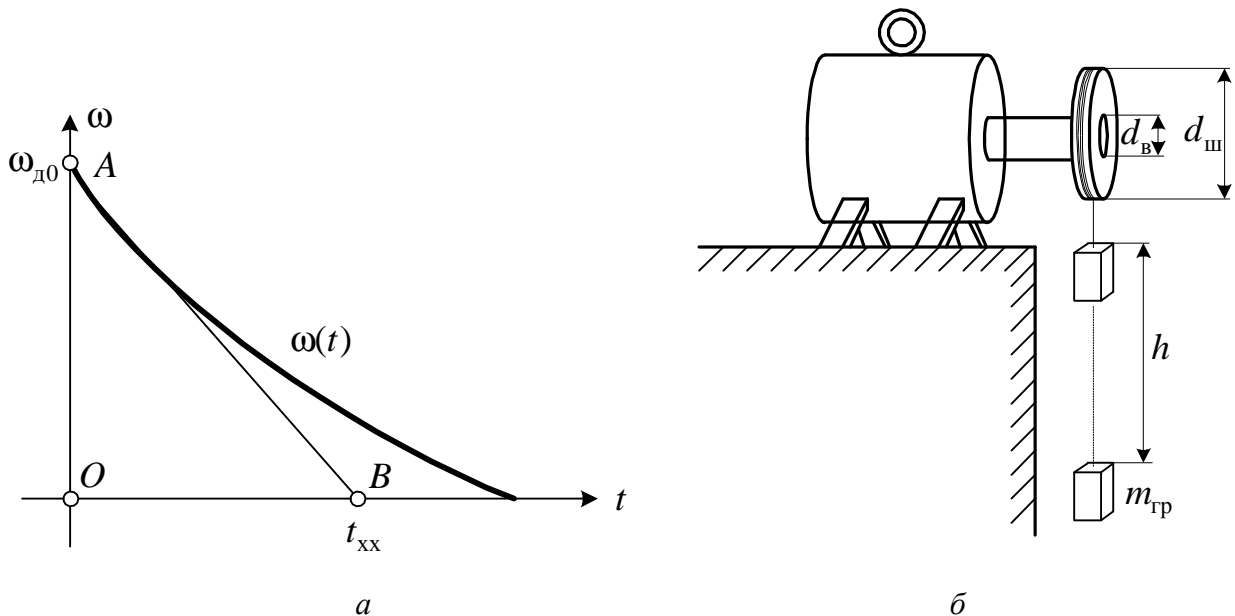


Рис. 1.1

Второй метод определения приведенного момента инерции системы электропривода основан на применении дополнительного груза с известной массой $m_{\text{гр}}$, который подвешивается на шнуре, прикрепленном к шкиву на оси вала двигателя (рис. 1.1, б). Намотав несколько витков шнура на шкив, груз отпускают и дают возможность снизиться на некоторую высоту h . При этом измеряют время спуска $t_{\text{сп}}$. Момент инерции ротора двигателя вместе со шкивом может быть определен по формуле:

$$J_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{гр}}d_{\text{ш}}^2}{4} \left(\frac{gt_{\text{сп}}^2}{2h} - 1 \right), \quad (1.9)$$

где $d_{\text{ш}}$ – диаметр шкива.

Для определения момента инерции шкива необходимо воспользоваться следующим выражением:

$$J_{\text{ш}} = \frac{m_{\text{ш}}}{8} (d_{\text{ш}}^2 + d_{\text{в}}^2) = \frac{\pi \gamma_{\text{ш}} l}{8} (d_{\text{ш}}^4 - d_{\text{в}}^4), \quad (1.10)$$

где $m_{\text{ш}}$, $\gamma_{\text{ш}}$ и $l_{\text{ш}}$ – масса, удельная плотность и толщина шкива, $d_{\text{в}}$ – диаметр вала.

1.2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой агрегат, состоящий из электрического двигателя постоянного тока ДПТ параллельного возбуждения $M1$ (рис. 1.2) и шкива, насаженного на вал $M1$ (рис. 1.1, а).

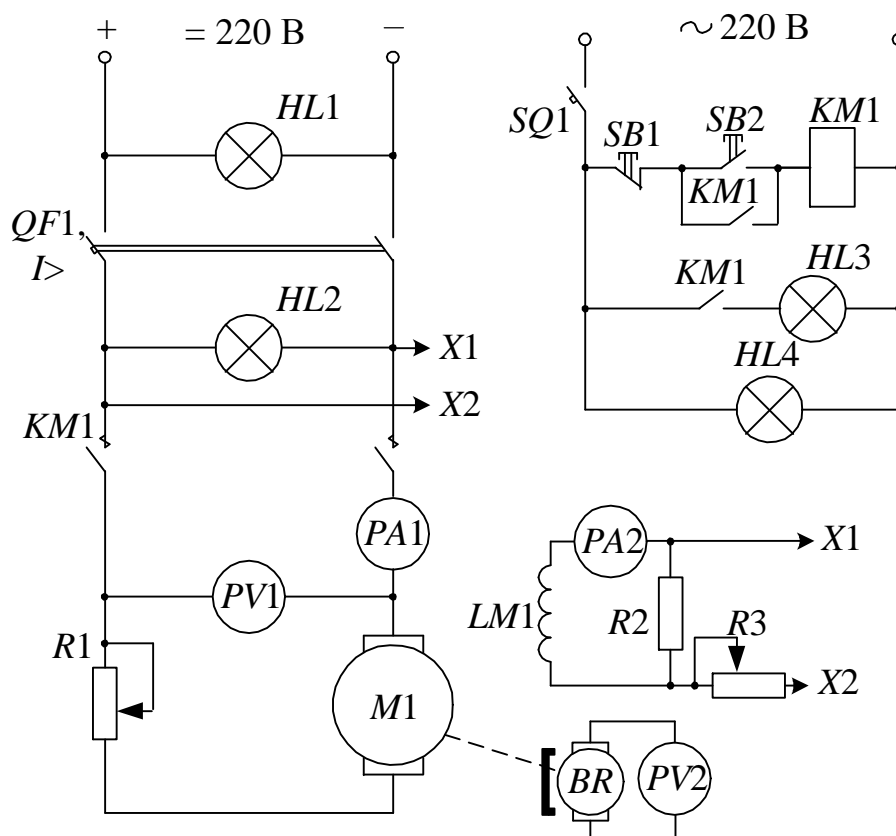


Рис. 1.2

Сигнальные лампы $HL1$ - $HL4$ информируют о текущем состоянии установки: $HL1$ – наличие питания на стенде; $HL2$ – автомат $QF1$ включен; $HL3$ –

наличие напряжения на катушке контактора $KM1$; $HL4$ – наличие питания в цепи управления при замыкании ключа $SQ1$. Двигатель запускается путем нажатия кнопки $SB2$ «Пуск», что приводит к срабатыванию контактора $KM1$, который своими замыкающимися контактами подключает якорь $M1$ к сети постоянного тока последовательно с пусковым реостатом $R1$ для ограничения тока. В цепь якоря также включаются вольтметр $PV1$ для контроля за напряжением сети U_c и амперметр $PA1$ для измерения величины тока в цепи якоря $I_я$. Произведение показаний этих приборов определяет значение мощности, потребляемой двигателем в цепи якоря: $P = U_c \cdot I_я$. Для измерения скорости вращения установки используется тахогенератор BR , позволяющий непрерывно контролировать скорость по показанию прибора $PV2$. Амперметр $PA2$ в цепи обмотки возбуждения $LM1$ двигателя необходим для поддержания тока возбуждения на необходимом уровне. Регулировка тока возбуждения двигателя $M1$ осуществляется с помощью потенциометра $R3$. Кроме того, для проведения эксперимента необходимо использовать секундомер и осциллограф.

1.3. Задание для домашней подготовки

1. Усвоить основные положения разд. 1.1 и повторить теоретический материал, посвященный расчетным схемам механической части системы электропривода, разновидностям уравнений движения электропривода, способам определения и приведения к одной оси вращения моментов инерции [1 – § 1.1-1.2; 2 – § 1.2; 3 – § 2.1-2.3; 4 – § 1.2-1.3; 6 – § 1.2-1.6; 7 – § 2.1-2.3; 8 – § 2.1-2.4; 12 – § 1.1-1.3].

2. Изучить устройство электроустановки и выяснить назначение всех регуляторов, переключателей и измерительных приборов (разд. 1.2).

3. Подготовить отчет для проведения лабораторной работы, содержащий порядок проведения работы, таблицы для занесения результатов опытов, необходимые расчетные формулы, а также примерные графики, ожидаемые при проведении эксперимента.

1.4. Программа работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки.
2. Провести опыт холостого хода.
3. Снять кривую выбега установки.
4. Провести опыт падающего груза
5. Рассчитать момент инерции системы.
6. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

1.5. Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки и записать паспортные данные машины $M1$.

Проверить состояние оборудования перед проведением опытов:

- автомат $QF1$ в нижнем положении (выключен);
- ключ $SQ1$ в нижнем положении (выключен);
- потенциометры $R1$ и $R3$ в крайнем левом положении (полностью введены).

Доложить преподавателю о состоянии готовности установки и подать напряжение на стенд, о чем сигнализирует индикатор $HL1$.

2. Опыт холостого хода

Подключить выводы осциллографа к зажимам прибора $PV2$. Включить автомат $QF1$ (индикатор $HL2$). С помощью потенциометра $R3$ установить номинальный ток в обмотке возбуждения $LM1$ (амперметр $PA2$). Включить ключ $SQ1$ для подачи питания в цепь управления (индикатор $HL4$). Нажать кнопку $SB2$ (индикатор $HL3$) и разогнать двигатель $M1$ путем плавного уменьшения сопротивления $R1$ в цепи якоря (реостат $R1$ полностью выводится). Регулировочным потенциометром $R3$ установить частоту вращения $\omega_{д0} = 1,2\omega_{дном}$. После того как скорость установки достигнет установившегося значения, фиксируются показания приборов $PA1$ (ток якоря в режиме XX $I_{я\text{ }XX}$, А), $PV1$ (напряжение сети U_c , В) и $PV2$ (скорость двигателя $\omega_{д0}$, c^{-1}).

3. Снятие данных для построения кривой выбега

После снятия показаний приборов при опыте XX нажимают кнопку $SB1$ «Стоп» и отключают электродвигатель от сети. В процессе самоторможения установки с помощью осциллографа необходимо 6-8 раз измерить скорость вращения $\omega_{д0}$ с одновременным фиксированием времени, соответствующего каждому измерению. Первый замер частоты вращения делают в момент отключения электродвигателя, т. е. в момент времени $t = 0$, а последний – при полной остановке агрегата, т. е. при $\omega = 0$. Особенно внимательно следует отнестись к измерениям при первых трех замерах, следующих непосредственно после отключения электродвигателя, так как точность этих измерений в значительной степени влияет на результаты лабораторной работы [5].

4. Опыт с падающим грузом

Для использования второго метода определения приведенного момента инерции системы электропривода необходимо взять груз с заданной преподавателем массой $m_{гр}$ (кг), который подвешивается на шнуре и прикрепляется к шкиву на оси вала двигателя (рис. 1.1, б). Намотав шнур на шкив, отпускают груз и одновременно запускают секундомер. После спуска груза на заданную высоту h (м) необходимо зафиксировать время $t_{сп}$ (с).

5. Расчет момента инерции установки

Для того чтобы воспользоваться выражениями (1.7) и (1.8) для определения приведенного момента инерции установки, необходимо определить значения мощности $P_{2\text{xx}}$ и времени t_{xx} .

Мощность, затрачиваемую на вращение установки в режиме XX можно рассчитать по формуле, Вт:

$$P_{2\text{xx}} = P_{\text{яxx}} - (\Delta P_{\text{эя}} + \Delta P_{\text{эщ}}), \quad (1.11)$$

где $P_{\text{яxx}} = U_{\text{с}} I_{\text{яxx}}$ – мощность XX в цепи якоря электродвигателя, Вт; $\Delta P_{\text{эя}} = I_{\text{яxx}}^2 R_{\text{яд}}$ – электрические потери в обмотках цепи якоря, Вт; $R_{\text{яд}} \cong 0,5 R_{\text{н}} (1 - \eta_{\text{н}})$ – активное сопротивление обмоток якорной цепи двигателя, Ом; $R_{\text{н}} = U_{\text{н}} / I_{\text{н}}$ – номинальное сопротивление двигателя, Ом; $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$ и $\eta_{\text{н}}$ – номинальные значения напряжения якоря (В), тока (А) и КПД (б/р) двигателя (паспортные данные); $\Delta P_{\text{эщ}} = I_{\text{яxx}} \Delta U_{\text{щ}}$ – электрические потери в щеточном контакте, Вт; $\Delta U_{\text{щ}}$ – падение напряжения в контакте щеток, принимаемое $\Delta U_{\text{щ}} = 2$ В.

На основании данных из пункта 3 строится кривая выбега $\omega = f(t)$. Для определения времени t_{xx} на графике кривой выбега проводят касательную к начальной части кривой в точке *A* (рис. 1.1, *a*) до пересечения с осью абсцисс в точке *B*. Полученный таким образом отрезок *OB* на оси абсцисс и определит время t_{xx} .

Для определения приведенного момента инерции установки по формуле (1.9) необходимо использовать данные из пункта 4.

При необходимости (указывается преподавателем) по формуле (1.10) рассчитать момент инерции шкива по его геометрическим параметрам и определить момент инерции и маховый момент якоря двигателя.

5. Анализ результатов лабораторной работы

Анализируя результаты лабораторной работы, необходимо иметь в виду следующее. При расчете момента инерции в выражениях (1.7) и (1.8) предусмотрена подстановка значения мощности механических потерь, затраченной на приведение во вращение установки с частотой вращения. Рассчитанное значение мощности $P_{2\text{xx}}$ по формуле (1.11) является приближенным, поэтому полученное значение приведенного момента инерции может отличаться от фактического.

С целью корректировки величины приведенного момента инерции $J_{\text{пр}}$ системы необходимо использовать среднее значение, полученное из двух опытов:

$$J_{\text{ср}} = \frac{J_{\text{пр1}} + J_{\text{пр2}}}{2}$$

где $J_{\text{пр1}}$ – приведенный момент инерции из опыта свободного выбега; $J_{\text{пр2}}$ – приведенный момент инерции из опыта падающего груза.

1.6. Содержание отчета

1) Схема лабораторной установки; 2) паспортные данные машины и приборов; 3) таблицы с опытными и расчетными данными; 4) основные расчетные формулы; 5) кривая выбега; 6) краткие выводы по работе.

1.7. 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 системы электропривода?

3. На чем основан метод свободного выбега для определения момента инерции системы электропривода?

4. Как изменится время выбега агрегата, если на валу двигателя установить маховик?

5. Что представляет собой кривая выбега и каков порядок снятия данных для ее построения?

6. Чему равен суммарный момент двигателя при его работе в установившемся и переходном режимах?

7. Какова размерность момента инерции и махового момента тела вращения?

8. Что нужно сделать для использования основного уравнения движения электропривода, если рабочий орган машины связан с валом электродвигателя через механическое передаточное звено?

9. Каким образом осуществляется приведение статического момента сопротивления и момента инерции рабочего органа к валу электродвигателя, если между ними имеется механическая передача?

10. Что такое динамический момент и каким образом он влияет на поведение системы электропривода?

11. Почему значения момента инерции электропривода, полученные опытным путем, отличаются от фактического значения?

12. Каким образом осуществляется приведение параметров поступательного движения рабочего органа к вращательному движению вала двигателя?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: изучение механических характеристик двигателя постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения в двигательном и тормозных режимах работы.

2.1. Основные теоретические положения

Уравнение механической характеристики ДПТ независимого возбуждения имеет вид:

$$\omega = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_{яц}}{c_E c_M \Phi^2} M = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (2.1)$$

где U – напряжение питания, В;

Φ – магнитный поток двигателя, Вб;

M – электромагнитный момент двигателя, Н·м;

ω – скорость вращения якоря, с⁻¹;

c_E, c_M – конструктивные постоянные двигателя;

ω_0 и $\Delta\omega$ – скорость идеального холостого хода и изменение частоты, вызванное приложением нагрузки к двигателю, с⁻¹.

Электрическое сопротивление цепи якоря ДПТ $R_{яц}$ (Ом) равно сумме активного сопротивления якорной обмотки двигателя $R_{яд}$, приведенного к рабочей температуре, и добавочного сопротивления $R_{доб}$, включенного в цепь якоря ДПТ.

Из уравнения (2.1) следует, что скорость двигателя ω можно регулировать изменением активного сопротивления в цепи якоря $R_{яц}$, потока возбуждения Φ и подводимого к якорю напряжения U . Примерный вид характеристик для этих способов показан на рис. 2.1, а (жирные линии), там же приведена естественная характеристика (добавочное сопротивление $R_{доб} = 0$).

Для ДПТ независимого возбуждения возможны следующие режимы работы:

- а) двигательный (основной) режим;
- б) режим генераторного торможения с отдачей энергии в сеть (рекуперативное торможение);
- в) режим торможения противовключением;
- г) режим динамического торможения.

Момент M и скорость ω ДПТ в *двигательном* режиме имеют одинаковые знаки, причем $\omega < \omega_0$. Механические характеристики двигателя расположены в первом квадранте осей координат (ω, M).

В тормозном режиме *с отдачей энергии в сеть* (рекуперативное торможение) скорость двигателя ω становится больше ω_0 за счет действия на его вал дополнительного момента, совпадающего по направлению с моментом, развиваемым двигателем. В этом случае ЭДС якоря $E = c_E \Phi \omega$ (В) становится больше напряжения сети $U = c_E \Phi \omega_0$ и ток якоря I_a (А) изменяет свое направление по сравнению с двигательным режимом. Следовательно, меняет свое направление и электромагнитный момент двигателя $M = c_M \Phi I_a$ и становится тормозящим. Механические характеристики ДПТ в этом режиме расположены во втором квадранте осей (ω, M) и продолжают его характеристики для двигательного режима (рис. 2.1, а). Уравнение характеристик в тормозном генераторном режиме имеет вид, аналогичный (2.1), но величина $\Delta\omega$ приобретает отрицательный знак ($\Delta\omega < 0$).

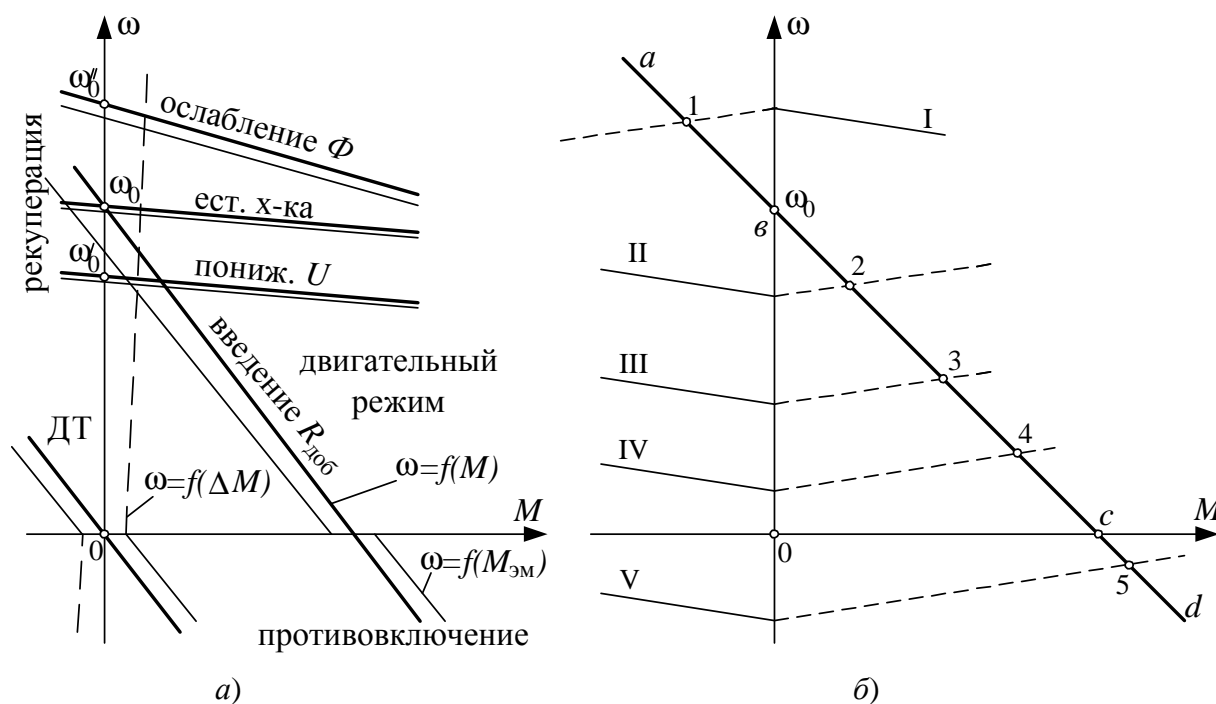


Рис. 2.1

Рекуперативное торможение широко используется для тормозного спуска грузов. Он возникает, когда двигатель включается в сеть так, что его момент в двигательном режиме направлен в сторону опускания груза. Так как в двигательном режиме момент двигателя и активный момент статический момент направлены согласно, то двигатель переходит в генераторный режим и его момент оказывается направленным против скорости и статического момента. Естественно в таком тормозном режиме невозможно остановить механизм.

В режиме торможения *противовключением* якорь двигателя под действием внешнего момента или сил инерции вращается в сторону, обратную действию момента, развиваемого двигателем. Следовательно, ЭДС якоря E меняет свое направление и действует согласно с приложенным напряжением U . Чтобы ограничить ток $I_{\text{я}}$ в цепь якоря необходимо включить добавочное сопротивление $R_{\text{доб}}$. Механические характеристики ДПТ в этом режиме (при потенциальном статическом моменте) расположены в четвертом квадранте осей (ω, M) и являются продолжением характеристик двигательного режима (рис. 2.1, *a*). Режим противовключения часто используется для торможения электродвигателей, а, кроме того, возникает при их реверсе. Торможение в режиме противовключения и реверс осуществляются обычно путем переключения полярности напряжения на зажимах якоря двигателя. Для ограничения тока якоря и момента в цепь якоря также включается дополнительное сопротивление.

Динамическое торможение (ДТ) имеет место при отключении якоря двигателя от сети и замыкании его на активное сопротивление $R_{\text{доб}}$. Обмотка возбуждения при этом остается подключенной к источнику напряжения. В этом случае машина работает генератором либо за счет кинетической энергии, запасенной во вращающихся частях самой машины и исполнительного механизма, либо за счет потенциальной энергии отпускаемого груза. Энергия, вырабатываемая ДПТ в режиме ДТ, преобразуется в тепловую энергию, выделяясь на сопротивлении $R_{\text{яц}} = R_{\text{яд}} + R_{\text{доб}}$. ЭДС якоря E сохраняет свое направление $(\omega > 0)$, а ток якоря $I_{\text{я}}$ становится отрицательным – направлен согласно с ЭДС якоря, так как напряжение $U = 0$. Соответственно момент ДПТ M также становится отрицательным, т. е. тормозным. При реактивном моменте сопротивления на валу механическая характеристика расположена во втором квадранте (рис. 2.1, *a*) и описывается уравнением

$$\omega = -\frac{(R_{\text{яд}} + R_{\text{доб}})M}{c_E c_M \Phi^2}. \quad (2.2)$$

Следует отметить, что в тормозных режимах работы ДПТ момент M и скорость ω имеют разные знаки.

Режим динамического торможения применяется главным образом для остановки электропривода.

Из приведенных выше тормозных режимов ДПТ наиболее простым и экономичным является рекуперативное торможение. Для его обеспечения нет необходимости изменять схему включения ДПТ и вводить какие-либо сопротивления. Кроме того, в этом режиме происходит возврат энергии в сеть. Однако с помощью рекуперативного торможения невозможно остановить привод $(\omega > \omega_0)$. Торможение противовключением возможно при любой скорости, вплоть до полной остановки привода. Однако, и этому способу присущи

недостатки – возможность самопроизвольного реверса, значительные потери энергии в добавочном сопротивлении и большая крутизна механических характеристик. Динамическое торможение – надежный и простой способ торможения до полной остановки привода, но «тормозной эффект» снижается при уменьшении скорости. Снижение эффективности динамического торможения при уменьшении скорости компенсируется применением других способов торможения, например, с помощью механического тормоза.

Построение естественной механической характеристики ДПТ независимого возбуждения ввиду ее прямолинейности ведется по двум характерным точкам: идеальный холостой ход с координатами $(\omega_0, 0)$ и двигательный режим работы с номинальной нагрузкой на валу с координатами (ω_n, M_n) .

Скорость идеального холостого хода и номинальное значение момента можно определить в соответствии с выражениями

$$\omega_0 = \frac{U_n \omega_n}{U_n - I_n R_{яд}} \text{ и } M_n = \frac{U_n - I_n R_{яд}}{\omega_n} I_n, \quad (2.3)$$

где активное сопротивление обмоток якорной цепи двигателя определяется по приближенной формуле $R_{яд} \cong \frac{U_n (1 - \eta_n)}{2I_n}$, а остальные величины являются паспортными данными электродвигателя.

При введении добавочного активного сопротивления $R_{доб}$ в якорную цепь ДПТ скорость идеального холостого хода при номинальных значениях напряжения U_n и магнитного потока Φ_n не изменится:

$$\omega_0 = \frac{U_n}{c_E \Phi_n} = \text{const},$$

а наклон характеристик будет увеличиваться пропорционально суммарному активному сопротивлению якорной цепи $R_{яц} = R_{яце} + R_{доб}$:

$$\Delta\omega = \frac{I \cdot R_{яц}}{c_E \Phi_n} = \frac{M \cdot R_{яц}}{c_E c_M \Phi_n^2}.$$

Используя последнее выражение, можно построить искусственные характеристики при заданном $R_{доб}$ или определить величину $R_{доб}$ для требуемой искусственной характеристики.

При уменьшении магнитного потока скорость идеального холостого хода $\omega_0 = U_n / c_E \Phi$ увеличивается. Так как ток короткого замыкания не зависит от степени ослабления поля, все электромеханические характеристики

пересекаются в одной точке $I_{кз} = U_n / R_{яцe}$ (рис. 2.2, а). При этом следует помнить, что ток короткого замыкания для нормальных машин может во много раз превосходить допустимый (нерабочие участки изображены пунктирными линиями). Момент короткого замыкания $M_{кз} = c_M I_{кз} \Phi$ при $I_{кз} = \text{const}$ уменьшается с уменьшением потока. В результате механические характеристики имеют вид прямых, показанных на рис. 2.2, б.

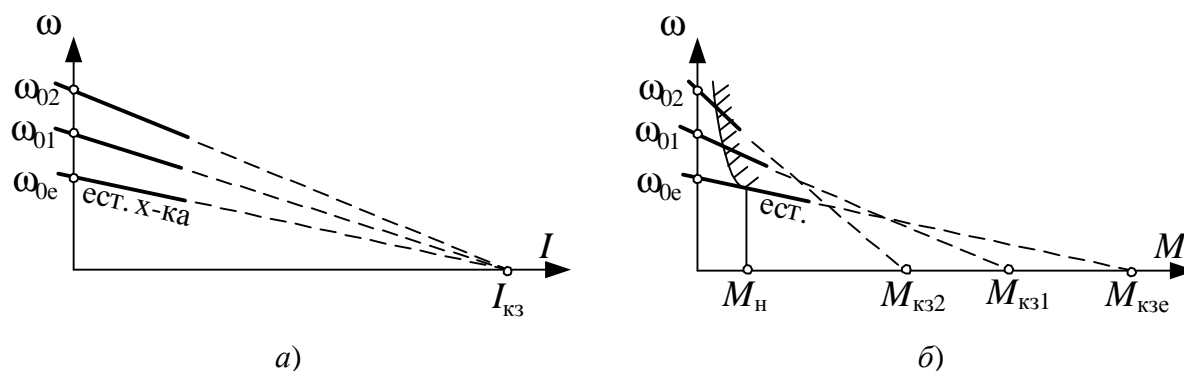


Рис. 2.2

При снижении (по условиям перегрева обмоток) питающего якорь ДПТ напряжения (ЭДС питающего ДПТ преобразователя $E_{п}$) согласно (2.1) пропорционально уменьшается только ω_0 , а $\Delta\omega$ не зависит от U . Таким образом, семейство искусственных характеристик при $c_E \Phi_n = \text{const}$ – это параллельные прямые (рис. 2.1, а) с наклоном несколько большим, чем у естественной характеристики ДПТ, поскольку суммарное сопротивление якорной цепи включает активное сопротивление преобразователя $R_{яц} = R_{яцe} + R_{п}$.

2.2. Описание лабораторной установки

При исследовании механических характеристик электродвигателя требуется изменять нагрузку на его валу от нуля до предельно возможной величины. Изменение нагрузки при помощи механических и электродинамических тормозов возможно только в двигательном режиме работы машины. При этом энергия, потребляемая двигателем из сети, безвозвратно теряется, превращаясь в тепло.

Наиболее удобным способом изменения нагрузки является использование вспомогательной электрической машины постоянного тока $M2$ (рис. 2.2) с независимым возбуждением, механически соединенной с валом испытуемого двигателя $M1$. В этом случае возможно проводить испытания машины как в двигательном, так и в тормозных режимах ее работы. При исследовании характеристик двигательного режима вспомогательная машина $M2$ используется в качестве нагрузочного генератора. При исследовании тормозных режимов она служит двигателем, вращающим вал испытуемой машины.

В лабораторной работе, независимо от режима работы испытуемого двигателя, якорь нагрузочной машины включен по схеме генератор-двигатель (Г-Д) с дополнительной машиной постоянного тока $M3$, которая вращается с постоянной скоростью асинхронным двигателем $M4$ (рис. 2.3). Изменение величины тока возбуждения обмотки $LM3$ позволяет плавно регулировать ЭДС машины $M3$ и обеспечить широкое и устойчивое регулирование скорости машины $M2$, что в свою очередь дает возможность снять характеристики испытуемой машины $M1$ в любом режиме работы.

Ток возбуждения машины $M2$ регулируется реостатом $R4$ и в течение всей лабораторной работы значение этого тока поддерживается строго постоянным. Ток возбуждения машины $M3$ регулируется в широких пределах потенциометром $R5$. При этом переключатель $SA2$ позволяет изменять направление этого тока, что дает возможность изменять знак напряжения на зажимах якоря машины $M2$.

Начинать исследовать характеристику ДПТ независимого возбуждения $M1$, которая может быть представлена прямой линией (реакция якоря не учитывается), лучше всего из области рекуперативного торможения в область двигательного режима работы, а затем в область торможения противовключением (прямая $abcd$ на рис. 2.1, б).

В генераторном режиме (рекуперативное торможение) скорость вращения $M1$ должна быть выше скорости идеального холостого хода ω_0 . Это достигается увеличением тока возбуждения машины $M3$. Установив максимально допустимое значение скорости $M1$, можно приступить к снятию точек характеристики. При этом фиксируется скорость машины $M2$ (соответственно и жестко связанной с ней машины $M1$) с помощью вольтметра $PV2$, подключенного к зажимам якоря тахогенератора BR , и ток в якорной цепи машины $M2$ на амперметре $PA3$. При работе $M1$ генератором (участок ab на рис. 2.1, б) машина $M2$ является двигателем (прямая I), $M3$ – генератором, а $M4$ – двигателем. В точке 1 нагрузочная машина $M2$ уравнивает момент $M1$. Равенство моментов $M1$ и $M2$ обеспечивает установившийся режим работы, поэтому точки снимаемой характеристики определяются пересечением механических характеристик $M1$ с зеркальным отражением характеристик $M2$ относительно оси ординат (пунктирные линии на рис. 2.1, б).

По мере снижения тока возбуждения $M3$ скорость $M2$ уменьшается, и исследуемая машина $M1$ автоматически переходит из генераторного режима работы в двигательный (точка перехода $b - \omega_0$). После этого машина $M2$ работает генератором (прямые II, III, IV), а $M3$ – двигателем. Равенство моментов двигателя $M1$ и генератора $M2$ на характеристиках II, III, IV определяет соответственно точки 2, 3 и 4 механической характеристики $M1$.

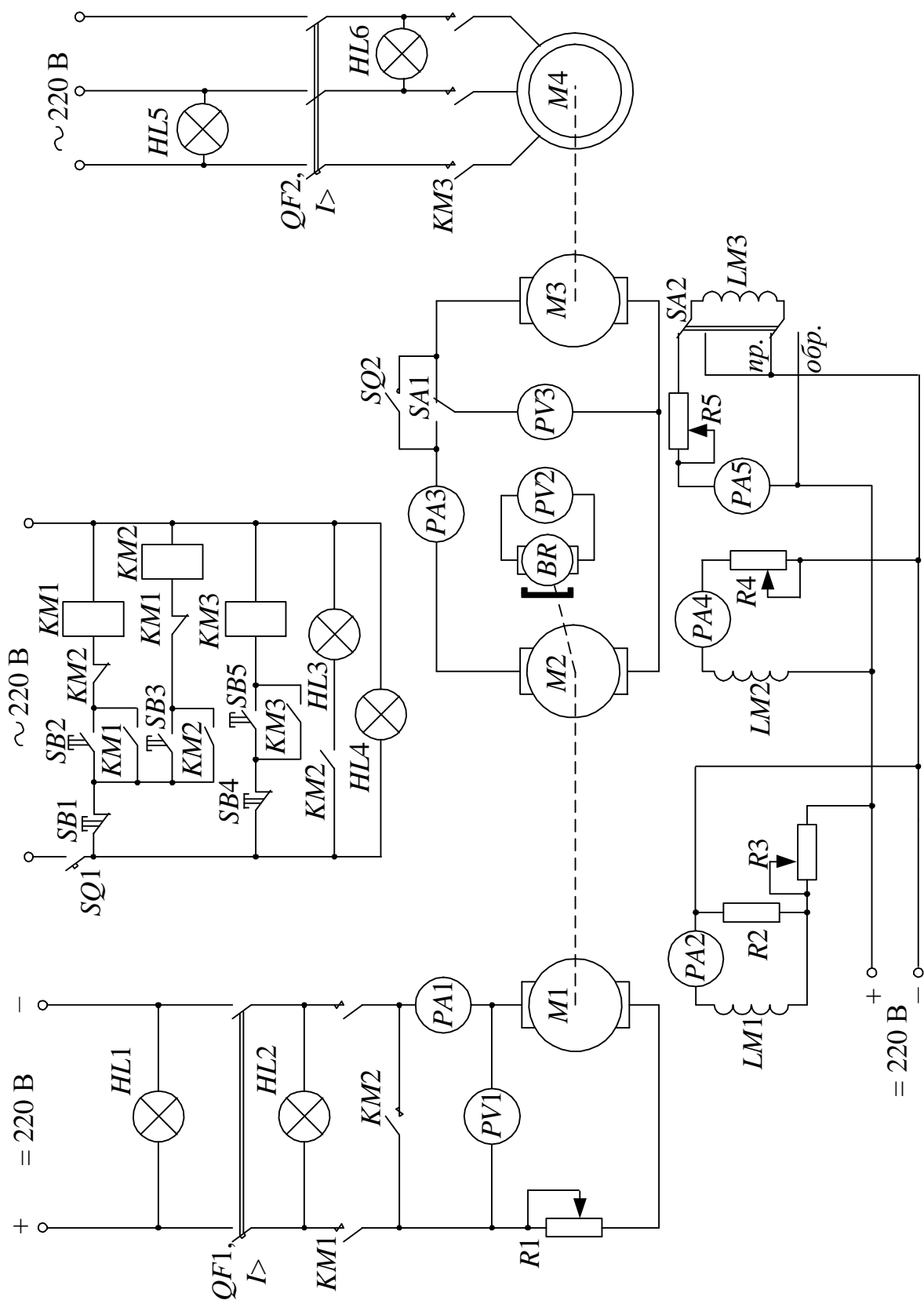


Рис. 2.3

При скорости $M1$, соответствующей точке 4, ток возбуждения $M3$ равен нулю. Машина $M3$ в данном случае работает в режиме динамического торможения на активное сопротивление якорной цепи. Для снятия точек характеристики на участке от точки 4 до точки c необходимо переключением тумблера $SA2$ изменить направление тока возбуждения $M3$ на обратное и постепенно его увеличивать.

При смене направления вращения $M1$ (четвертый квадрант) испытываемая машина из двигательного режима переходит в тормозной режим противовключения (точка перехода c). При этом $M2$ работает двигателем, $M3$ – генератором и $M4$ – двигателем.

В *установившихся режимах* момент на валу испытываемой машины $M1$

$$M = M_{эм} \pm \Delta M, \quad (2.4)$$

где $M_{эм}$ – электромагнитный момент нагрузочной машины $M2$;

ΔM – момент, обусловленный потерями в нагрузочной машине.

Знак плюс в выражении соответствует двигательному режиму работы испытываемой машины $M1$, когда она покрывает потери в агрегате. Знак минус соответствует генераторному режиму и торможению противовключением испытываемой машины, когда потери в агрегате покрывает нагрузочная машина $M2$, работающая двигателем.

По принятой схеме эксперимента электромагнитный момент $M2$ определяется по его току якоря $I_я$ на амперметре $PA3$. При постоянном токе возбуждения электромагнитный момент нагрузочной машины

$$M_{эм} = c_M \Phi I_я. \quad (2.5)$$

Коэффициент пропорциональности $c_M \Phi$ между током и моментом определяют *тарированием* нагрузочной машины $M2$. При разомкнутой цепи якоря $M2$ (ключ $SQ2$ разомкнут) запускается в ход $M1$ и измеряется вольтметром $PV3$ ЭДС $M2$ на ее якоре, а вольтметром $PV2$ – скорость ее вращения.

Коэффициент $c_M \Phi$ определяют по формуле

$$c_M \Phi = \frac{E_{M2}}{\omega} = \frac{60}{2\pi} \frac{E_{M2}}{n}, \quad (2.6)$$

где n – скорость машины $M2$, об/мин.

Следовательно, при постоянном токе возбуждения машины $M2$ экспериментальная характеристика $\omega = f(I_я)$ в соответствующем масштабе представляет зависимость $\omega = f(M_{эм})$. Кривая $\omega = f(M_{эм})$ имеет разрыв при изменении знака скорости. Это объясняется тем, что знак момента, обусловлен-

ного потерями в стали машины $M2$ и механическими потерями в машинах $M1$ и $M2$, зависит от направления вращения (рис. 2.1, *a*).

При определении момента на валу испытуемой машины $M1$ необходимо учитывать момент потерь ΔM (2.4). С этой целью снимается кривая потерь, которая представляет собой зависимость $\omega = f(\Delta I)$, где ΔI – ток якоря нагрузочной машины $M2$ при отключенном испытуемом двигателе $M1$.

Пользуясь кривой $\omega = f(\Delta I)$ с учетом коэффициента пропорциональности между током и моментом $c_M \Phi$, можно получить зависимость $\omega = f(\Delta M)$. Кривая момента потерь (рис. 2.1, *a*) является разрывной, так как при изменении направления вращения ток в якоре нагрузочной машины изменяет свой знак.

Зная зависимость $\omega = f(M_{эм})$ и $\omega = f(\Delta M)$, можно построить механическую характеристику испытуемого двигателя. Эта характеристика (рис. 2.1, *a*), в отличие от ее составляющих, имеет неразрывный характер.

2.3. Задание для домашней подготовки

1. Усвоить основные положения разд. 2.1 и повторить теоретический материал, посвященный режимам работы ДПТ независимого возбуждения и условиям перехода электродвигателя из одного режима работы в другой [1 – § 2.3-2.11; 2 – § 2.3; 3 – § 3.1-3.4; 4 – § 2.2-2.7; 6 – § 2.3-2.7; 7 – § 4.1-4.3, 4.12, 4.15, 4.16; 9 – § 3.1-3.6].

2. Изучить устройство электроустановки и выяснить назначение всех регуляторов, переключателей и измерительных приборов (разд. 2.2).

3. Подготовить отчет для проведения лабораторной работы, содержащий порядок проведения работы, таблицы для занесения результатов опытов, необходимые расчетные формулы, а также примерные графики, ожидаемые при проведении эксперимента.

2.4. Программа работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки.
2. Протарировать нагрузочную машину $M2$.
3. Снять кривую потерь $\omega = f(\Delta I)$.
4. Снять скоростную характеристику машины $M2$ $\omega = f(I_a)$, а затем с учетом кривой потерь построить механическую характеристику испытуемого двигателя $M1$ $\omega = f(M)$ при указанных ниже условиях.
 - 4.1. Номинальный магнитный поток $M1$ и отсутствие добавочных сопротивлений в цепи якоря.
 - 4.2. Номинальный магнитный поток $M1$ и разные значения добавочного сопротивления в цепи якоря:
 - а) в двигательном режиме;
 - б) в режиме торможения противовключением.

- 4.3. Ослабленный магнитный поток $M1$ и отсутствие добавочных сопротивлений в цепи якоря.
 - 4.4. Динамическое торможение $M1$.
 - 4.5. Питание $M2$ от генератора постоянного тока $M3$.
5. Рассчитать механические характеристики и провести их анализ.

2.5. Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки и записать паспортные данные машин $M1 - M4$.

Проверить состояние оборудования перед проведением опытов:

- автоматы $QF1$ и $QF2$ в нижнем положении (выключены);
- тумблеры $SA1$ и $SA2$ в нижнем положении;
- ключи $SQ1$, $SQ2$ в нижнем положении (выключены);
- потенциометры $R1$ и $R5$ в крайнем левом положении (полностью введены).

Доложить преподавателю о состоянии готовности установки и подать напряжение на стенд, о чем сигнализируют индикаторы $HL1$ и $HL5$.

При работе с установкой **запрещается**:

- а) переводить ключ $SQ2$ в положение «Вкл» при несовпадении по величине и по знаку напряжений $M2$ и $M3$;
- б) допускать превышение тока в якорной цепи машин $M1 - M3$ значения $1,2I_n$;
- в) разгонять машину $M1$ до скорости вращения, превышающей номинальную более чем на 30 %.

2. Тарирование нагрузочной машины $M2$

Включить автоматы $QF1$ и $QF2$ (индикаторы $HL2$ и $HL6$). Резистором $R4$ установить ток в обмотке возбуждения $LM2$ равным 0,75 А ($PA4$) и поддерживать его постоянным в течение всей работы. Резистором $R3$ установить номинальное значение тока в обмотке возбуждения $LM1$ ($PA2$).

Подать питание в цепь управления при помощи ключа $SQ1$ (индикатор $HL4$). Нажать кнопку «Пуск» $SB2$ (срабатывает контактор $KM1$ и подключает якорную цепь машины $M1$ к сети) и разогнать $M1$ до номинальной скорости путем уменьшения величины $R1$. Зафиксировать значения ЭДС $M2$ ($PV3$) и скорости ($PV2$) и определить коэффициент пропорциональности $c_{M\Phi}$ машины $M2$ по формуле (2.6). Остановить двигатель $M1$, плавно увеличивая сопротивление $R1$, и нажать кнопку «Стоп» $SB1$.

3. Снятие кривой потерь $\omega = f(\Delta I)$

Замкнуть ключ $SQ2$; резисторы $R1$ и $R5$ в крайнем левом положении (полностью введены); тумблеры $SA1$ и $SA2$ в нижнем положении.

Нажав кнопку «Пуск» $SB5$ (срабатывает контактор $KM3$ и подключает машину $M4$ к трехфазной сети), запустить $M4$. Резистором $R5$ увеличивать ток $LM3$ ($PA5$) от 0 до 0,5 А с шагом 0,1 А. При этом фиксируются показания скорости ω ($PV2$) и тока I ($PA3$) машины $M2$. После этого резистором $R5$

уменьшить ток $LM3$ до 0, перевести $SA2$ в положение «Вверх» и снять вторую ветвь кривой потерь. После чего уменьшить ток $LM3$ до 0, перевести $SA2$ в положение «Вниз» и отключить $SQ2$.

4. Снятие электромеханических характеристик

4.1. Естественная характеристика $\omega = f(I_{я})$

В исходном состоянии $R1$ в крайнем левом положении (полностью введен) значение тока в обмотке возбуждения $LM1$ ($PA2$) равно номинальному, машина $M4$ подключена к сети и приводит во вращение машину $M3$.

4.1.1. Запуск испытуемого двигателя $M1$

Нажать кнопку «Пуск» $SB2$ и разогнать $M1$ до номинальной скорости путем уменьшения величины $R1$ (ЭДС $M2$ по $PV3$ не больше 230 В). Перед включением $SQ2$ необходимо согласовать величину и направление напряжений на зажимах машин $M2$ и $M3$ для исключения больших бросков тока в цепи якоря.

4.1.2. Согласование напряжений машин $M2$ и $M3$

При помощи тумблера $SA1$ измерить напряжение в якорной цепи машин $M2$ и $M3$. При несовпадении напряжений по направлению при нулевом токе в $LM3$ ($PA5$) ключ $SA2$ перевести в противоположное положение. Требуемую величину напряжения $M3$ установить резистором $R5$. **Только при совпадении напряжений по величине и направлению перевести $SQ2$ в верхнее положение (замкнуть якорные цепи машин $M2$ и $M3$).**

4.1.3. Снятие скоростной характеристики $\omega = f(I_{я})$

Уменьшая ток $LM3$ до нуля, снять 4-6 значений тока ($PA3$) и скорости ($PV2$). Следить за выполнением условия $I_{я} < 1,2I_{н}$.

После снятия характеристики резистором $R5$ установить ток в якорной цепи $M2$ и $M3$ ($PA3$) равным нулю. Отключить $SQ2$.

4.2. Реостатные характеристики $\omega = f(I_{я})$

4.2.1. Двигательный режим

Резистором $R1$ установить указанное преподавателем значение ЭДС машины $M2$ ($PV3$). Дальнейшая методика снятия характеристики производится по пунктам 4.1.2 – 4.1.3. При нулевом значении тока $LM3$ тумблер $SA2$ переключить вверх и, увеличивая ток $LM3$, продолжить снятие характеристики до остановки $M1$. После остановки машины $M1$ перейти к выполнению пункта 4.2.2.

4.2.2. Режим торможения противовключением

Характеристики машины $M1$ в режиме торможения противовключением являются продолжением характеристик двигательного режима. Увеличивая ток $LM3$, снять 2-4 значения тока ($PA3$) и скорости ($PV2$). Следить за выполнением условия $I_{я} < (1,2 \div 1,3)I_{н}$.

После завершения опыта резистором $R5$ уменьшить ток $LM3$ до нуля, тумблер $SA2$ переключить вниз и, увеличивая ток $LM3$, добиться нулевого значения тока $PA3$ и отключить $SQ2$.

4.3. Снятие характеристик двигателя при ослабленном потоке

Разогнать $M1$ до номинальной скорости путем уменьшения величины $R1$ (ЭДС $M2$ по $PV3$ не больше 230 В). Резистором $R3$ уменьшить ток $LM1$, т. е. ослабить поток испытуемой машины (следить за выполнением условия $\omega < 1,3 \cdot \omega_n$). Дальнейшая методика снятия характеристики проводится по пунктам 4.1.2 – 4.1.3. По окончании опыта резистором $R3$ установить номинальное значение тока в обмотке возбуждения $LM1$ ($PA2$).

4.4. Режим динамического торможения $M1$

Остановить двигатель $M1$, переводя ручку реостата $R1$ в крайнее левое положение, и нажать кнопку «Стоп» $SB1$.

Нажать кнопку «ДТ» $SB3$ (индикатор $HL3$). При токе $LM3$ равном нулю включить $SQ2$. Резистором $R5$ установить скорость вращения $M2$, соответствующую напряжению питания 220 В. Резистором $R1$ установить указанное преподавателем значение тока по $PA1$. Уменьшая ток $LM3$ до нуля, снять 4-6 значений тока ($PA3$) и скорости ($PV2$).

Опыт повторить для напряжения питания $M2$ 110 В.

После завершения опыта перевести $R1$ в крайнее левое положение и уменьшить ток $LM3$ до нуля, затем отключить $SQ2$.

4.5. Снятие характеристики двигателя при питании его по системе Г-Д

В данном опыте испытуемым двигателем является машина $M2$. $M1$ служит нагрузочной машиной.

При токе $LM3$ равном нулю включить $SQ2$. Резистором $R5$ установить напряжение $M3$ равным 150 В. Изменяя нагрузку $M2$ сопротивлением $R1$, снять показания скорости ($PV2$) и тока ($PA3$).

Опыт повторить при напряжении $M3$ равном 100 В.

После завершения опыта перевести $R1$ и $R5$ в крайнее левое положение, ключ $SQ2$ перевести в положение «Откл».

5. Окончание лабораторной работы

Нажать кнопку «Стоп» $SB1$. Остановить машину $M4$, нажав кнопку «Стоп» $SB4$. Разомкнуть ключ $SQ1$ и отключить автоматы $QF1$ и $QF2$. Сообщить преподавателю об окончании проведения лабораторной работы.

6. Расчет механических характеристик и анализ результатов

Расчет механических характеристик исследуемой машины $M1$ производится в следующем порядке:

6.1. На основании снятой в пункте 3 кривой $\omega = f(\Delta I)$ и коэффициента $c_M \Phi$ (пункт 2) рассчитать кривую потерь $\omega = f(\Delta M)$, используя формулу (2.5).

6.2. Аналогично рассчитать характеристики машины $M2$ $\omega = f(M_{эм})$ на основании снятых в пунктах 4.1 – 4.5 кривых $\omega = f(I_я)$.

6.3. Используя формулу (2.4), рассчитать механические характеристики машины $M1$ $\omega = f(M)$ на основании данных пунктов 6.1 и 6.2. Следить за со-

отношениями знаков в формуле (2.4) при расчете механических характеристик машины $M1$ в двигательном и тормозных режимах работы.

6.4. На основании паспортных данных машины $M1$, используя выражения (2.3), рассчитать естественную механическую характеристику и сопоставить ее с экспериментальной.

6.5. Определить величины добавочных активных сопротивлений $R_{доб}$, включаемых в цепь якоря машины $M1$, при проведении опытов по пунктам 4.2 и 4.4 на основании выражений (2.1) и (2.2).

6.6. Записать выводы по работе, характеризующие вид полученных в результате экспериментов механических характеристик ДПТ независимого возбуждения, пояснить влияние параметров элементов установки на изменение свойств этих характеристик и др.

2.6. Содержание отчета

1) Схема лабораторной установки; 2) паспортные данные машин и приборов; 3) таблицы с опытными и расчетными данными; 4) основные расчетные формулы; 5) механические характеристики испытуемого двигателя для всех опытов; 6) краткие выводы по работе.

2.7. Контрольные вопросы

1. Какими уравнениями определяются скоростная и механическая характеристики двигателя?

2. Какой вид имеют скоростные характеристики и механические характеристики двигателя при изменении питающего напряжения, активного сопротивления в якорной цепи, ослаблении магнитного потока, шунтировании якоря активным сопротивлением, а также в тормозных режимах?

3. Какой порядок снятия механических характеристик двигателя на лабораторной установке?

4. Что необходимо выполнить при замыкании якорной цепи машин $M2$ и $M3$?

5. В каких режимах работы исследуемого электродвигателя нагрузочная машина $M2$ работает генератором, а в каких – двигателем?

6. Что влияет на жесткость механических характеристик ДПТ?

7. В каких квадрантах осей координат (ω , M) располагаются характеристики ДПТ независимого возбуждения при его работе в двигательном режиме, в режиме рекуперативного торможения, в режиме торможения противовключением с потенциальным статическим моментом, в режиме динамического торможения с активным и реактивным нагрузочным моментом?

8. Вывести формулы (2.3).

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: изучение механических характеристик ДПТ последовательного возбуждения для различных схем его включения.

3.1. Основные положения

Уравнение механической характеристики ДПТ последовательного возбуждения аналогично уравнению для двигателя параллельного возбуждения (2.1). Однако в ДПТ последовательного возбуждения магнитный поток Φ изменяется вместе с изменением тока якоря двигателя $I_{я}$. Поскольку момент $M = c_M \Phi I_{я}$, а поток $\Phi = f(I_{я})$, то для расчета механических характеристик двигателя необходимо знать зависимость потока от тока якоря.

При ненасыщенной магнитной цепи можно предположить, что магнитный поток пропорционален току якоря, т. е. $\Phi = \alpha I_{я}$, тогда

$$M = c_M \Phi I_{я} = c_M \alpha I_{я}^2. \quad (3.1)$$

Уравнение механической характеристики (2.1) для ДПТ последовательного возбуждения с учетом выражения (3.1) примет вид:

$$\omega = \frac{U}{c_E \sqrt{\frac{\alpha M}{c_M}}} - \frac{R_{яц}}{\alpha c_E} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B, \quad (3.2)$$

где $A = \frac{U}{c_E \sqrt{\frac{\alpha}{c_M}}}$; $B = \frac{R_{яц}}{\alpha c_E}$.

Из уравнения (3.2) следует, что при ненасыщенной магнитной цепи двигателя механическая характеристика выражается кривой, близкой к гиперболы, для которой ось ординат является асимптотой. По мере увеличения нагрузки на валу растет ток якорной цепи, магнитная система машины насыщается, и магнитный поток в меньшей степени изменяется от тока якоря. При нагрузках, близких к номинальной, магнитная система машины находится в области насыщения, и магнитный поток двигателя становится практически

постоянным. Поэтому механическая характеристика двигателя приобретает линейный характер (рис. 3.1, а).

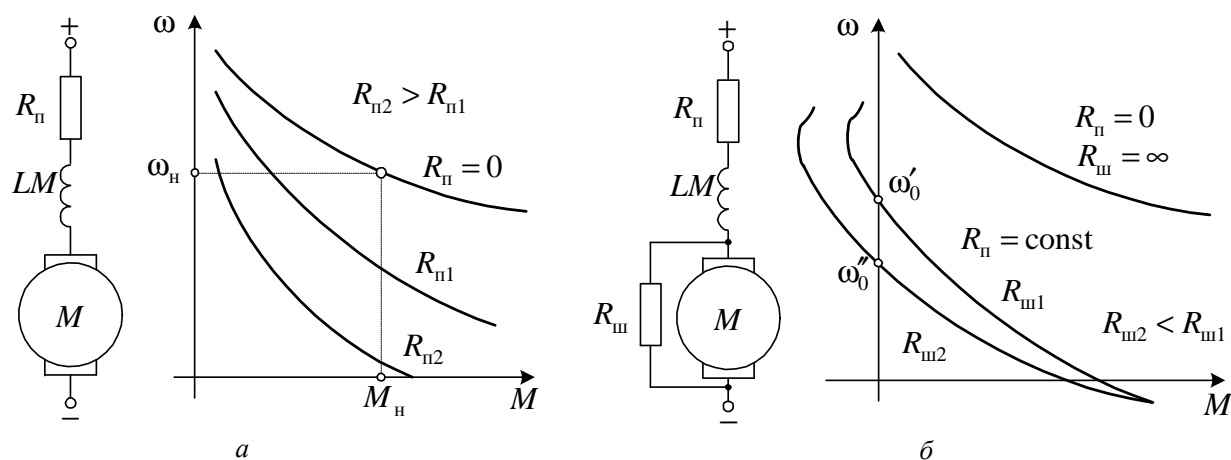


Рис. 3.1

При практических расчетах приводов с двигателями последовательного возбуждения прибегают к графическим способам, используя экспериментальные зависимости скорости вращения и момента в функции тока якоря. Эти зависимости учитывают как насыщение магнитной цепи, так и влияние реакции якоря и приводятся в каталогах для каждого типа двигателя.

На рис. 3.2 приведены естественные универсальные характеристики $M_B^*(I^*)$ и $n^*(I^*)$ ДПТ последовательного возбуждения в относительных единицах. Базовыми величинами приняты номинальные значения тока якоря I_n , частоты вращения n_n и момента на валу $M_{вн} = P_n / \omega_n$. Построение естественной электромеханической характеристики $\omega_e(I)$ осуществляется простым пересчетом зависимости $n^*(I^*)$ в абсолютные единицы и переходом к угловой скорости ω . Для расчета естественной механической характеристики $\omega(M)$ следует построить зависимость электромагнитного момента от тока якоря $M(I)$. Для этого задаются несколькими значениями токов якоря I_i (не менее пяти точек), для каждого из которых по естественной электромеханической характеристике $\omega_e(I)$ определяют частоту вращения ω_i и рассчитывают значение электромагнитного момента M_i :

$$M_i(I_i) = c_E \Phi_i(I_i) \cdot I_i = \frac{U_n - I_i R_{яце}}{\omega_i} \cdot I_i,$$

где $R_{яце} = R_{яд} + R_{щ} + R_{дп} + R_{ко} + R_{ов\ пос}$ – сопротивление якорной цепи двигателя, включающее сопротивление обмотки возбуждения.

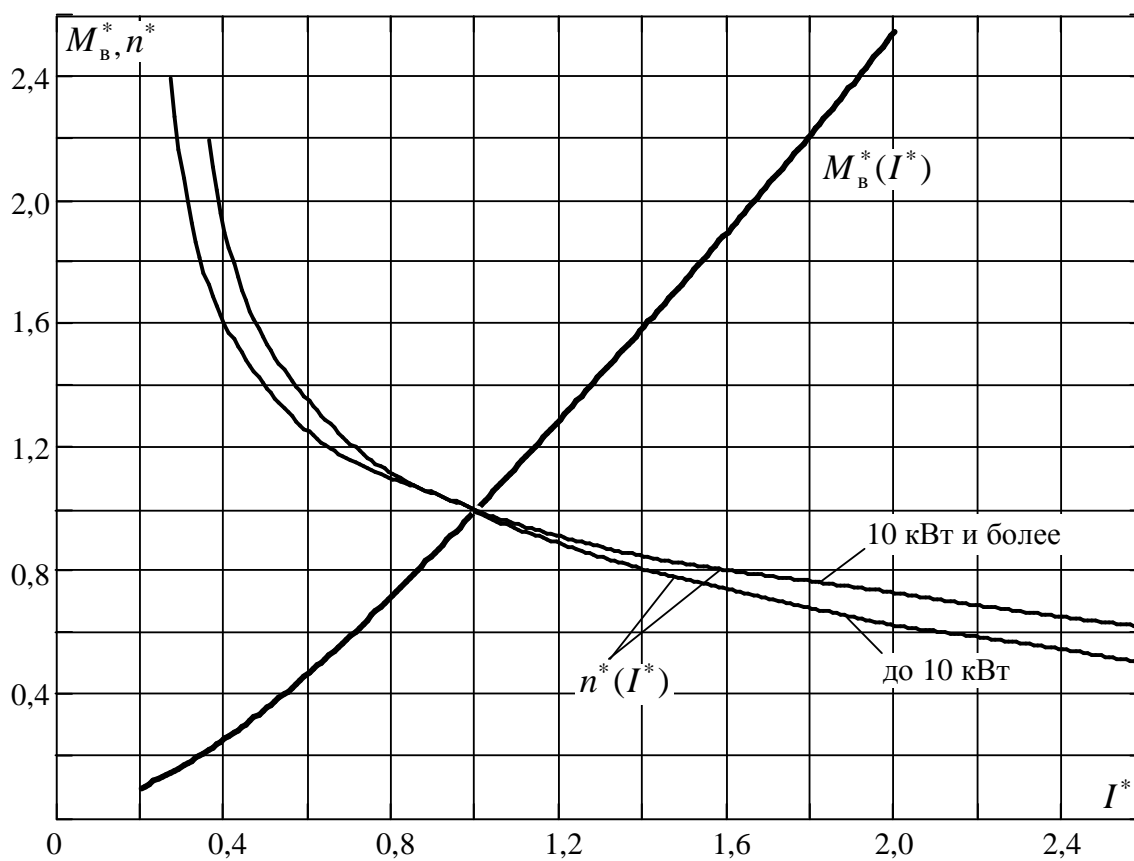


Рис. 3.2

Имея скоростные $\omega_c(I_{я})$ и моментные $M(I_{я})$ характеристики, нетрудно построить естественные механические характеристики $\omega_c(M)$.

Последовательное включение в цепь якоря активного сопротивления (рис. 3.1, а) приводит к получению реостатных (искусственных) характеристик, расположенных ниже естественной (жесткость характеристик уменьшается).

Шунтирование обмотки якоря двигателя позволяет регулировать его скорость вниз от основной и получить при этом более жесткие механические характеристики (рис. 3.1, б). В этом случае характеристики имеют конечные скорости идеального холостого хода и пересекают ось ординат, благодаря подпитке обмотки возбуждения током, проходящим через шунтирующее сопротивление. В области отрицательных моментов ($\omega > \omega'_0$) двигатель не отдает энергию в сеть, а работает генератором на шунтирующее сопротивление.

При постоянном напряжении сети скорость вращения ДПТ последовательного возбуждения выше номинальной можно получить за счет ослабления магнитного потока путем шунтирования обмотки возбуждения активным сопротивлением (рис. 3.3, а). Механическая характеристика в этом случае располагается выше естественной, а ее общий вид сохраняется.

Находит практическое применение шунтирование двигателя активным сопротивлением при наличии общего последовательного сопротивления (рис. 3.3, б). В этом случае механические характеристики располагаются ниже естественной и имеют большую крутизну.

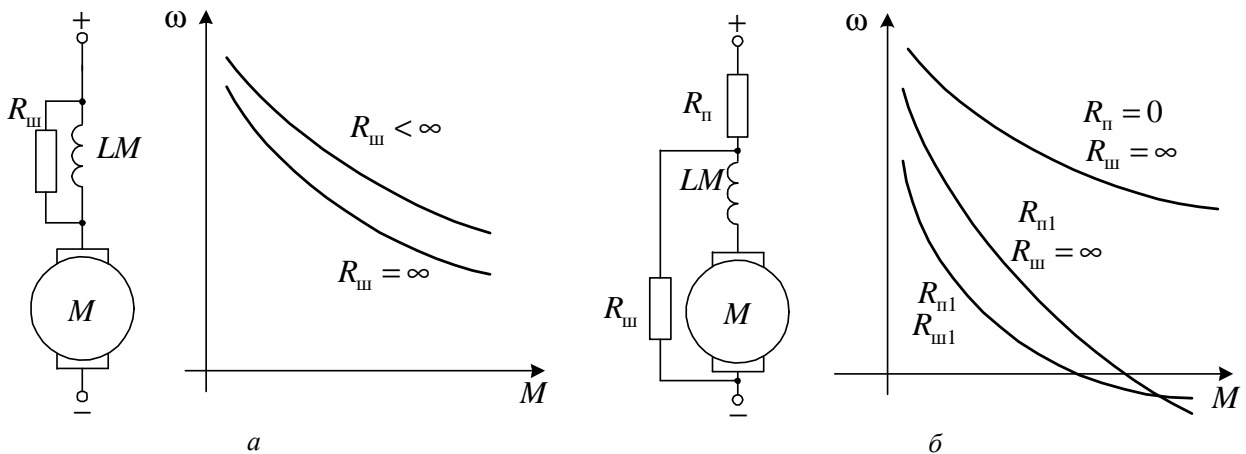


Рис. 3.3

В ряде случаев двигатель может работать при параллельном включении обмоток возбуждения и якоря (рис. 3.4). Эта схема позволяет осуществить автоматический переход из двигательного режима в тормозной и применяется для тормозного спуска груза.

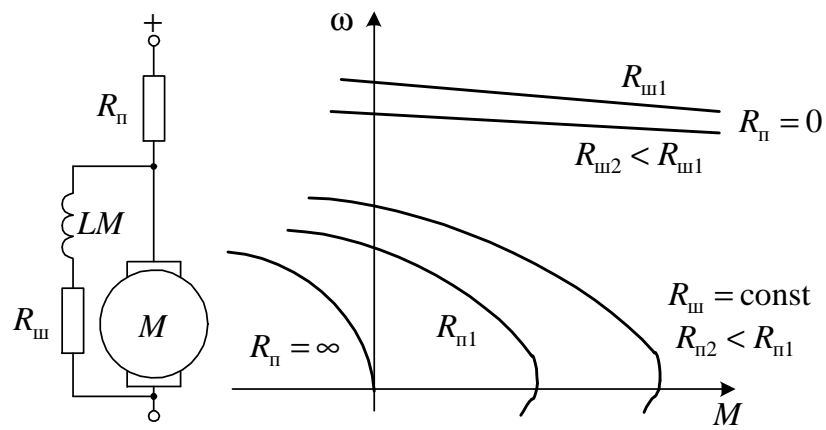


Рис. 3.4

На практике широкое применение нашло динамическое торможение с самовозбуждением, которое не требует питания обмоток двигателя от сети и может быть использовано для аварийного торможения (рис. 3.5). Для этого двигатель последовательного возбуждения отключается от сети и замыкается на тормозное активное сопротивление и работает в качестве генератора с самовозбуждением. Процесс самовозбуждения имеет место только в том случае, если ток, протекаемый через обмотку возбуждения, имеет то же направление, что и в двигательном режиме, а ЭДС машины, определяемая величиной

магнитного потока и скоростью вращения, больше падения напряжения в сопротивлении тормозного контура. В этом режиме механическая характеристика имеет неблагоприятный вид, а именно – малый тормозной момент до начала процесса самовозбуждения и резкое его увеличение после самовозбуждения.

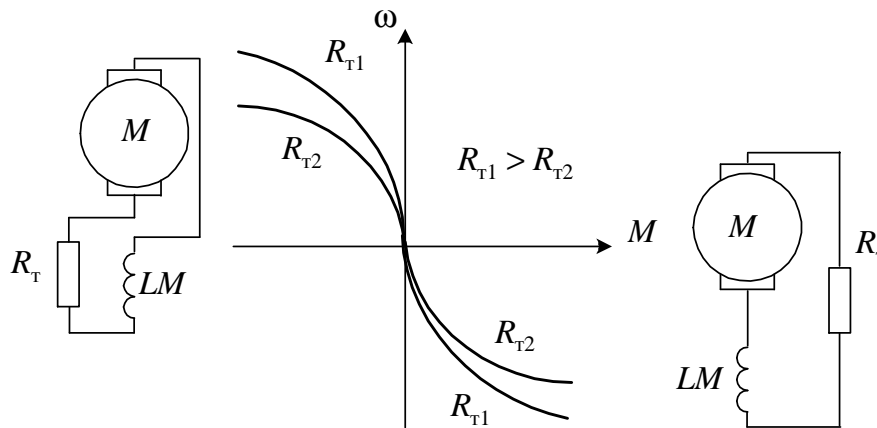


Рис. 3.5

Большую плавность торможения можно получить, если использовать динамическое торможение с независимым возбуждением. В этом случае обмотка возбуждения через добавочное сопротивление подключается к сети, а якорь замыкается на тормозное сопротивление (рис. 3.6).

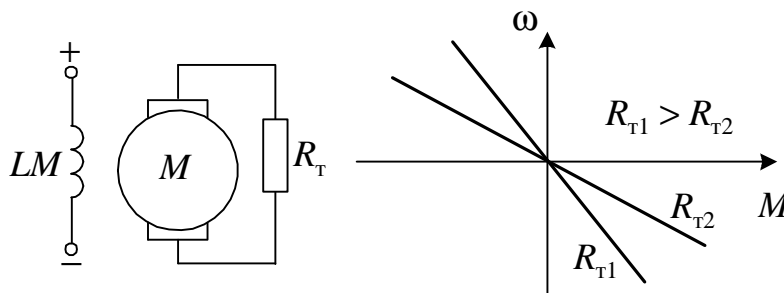


Рис. 3.6

Если протекающий по обмотке возбуждения ток будет создавать номинальный магнитный поток, то из сети будет потребляться мощность, почти равная номинальной. Поэтому получим механические характеристики, аналогичные характеристикам динамического торможения двигателя независимого возбуждения, при значительно худших энергетических показателях.

3.2. Описание лабораторной установки

Снятие механических характеристик проводится по схеме (рис. 3.7). Нагрузкой испытуемого двигателя последовательного возбуждения $M1$ слу-

жит генератор постоянного тока параллельного возбуждения $M2$, работающий на активное сопротивление $R2$. Изменением величины $R2$ задается требуемая нагрузка испытываемой машины $M1$.

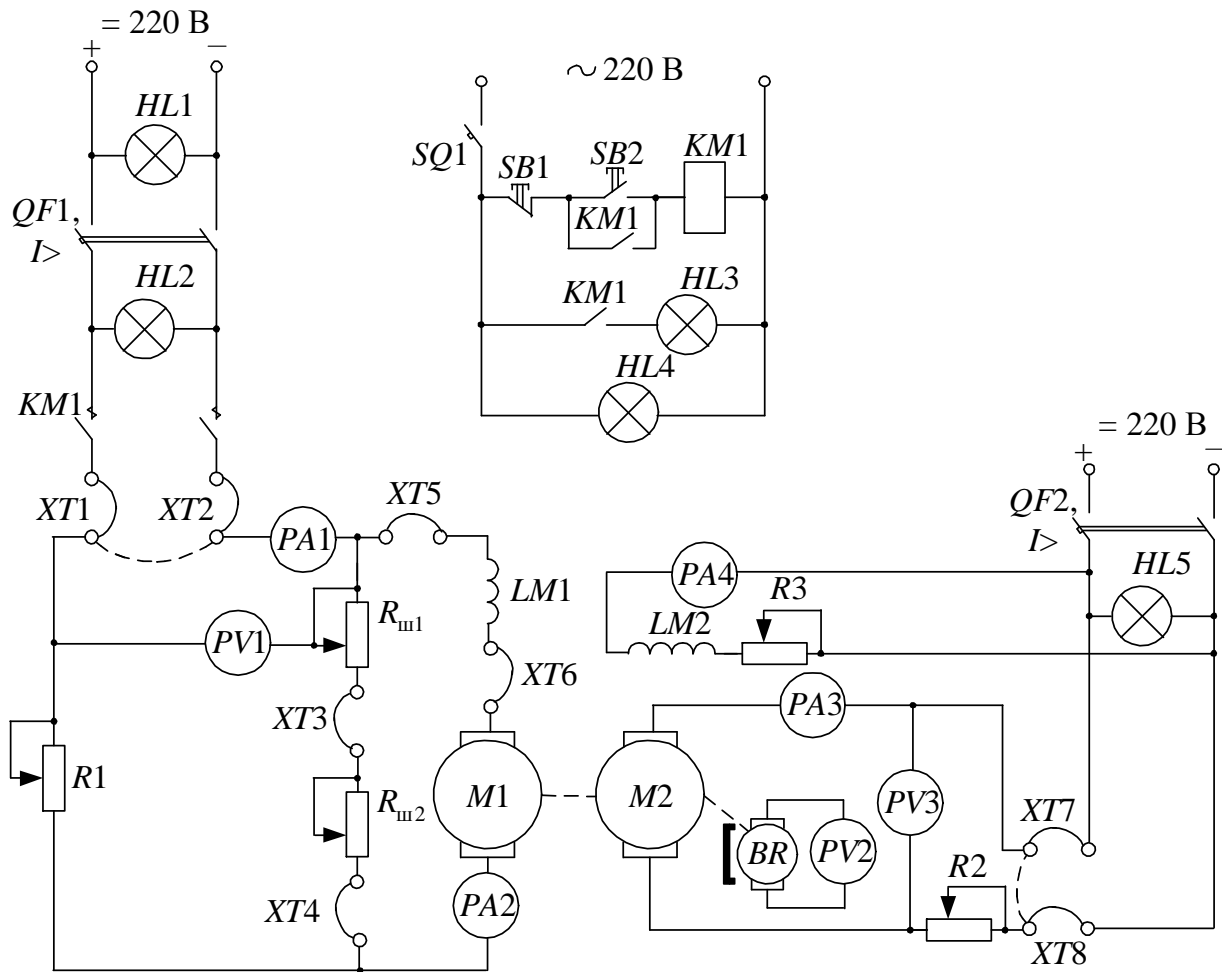


Рис. 3.7

При использовании ослабления потока нагрузочной машины $M2$ (с помощью изменения сопротивления $R3$) необходимо устанавливать такие значения тока возбуждения по амперметру $PA4$, для которых машина $M2$ протарирована.

Сигнальные лампы $HL1-HL5$ информируют о текущем состоянии установки: $HL1$ – наличие питания на стенде; $HL2$ – автомат $QF1$ включен; $HL3$ – наличие напряжения на катушке контактора $KM1$; $HL4$ – наличие питания в цепи управления при замыкании ключа $SQ1$; $HL5$ – автомат $QF2$ включен. Двигатель запускается путем нажатия кнопки $SB2$ «Пуск», что приводит к срабатыванию контактора $KM1$, который своими замыкающимися контактами подключает якорь $M1$ к сети постоянного тока. В схеме предусмотрено подключение последовательного $R1$ и шунтирующих сопротивлений $R_{ш1}$ и $R_{ш2}$. Для контроля за напряжением сети и потребляемым током используются вольтметр $PV1$ и амперметр $PA1$, амперметр $PA2$ фиксирует ток якоря машины $M1$. В цепь якоря включаются вольтметр для измерения величины тока в

цепи якоря $I_{я}$. Для измерения скорости вращения установки используется тахогенератор BR , позволяющий непрерывно контролировать скорость по показанию прибора $PV2$. Амперметр $PA3$ и вольтметр $PV3$ позволяют контролировать ток и напряжение якоря машины $M2$. С помощью перемычек $XT1$ - $XT8$ обеспечиваются различные схемы подключения машин $M1$ и $M2$. Замкнутое состояние перемычек обозначается тонкой дугообразной линией.

3.3. Задание для домашней подготовки

1. Усвоить основные положения разд. 3.1 и повторить теоретический материал, посвященный режимам работы ДПТ последовательного возбуждения и условиям перехода электродвигателя из одного режима работы в другой [1 – § 2.13-2.16; 4 – § 2.5-2.6; 6 – § 2.8; 7 – § 4.12-4.15; 8 – § 5.3; 12 – § 3.6-3.7].

2. Изучить устройство электроустановки и выяснить назначение всех регуляторов, переключателей и измерительных приборов (разд. 3.2).

3. Подготовить отчет для проведения лабораторной работы, содержащий порядок проведения работы, таблицы для занесения результатов опытов, необходимые расчетные формулы, а также примерные графики, ожидаемые при проведении эксперимента.

3.4. Программа работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки.
2. Протарировать нагрузочную машину $M2$.
3. Снять кривую потерь.
4. Снять скоростную характеристику двигателя $\omega = f(I_{HM})$, по которой затем рассчитать и с учетом кривой потерь построить механическую характеристику двигателя $M1$ при следующих условиях:
 - 4.1. отсутствии дополнительных сопротивлений в цепи якоря (естественная характеристика);
 - 4.2. наличии последовательного сопротивления в цепи якоря (реостатные характеристики);
 - 4.3. шунтировании якоря двигателя;
 - 4.4. шунтировании обмотки возбуждения;
 - 4.5. шунтировании двигателя и наличии общего последовательного сопротивления;
 - 4.6. параллельном включении обмоток якоря и возбуждения;
 - 4.7. динамическом торможении с самовозбуждением;
 - 4.8. динамическом торможении с независимым возбуждением.
5. Рассчитать механические характеристики и провести их анализ.

3.5. Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки и записать паспортные данные машин.

Исходное состояние установки:

- 1) автоматы $QF1$ и $QF2$ в нижнем положении (выключены);
- 2) ключ $SQ1$ в нижнем положении (выключен);
- 3) потенциометры $R1$ и $R2$ в крайнем левом положении (полностью введены);
- 4) переключки $XT1$ - $XT8$ разомкнуты.

При проведении экспериментов на лабораторной установке **запрещается**:

- 1) проводить опыты при отсутствии механической нагрузки на валу двигателя, так как в противном случае скорость вращения $M1$ может возрасти до недопустимых пределов;
- 2) разгонять $M1$ выше скорости равной $1,2\omega_n$;
- 3) увеличивать ток в якорной цепи $M1$ выше номинального значения (прибор $PA2$).

2. Тарирование нагрузочной машины $M2$

Замкнуть переключки $XT1$, $XT2$, $XT5$, $XT6$ и разомкнуть $XT3$, $XT4$, $XT7$, $XT8$. Включить автомат $QF2$ (индикатор $HL5$), затем $QF1$ (индикатор $HL1$). По амперметру $PA4$ установить ток в обмотке возбуждения $LM2$ равный $0,4$ А. Включить ключ $SQ1$ для подачи питания в цепь управления (индикатор $HL4$). Нажать кнопку «Пуск» $SB2$ (индикатор $HL3$) и разогнать двигатель $M1$ путем плавного уменьшения сопротивления $R1$ в цепи якоря (реостат $R1$ полностью выводится). После разгона $M1$ до установившейся скорости снять значения ЭДС и скорости с помощью приборов $PV2$ и $PV3$, затем определить коэффициент пропорциональности между током и моментом машины $M2$:

$$c_M \Phi = \frac{E_{\text{нм}}}{\omega}.$$

Повторить опыт и расчет $c_M \Phi$ для значений тока в $LM2$ равных $0,35$ А и $0,25$ А.

После этого полностью ввести $R1$, нажать кнопку «Стоп» $SB1$ и выключить $QF1$ и $QF2$. В дальнейшем необходимо устанавливать только такие величины тока в обмотке возбуждения $LM2$, для которых машина $M2$ протарирована.

3. Снятие кривой потерь

Переключки $XT1$ - $XT4$ разомкнуты, $XT5$ - $XT8$ замкнуты. В этом случае якорь нагрузочной машины $M2$ подключается к источнику питания. Включить автомат $QF2$ и установить ток в обмотке $LM2$ равный $0,4$ А. Постепенно

уменьшая сопротивление $R2$, разогнать нагрузочную машину $M2$ и снять 5-7 значений тока и скорости по приборам $PA3$ и $PV2$. По окончании опыта полностью ввести $R2$ и отключить автомат $QF2$.

4. Снятие электромеханических характеристик

4.1. Естественная характеристика $\omega = f(I_{\text{я}})$

Переключки $XT1$, $XT2$, $XT5$, $XT6$ замкнуты, $XT3$, $XT4$ разомкнуты. С помощью переключек $XT7$ и $XT8$ замкнуть якорь нагрузочной машины $M2$ на сопротивление $R2$ (пунктирная линия на рис. 3.7). Машина $M2$ при выполнении пунктов 4.1-4.6 работает в режиме генератора. Включить автоматы $QF1$ и $QF2$. Нажать кнопку «Пуск» $SB2$ и разогнать двигатель $M1$ путем плавного уменьшения сопротивления $R1$ в цепи якоря (реостат $R1$ полностью выводится). Увеличивая нагрузку испытуемого двигателя $M1$ с помощью уменьшения сопротивления $R2$, снять 5-7 значений тока и скорости нагрузочной машины $M2$ (приборы $PA3$ и $PV2$). После снятия характеристики уменьшить нагрузку $M1$ до величины, при которой скорость вращения испытуемого двигателя не превышает $1,2\omega_{\text{н}}$. Перейти к выполнению пункта 4.2.

4.2. Снятие реостатных характеристик

Ввести часть активного сопротивления $R1$ в цепь якоря $M1$. Изменяя нагрузку испытуемого двигателя с помощью сопротивления $R2$, снять 5-7 значений тока и скорости нагрузочной машины (приборы $PA3$ и $PV2$). Опыт повторить при другом значении $R1$. После этого полностью ввести сопротивление $R1$, нажать кнопку «Стоп» $SB1$ и отключить автомат $QF1$.

4.3. Снятие характеристик при шунтировании якоря двигателя $M1$

С помощью переключек $XT1$ - $XT6$ собрать схему согласно рис. 3.8, а. Характеристики снимаются при следующих сочетаниях сопротивлений:

- 1) $R_{\text{ш}2}$ в положении «0», $R1$ – «2»;
- 2) $R_{\text{ш}2}$ – «0», $R1$ – «3»;
- 3) $R_{\text{ш}2}$ – «2», $R1$ – «3».

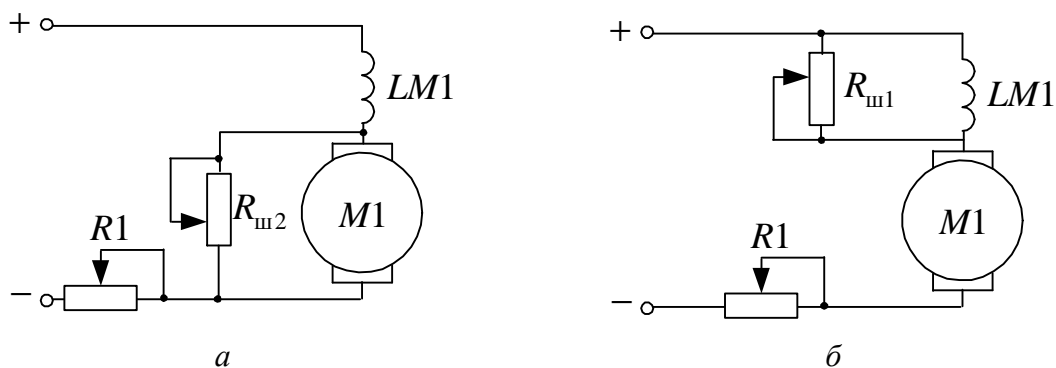


Рис. 3.8

Включить автомат $QF1$ и нажать кнопку «Пуск» $SB2$. Изменяя нагрузку испытуемого двигателя $M1$ с помощью сопротивления $R2$, снять значения то-

ка и скорости нагрузочной машины (приборы $PA3$ и $PV2$). По окончании опыта нажать кнопку «Стоп» $SB1$ и отключить автомат $QF1$.

4.4. Снятие характеристик при шунтировании обмотки возбуждения двигателя $M1$.

Схема испытания приведена на рис. 3.8, б. Замкнуты переключки $XT1$, $XT2$, $XT5$, $XT6$, а разомкнуты $XT3$, $XT4$. Дополнительным проводником подключить сопротивление $R_{ш1}$ параллельно обмотке возбуждения $LM1$. Характеристики снимаются при следующих сочетаниях сопротивлений:

- 1) $R_{ш1}$ в положении “0”, $R1$ – “2”;
- 2) $R_{ш1}$ – “0”, $R1$ – “3”;
- 3) $R_{ш1}$ – “3”, $R1$ – “2”.

Включить автомат $QF1$ и нажать кнопку «Пуск» $SB2$. При изменении нагрузки испытуемого двигателя $M1$ с помощью сопротивления $R2$ снять значения тока и скорости нагрузочной машины (приборы $PA3$ и $PV2$). После снятия характеристик при малой нагрузке $M1$ нажать кнопку «Стоп» $SB1$ и отключить автомат $QF1$.

4.5. Снятие характеристик при шунтировании двигателя $M1$ и наличии общего последовательного сопротивления.

Согласно рис. 3.9, а собрать схему испытания двигателя $M1$. Для этого замкнуть переключки $XT1$ - $XT6$.

Характеристики снимаются при следующих сочетаниях сопротивлений:

- 1) $R_{ш2}$ в положении “0”, $R1$ – “2”;
- 2) $R_{ш2}$ – “0”, $R1$ – “3”;
- 3) $R_{ш2}$ – “2”, $R1$ – “3”.

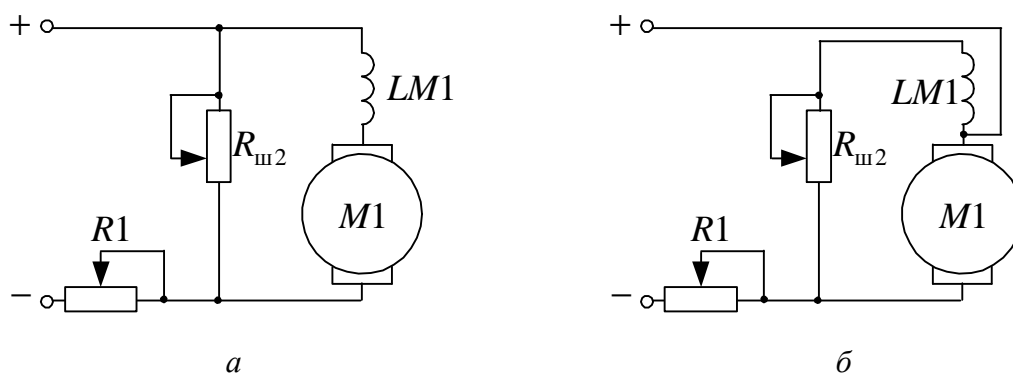


Рис. 3.9

Включить автомат $QF1$ и нажать кнопку «Пуск» $SB2$. Изменяя нагрузку испытуемого двигателя $M1$ с помощью сопротивления $R2$, снять значения тока и скорости нагрузочной машины (приборы $PA3$ и $PV2$). По окончании опыта нажать кнопку «Стоп» $SB1$ и отключить автомат $QF1$.

4.6. Снятие характеристик машины $M1$ при параллельном включении обмоток якоря и возбуждения.

Собрать схему для испытания двигателя $M1$ согласно рис. 3.9, б. При этом переключки $XT1$, $XT4$, $XT6$ замкнуты, а $XT3$ и $XT5$ разомкнуты. Дополнительными проводниками соединить обмотку возбуждения $LM1$ с $R_{ш2}$ и переключки $XT6$ и $XT2$.

Снять характеристики при следующих сочетаниях сопротивлений:

- 1) $R_{ш2}$ в положении “0”, $R1$ – “2”;
- 2) $R_{ш2}$ – “0”, $R1$ – “3”;
- 3) $R_{ш2}$ – “2”, $R1$ – “3”.

Включить автомат $QF1$ и нажать кнопку «Пуск» $SB2$. При изменении нагрузки испытуемого двигателя $M1$ с помощью сопротивления $R2$ снять значения тока и скорости нагрузочной машины (приборы $PA3$ и $PV2$). После снятия характеристик при малой нагрузке $M1$ нажать кнопку «Стоп» $SB1$ и отключить автомат $QF1$.

4.7. Снятие характеристик машины $M1$ в режиме динамического торможения с самовозбуждением.

Схема испытания представлена на рис. 3.10, а. Отсоединить переключки $XT1$, $XT2$ от автомата $QF1$ и закоротить якорь испытуемого двигателя $M1$ на сопротивление $R1$ (пунктир на рис. 3.7). С помощью переключек $XT5$, $XT6$ обеспечить подключение обмотки $LM1$ в соответствии со схемой рис. 3.9, а. Нагрузочную машину $M2$ (рис. 3.7) переключками $XT7$ и $XT8$ подключить к источнику постоянного напряжения.

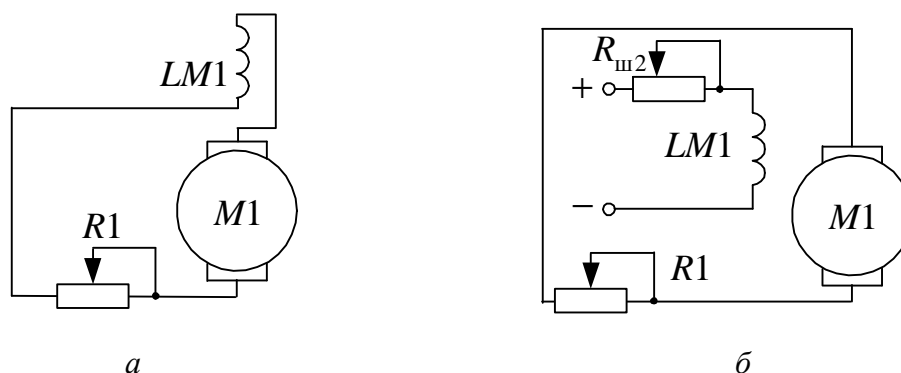


Рис. 3.10

При введенном сопротивлении $R2$ включить автомат $QF2$. Установить заданное преподавателем значение $R1$. Уменьшая $R2$, снять показания тока и скорости нагрузочной машины (приборы $PA3$ и $PV2$). Опыт повторить при другом значении $R1$. По окончании опыта полностью ввести сопротивление $R2$ и отключить автомат $QF2$.

4.8. Снятие характеристик машины $M1$ в режиме динамического торможения с независимым возбуждением.

Схема включения испытуемого двигателя приведена на рис. 3.10, б. С помощью переключателей $XТ1-XТ6$ и дополнительных проводников обмотка возбуждения $LM1$ подключается к источнику питания через добавочное сопротивление $R_{ш2}$, а якорь $M1$ замыкается на $R1$. Характеристики снимаются для двух значений $R1$.

Включить автомат $QF1$, подключающий обмотку $LM1$ к сети постоянного напряжения. Резистором $R_{ш2}$ установить номинальный ток возбуждения машины $M1$ (прибор $PA1$). При введенном сопротивлении $R2$ включить автомат $QF2$. Установить заданное преподавателем значение $R1$. Уменьшая величину $R2$, снять показания тока и скорости нагрузочной машины (приборы $PA3$ и $PV2$). Опыт повторить при другом значении $R1$. По окончании опыта полностью ввести сопротивление $R2$ и отключить автоматы $QF2$ и $QF1$. Схему привести в исходное состояние.

5. Расчет механических характеристик и анализ результатов

Расчет механических характеристик исследуемой машины $M1$ производится в следующем порядке:

5.1. На основании снятой в пункте 3 кривой $\omega = f(\Delta I)$ и коэффициента $c_M \Phi$ (пункт 2) рассчитать кривую потерь $\omega = f(\Delta M)$, используя формулу

$$M_{эм} = c_M \Phi I_{я}.$$

5.2. Аналогично пункту 5.1 рассчитать характеристики машины $M2$ $\omega = f(M_{эм})$ на основании снятых в пунктах 4.1 – 4.8 кривых $\omega = f(I_{я})$.

5.3. Рассчитать механические характеристики машины $M1$ $\omega = f(M)$ на основании данных пунктов 5.1 и 5.2. Момент на валу испытуемой машины $M1$ определяется из выражения:

$$M = M_{эм} \pm \Delta M,$$

где $M_{эм}$ – электромагнитный момент нагрузочной машины $M2$; ΔM – момент, обусловленный потерями в нагрузочной машине.

Следить за соотношениями знаков в формуле (1.4) при расчете механических характеристик машины $M1$ в двигательном и тормозных режимах работы.

5.4. На основании паспортных данных машины $M1$, используя универсальные кривые (рис. 3.2), рассчитать естественную механическую характеристику и сопоставить ее с экспериментальной.

5.5. Определить величины добавочных активных сопротивлений $R_{доб}$, включаемых в цепь якоря машины $M1$, при проведении опытов по пункту 4.2 на основании выражения:

$$\omega_{\text{и}} = \omega_{\text{е}} \frac{U_{\text{н}} - I(R_{\text{яце}} + R_{\text{доб}})}{U_{\text{н}} - IR_{\text{яце}}}$$

Величину сопротивления якоря можно определить приближенно из формулы

$$I_{\text{н}}^2 R_{\text{яце}} = \gamma_{\text{п}} \left(\frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} - P_{\text{н}} \right) \cdot 10^3,$$

где $\gamma_{\text{п}} = 0,75$ – коэффициент, показывающий, какую часть от общих потерь мощности составляют потери в сопротивлении $R_{\text{яце}}$; $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность на валу двигателя, кВт; $\eta_{\text{н}}$ – КПД двигателя при номинальной нагрузке.

5.6. Записать выводы по работе, характеризующие вид полученных в результате экспериментов механических характеристик ДПТ последовательного возбуждения, пояснить влияние параметров элементов установки на изменение свойств этих характеристик и др.

3.6. Содержание отчета

1) Схема лабораторной установки; 2) паспортные данные машин и приборов; 3) таблицы с опытными и расчетными данными; 4) основные расчетные формулы; 5) механические характеристики испытуемого двигателя для всех опытов; 6) краткие выводы по работе.

3.7. Контрольные вопросы

1. Почему для двигателя последовательного возбуждения нельзя получить точное аналитическое выражение механической характеристики?

2. Показать по уравнению механической характеристики двигателя изменением каких параметров можно регулировать скорость двигателя.

3. Изобразить и объяснить характеристики двигателя при шунтировании якоря, если $R_{\text{п}} = \text{const}$, $R_{\text{ш}} = \text{var}$, а также, если $R_{\text{п}} = \text{var}$, $R_{\text{ш}} = \text{const}$.

4. Изобразить и объяснить реостатные характеристики двигателя последовательного возбуждения.

5. Объяснить механические характеристики в тормозных режимах.

6. Какие основные меры безопасности нужно соблюдать при пуске установки?

7. Объяснить способ создания нагрузки на валу ИД и порядок снятия характеристик.

8. Каким образом учитываются потери в установке при построении механических характеристик двигателя?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Цель работы: изучение механических характеристик асинхронного двигателя (АД) с фазным ротором в двигательном и тормозных режимах работы.

4.1. Основные теоретические положения

Механическая характеристика АД $\omega = f(M)$ – зависимость скорости вращения его ротора ω от вращающего момента M . Если учесть, что $\omega = \omega_0(1 - s)$, то механическую характеристику АД можно представить в виде зависимости вращающего момента от скольжения $M = f(s)$, т. е.

$$M = \frac{3U_1^2 R'_2}{\omega_0 s [(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}, \quad (4.1)$$

где U_1 – фазное напряжение на статоре АД, В;

R_1 и X_1 – активное и индуктивное сопротивления обмотки статора, Ом;

R'_2 и X'_2 – приведенные значения активного и индуктивного сопротивлений обмотки ротора, Ом;

ω_0 – синхронная угловая скорость вращения магнитного поля статора, с^{-1} .

Уравнение (4.1) после преобразований может быть выражено формулой Клосса

$$M = \frac{2M_k(1 + \varepsilon)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\varepsilon}, \quad (4.2)$$

где

$$\varepsilon = \frac{R_1}{R'_2} s_k; \quad (4.3)$$

$$M_k = \frac{\pm 3U_1^2}{2\omega_0 (\sqrt{R_1^2 + X_k^2} \pm R_1)}; \quad (4.4)$$

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (4.5)$$

В приведенных выражениях:

M, M_k – электромагнитные моменты двигателя текущий и критический, Н·м;

s, s_k – скольжение ротора текущее и критическое, б/р;

$X_k = X_1 + X'_2$ – реактивное сопротивление короткого замыкания, Ом;

В формулах (4.4) и (4.5) знак «+» соответствует двигательному режиму, а знак «-» – генераторному режиму работы АД.

Если в уравнении (4.2) пренебречь активным сопротивлением статорной цепи ($R_1 = 0 \Rightarrow \varepsilon = 0$), то получим приближенное выражение, более удобное для расчетов:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}. \quad (4.6)$$

Если пренебречь первым членом в знаменателе последнего выражения, то при малых значениях скольжения ($s < s_k$) получим уравнение прямой (рабочий участок механической характеристики АД):

$$M = 2M_k \frac{s}{s_k}. \quad (4.7)$$

При номинальном напряжении на статоре и отсутствии внешних сопротивлений в цепях статора и ротора АД работает на естественной характеристике (рис. 4.1). Ее построение ведется по выражению (4.6) для ряда значений скольжения от -1 до 2 , а критические значения скольжения и момента определяют по формулам:

$$s_k = s_n (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \text{ и } M_k = \lambda M_n, \quad (4.8)$$

где $s_n = (\omega_0 - \omega_n) / \omega_0$ и $M_n = P_n / \omega_n$ – номинальные значения скольжения и момента АД; ω_n, P_n и λ – номинальные значения скорости ротора (с^{-1}), мощности на валу (Вт) и перегрузочной способности (б/р) – паспортные данные электродвигателя.

При введении добавочного сопротивления в цепь ротора $R_{2\text{доб}}$ АД работает на искусственной (реостатной) характеристике, расположенной ниже

естественной. Максимальный момент при любых значениях $R_{2\text{доб}}$ имеет одну и ту же величину, так как согласно формуле (4.4) он не зависит от активного сопротивления в цепи ротора. Абсолютные же значения критического скольжения s_k увеличиваются с возрастанием активного сопротивления в цепи ротора (4.5). Симметричное включение активных сопротивлений в цепь ротора широко используется в электроприводах для ограничения пусковых токов и увеличения пусковых моментов при пуске и разгоне электропривода.

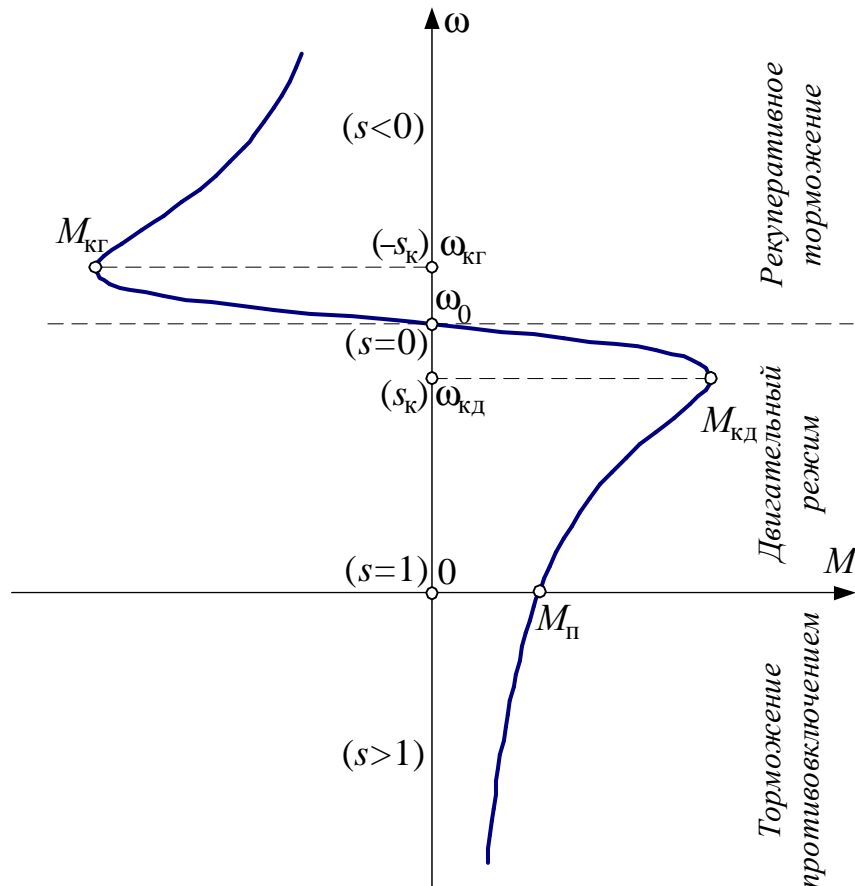


Рис. 4.1

При уменьшении напряжения, подводимого к статору, и отсутствии внешних сопротивлений в цепи статора и ротора изменяется величина критического момента согласно уравнению (4.4), а критическое скольжение остается постоянным (4.5). При снижении напряжения сети возрастает крутизна характеристик и уменьшается значение пускового момента.

Симметричное включение в цепь статора внешних активных сопротивлений позволяет ограничить пусковой ток и уменьшить пусковой момент двигателя, так как напряжение, подводимое к статору, понижается за счет падения напряжения на внешних сопротивлениях. Критическое скольжение при этом несколько уменьшается (4.5).

Несимметричное включение сопротивлений в цепь статора также уменьшает пусковой момент и создает несимметричную трехфазную систему напряжений, подводимых к статору двигателя (рис. 4.2). Несимметричную трехфазную систему можно разложить на две симметричные составляющие – прямого $U_{\text{пр}}$ и обратного $U_{\text{обр}}$ следования, каждая из которых будет создавать свой момент, а результирующий момент двигателя равен их сумме:

$$M_{\Sigma} = M_{\text{пр}} + M_{\text{обр}} = \frac{2M_{\text{к.пр}}(1 + \varepsilon)}{\frac{s_{\text{пр}}}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s_{\text{пр}}} + 2\varepsilon} - \frac{2M_{\text{к.обр}}(1 + \varepsilon)}{\frac{s_{\text{обр}}}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s_{\text{обр}}} + 2\varepsilon}. \quad (4.9)$$

Знак минус в выражении (4.9) указывает на то, что момент обратного направления $M_{\text{обр}}$ противодействует $M_{\text{пр}}$, $s_{\text{обр}} = 2 - s_{\text{пр}}$. Значения соответствующих критических моментов определяются по формулам:

$$M_{\text{к.пр}} = M_{\text{к}} \left(\frac{U_{\text{пр}}}{U_{1\text{н}}} \right)^2 \quad \text{и} \quad M_{\text{к.обр}} = M_{\text{к}} \left(\frac{U_{\text{обр}}}{U_{1\text{н}}} \right)^2,$$

где $M_{\text{к}}$ – критический момент двигателя при нормальной (симметричной) схеме питания; $U_{1\text{н}}$ – номинальное фазное напряжение. Значения симметричных составляющих напряжения $U_{\text{пр}} = U_{1\text{н}} \sqrt{(1 + k_{\text{нс}} + k_{\text{нс}}^2)/3}$ и $U_{\text{обр}} = U_{1\text{н}} (1 - k_{\text{нс}})/\sqrt{3}$, где $k_{\text{нс}} = 0 \div 1$ – коэффициент несимметрии.

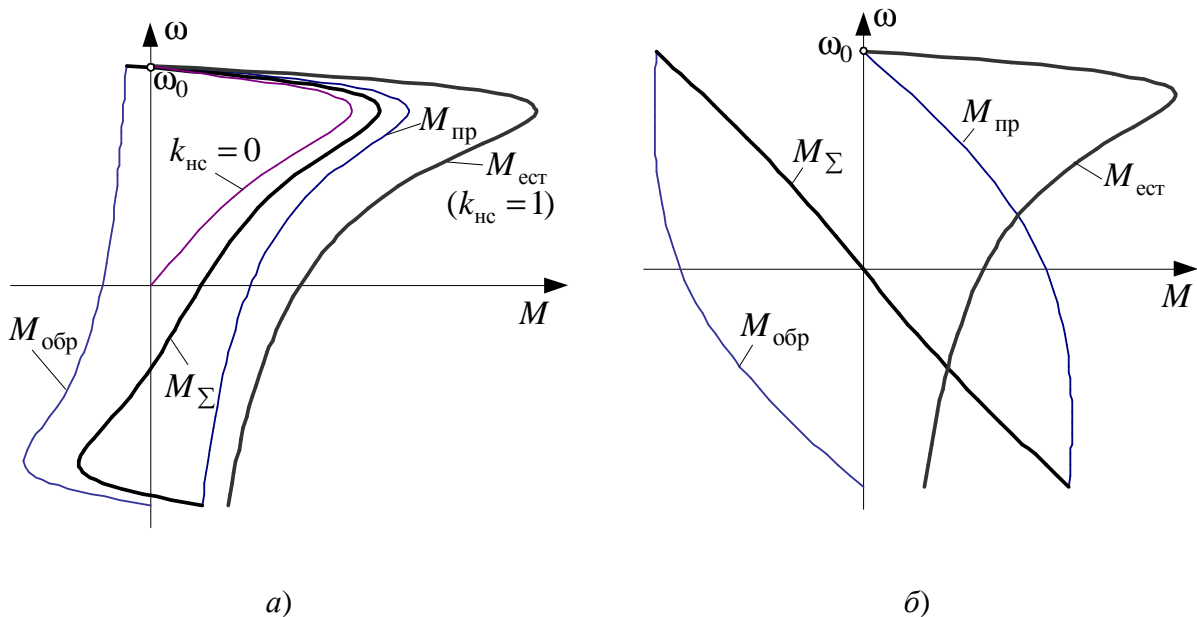


Рис. 4.2

Механические характеристики АД (рис. 4.2, а), рассчитанные по (4.9), не пригодны для практического использования – значительно снижается максимальный момент, а скорость двигателя уменьшается незначительно. При введении $R_{2\text{доб}}$ их можно видоизменить (рис. 4.2, б) и использовать для устранения недостатка торможения противовключением – самопроизвольного реверса.

Недостаток несимметричного питания статора – наличие обратного поля, что приводит к значительно большим потерям (нагреву обмоток) в машине, по сравнению с симметричным режимом работы АД. При $k_{\text{нс}} = 1$ симметричный режим, а $k_{\text{нс}} = 0$ – двухфазный режим работы АД (рис. 4.2, а).

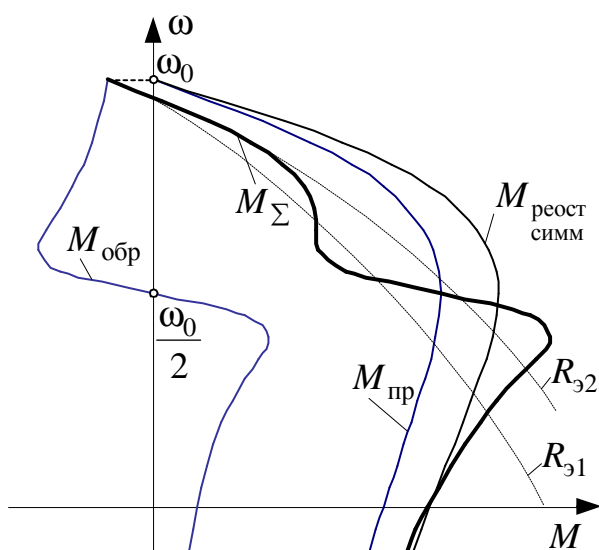


Рис. 4.3

В ряде случаев применяется несимметричное включение активных сопротивлений в цепь ротора при питании статора симметричным напряжением (рис. 4.3). Это позволяет увеличить число пусковых характеристик при ограниченном числе сопротивлений. Неравенство сопротивлений отдельных фаз создает несимметричную систему токов ротора, которую можно разложить на симметричные составляющие прямой и обратной последовательности. Каждая составляющая создает свой момент, а их сумма (4.9) определяет результирующий момент на валу АД ($s_{\text{обр}} = 1 - 2s_{\text{пр}}$).

Точный расчет механических характеристик АД с несимметричными сопротивлениями цепей ротора очень сложен (влияние насыщения, сглаживающего провалы моментов), однако может быть выполнен приближенно по формуле (4.2) с помощью метода эквивалентных симметричных составляющих. Учитывая, что допустимая несимметрия цепей ротора получается небольшой и провалы момента незначительные, несимметричные сопротивления заменяют на эквивалентные симметричные, дающие такие же тепловые потери в цепи ротора:

$$R_{\text{э1}} = \frac{R_{2a} + R_{2b} + R_{2c}}{3} \quad \text{или} \quad R_{\text{э2}} = \frac{R_{2a}R_{2b} + R_{2b}R_{2c} + R_{2a}R_{2c}}{R_{2a} + R_{2b} + R_{2c}}.$$

При скорости ротора выше $0,5\omega_0$ вторая формула дает более точный результат (рис. 4.3). Механические характеристики двигателя с несимметричным включением сопротивлений в цепи ротора при скольжении близком к

$s = 0,5$ имеют «провал» (рис. 4.3), который при большом статическом моменте на валу может вызвать прекращение разгона двигателя у половины синхронной скорости. Недостатком несимметричного включения сопротивлений в цепь ротора АД является трудность регулирования скорости ротора, так как несимметрией нельзя создать тормозной момент для замедления двигателя. Кроме того, наличие потоков и токов обратной последовательности увеличивает потери в стали и меди и повышает нагрев двигателя.

Торможение АД обычно осуществляется в следующих режимах: рекуперативном, противовключением и динамическом.

Рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть имеет место при совпадении по направлению статического момента нагрузки с моментом, развиваемым АД. Двигатель, вращаясь со скоростью выше синхронной, будет работать в качестве генератора, отдавая активную энергию в сеть, и создавать при этом тормозной момент. Механические характеристики являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима (рис. 4.1) во второй квадрант осей координат (ω , M). В генераторном режиме максимальный момент M_k по абсолютной величине больше, чем в двигательном – сказывается влияние падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора.

При активном M_c возникновение режима рекуперативного торможения возможно в подъемной установке (при переключении на спуск груза по характеристике 2 на рис. 4.4, а). В транспортном приводе при движении «под уклон» M_c сам создает движущий момент.

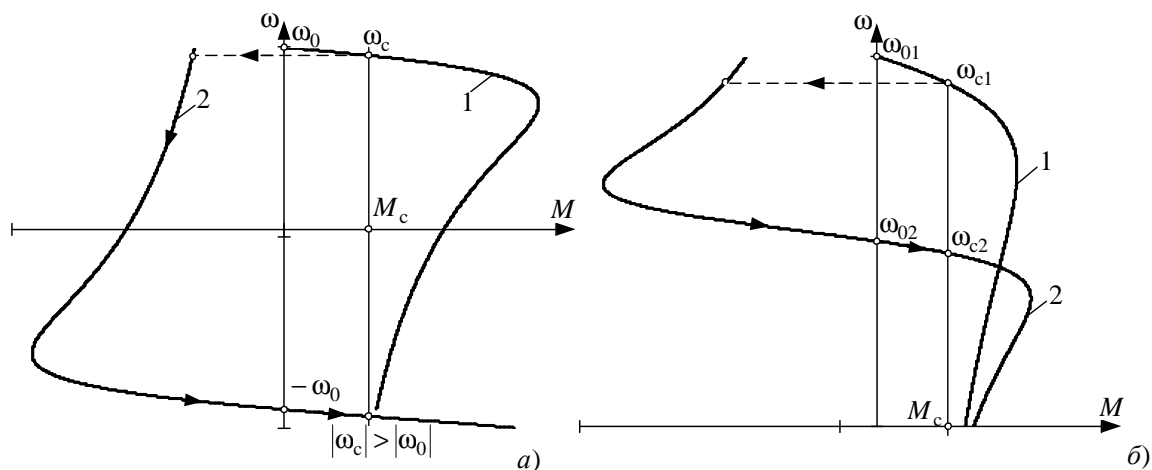


Рис. 4.4

При наличии реактивного момента M_c генераторное торможение с рекуперацией энергии в сеть возможно при переключении числа полюсов обмотки статора с меньшего на большее или уменьшении частоты питающей сети. Двигатель переходит на 2-ую характеристику (рис. 4.4, б) и тормозит скорость двигателя до ω_{02} с отдачей энергии в сеть.

На практике широко используется торможение АД *противовключением*. Получить режим противовключения можно двумя методами. В первом случае меняется подключение двух фаз к сети местами (рис. 4.5, а) с помощью рубильников $Q1$ и $Q2$, что приводит к смене направления вращения магнитного поля и смене знака M (точка a на характеристике 2 рис. 4.5, б). Для ограничения тока в цепи ротора и одновременного увеличения тормозного момента в цепь ротора включают добавочное активное сопротивление. Торможение в этом случае протекает на прямолинейном участке механической характеристики. Во втором случае просто вводится добавочное сопротивление в цепь фазного ротора при активном M_c без переключения фаз статора. В этом режиме исполнительный механизм вращает двигатель в сторону, обратную действию развиваемого им момента (характеристика 4 на рис. 4.5, б).

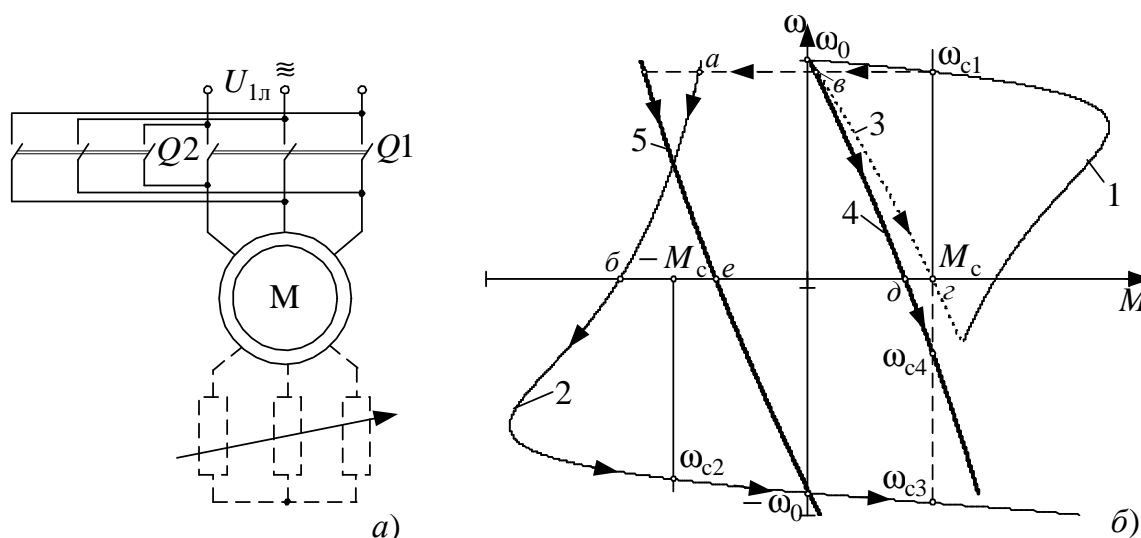


Рис. 4.5

Наряду с режимом противовключения на практике часто используется режим *динамического* торможения с независимым возбуждением. В этом случае обмотка статора АД отключается от сети переменного тока и подключается к источнику постоянного тока. Взаимодействие тока вращающегося ротора с неподвижным магнитным полем статора создает тормозной момент. На величину тормозного момента, а, следовательно, на время торможения оказывают влияние величина постоянного тока статора и значение добавочного сопротивления в цепи ротора (рис. 4.6). Уравнение механической характеристики в режиме динамического торможения аналогично выражению для двигательного режима (4.6), однако следует иметь в виду, что режим динамического торможения и характеризующие его кривые имеют существенные отличия от двигательного режима. Механические характеристики АД в режиме динамического торможения при реактивном статическом моменте располагаются во втором квадранте и проходят через начало координат. Торможение АД длится до полной остановки ротора.

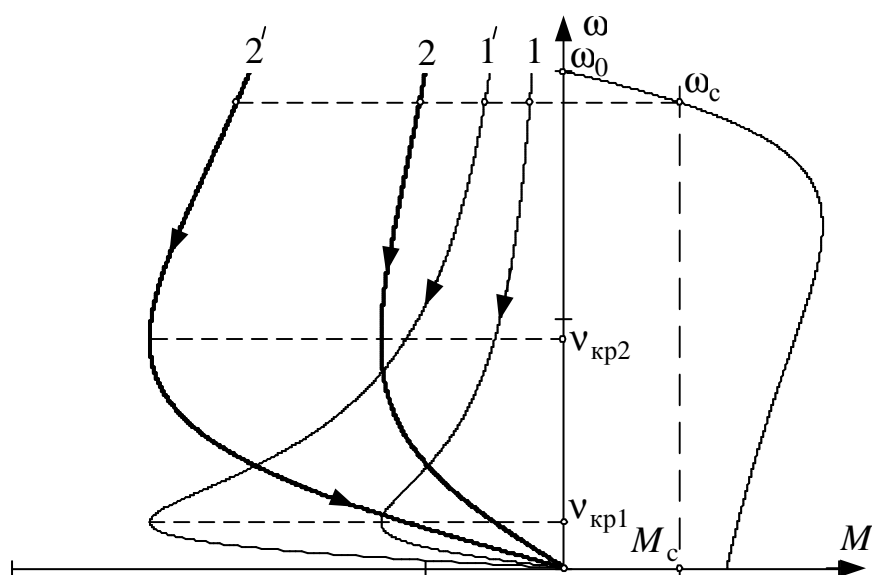


Рис. 4.6

Динамическое торможение широко используется в подъемно-транспортных и станочных приводах для точной остановки двигателя или как способ получения пониженных скоростей спуска груза.

4.2. Описание лабораторной установки

Нагрузкой испытуемого АД $M1$ является машина постоянного тока $M2$, механически связанная с ним и включенная по схеме Г-Д с машиной $M3$. Последняя приводится в движение машиной $M4$ (рис. 4.7).

Вращающий момент исследуемого двигателя определяется по току якоря нагрузочной машины $M2$ с учетом в ней момента потерь (2.4). Нетрудно видеть, что лабораторная установка аналогична установке лабораторной работы № 2 (разд. 2.2) и отличается только типом исследуемого двигателя.

Для ограничения тока статора испытуемого АД снятие механических характеристик производится при пониженном напряжении на статоре. При построении механических характеристик необходимо момент, полученный из опыта, пересчитать на номинальное напряжение по формуле:

$$M = M' \left(\frac{U_{1н}}{U_1} \right)^2, \quad (4.10)$$

где $U_{1н}$ – номинальное напряжение на статоре; U_1 – напряжение, подводимое к статору при опыте; M' – значение вращающегося момента двигателя, рассчитанное по формуле (2.4).

При снятии характеристик в двигательном режиме максимум момента должен быть установлен весьма тщательно, для чего следует плавно регулировать ток возбуждения машины $M3$. В процессе всей работы ток возбуждения нагрузочной машины $M2$ следует поддерживать постоянным.

Характеристики испытуемого двигателя $M1$ рекомендуется снимать сначала в генераторном режиме, затем в двигательном и режиме противовключения, переходя последовательно из второго в первый, а затем четвертый квадрант. Порядок снятия естественной и искусственных характеристик одинаков.

При выполнении работы **запрещается**:

- а) соединять цепи якорей машин $M2$ и $M3$ при несовпадении по величине и знаку их ЭДС;
- б) разгонять испытуемый двигатель $M1$ до скорости выше $1,2\omega_0$;
- в) превышать ток в якоре машин $M1-M3$ более $1,2I_n$.

4.3. Задание для домашней подготовки

1. Усвоить основные положения разд. 4.1 и повторить теоретический материал, посвященный режимам работы АД и условиям перехода электродвигателя из одного режима работы в другой [1 – § 3.3-3.8; 2 – § 2.2; 3 – § 4.1-4.3, 4.4.2, 4.5.1; 4 – § 3.1-3.3; 6 – § 4.2-4.7; 7 – § 5.1, 5.2, 5.4, 5.10; 9 – § 3.7, 3.8].

2. Изучить устройство электроустановки и выяснить назначение всех регуляторов, переключателей и измерительных приборов (разд. 2.2 и 4.2).

3. Подготовить отчет для проведения лабораторной работы, содержащий порядок проведения работы, таблицы для занесения результатов опытов и необходимые расчетные формулы.

4. Нарисовать примерные графики механических характеристик АД:

- а) естественную;
- б) искусственные при симметричных и несимметричных добавочных сопротивлениях в цепи ротора;
- в) искусственные при симметричных и несимметричных добавочных сопротивлениях в цепи статора;
- г) искусственную при уменьшении напряжения на статоре;
- д) в тормозных режимах работы при активном и реактивном статическом моменте.

4.4. Программа работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки.
2. Протарировать нагрузочную машину.
3. Снять кривую потерь нагрузочной машины.
4. Снять скоростную характеристику нагрузочной машины, затем по ней рассчитать и с учетом кривой потерь построить механическую

характеристику испытуемого двигателя при перечисленных ниже условиях.

- 4.1. Генераторный режим с отдачей энергии в сеть.
 - 4.2. Двигательный режим.
 - 4.3. Торможение противовключением.
 - 4.4. Динамическое торможение с независимым возбуждением.
 - 4.5. Введение добавочных сопротивлений в цепь ротора (реостатные характеристики).
5. Рассчитать механические характеристики и сделать анализ полученных результатов работы.

4.5. Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки и записать паспортные данные электрических машин $M1 - M4$.

Проверить исходное состояние оборудования установки:

- автомат $QF1$ в нижнем положении (выключен);
- ключи $SQ1$ и $SQ2$ в нижнем положении (выключены);
- тумблеры $SA1 - SA6$ в нижнем положении;
- потенциометр $R11$ в крайнем левом положении (полностью введен).

Доложить преподавателю о состоянии готовности установки и подать напряжение на стенд, о чем сигнализирует индикатор $HL1$.

2. Тарирование нагрузочной машины

Включить автомат $QF1$ (индикатор $HL2$) и ключ $SQ1$ (индикатор $HL5$).

Регулятором напряжения (автотрансформатор $T1$) установить $U_1 = 100$ В ($PV1$). Нажать кнопку «Пуск» $SB2$ (срабатывает контактор $KM1$ и подключает статорную обмотку $M1$ к сети). Установить ток в обмотке возбуждения $LM2$ равным $0,7$ А и поддерживать его постоянным в течение всей работы.

Снять показания скорости ω ($PV2$) и ЭДС E ($PV3$) машины $M2$ и определить коэффициент пропорциональности $c_M\Phi$ по формуле (2.6).

3. Снятие кривой потерь $\omega = f(\Delta I)$

Нажать кнопку «Стоп» $SB1$. После остановки $M2$ замкнуть якорную цепь машин $M2$ и $M3$ ключом $SQ2$. Установить минимальное значение тока $LM3$ ($R11$ полностью введен). Нажатием кнопки «Пуск» $SB5$ запустить $M4$ (индикатор $HL4$).

Резистором $R11$ увеличивать ток $LM3$ ($PA5$) от 0 до $0,5$ А с шагом $0,1$ А. При этом фиксируются показания скорости ω ($PV2$) и тока I ($PA3$) машины $M2$. После этого резистором $R11$ уменьшить ток $LM3$ до нуля, перевести $SA2$ в противоположное положение и снять вторую ветвь кривой потерь. После чего уменьшить ток $LM3$ до нуля и отключить $SQ2$.

4. Снятие электромеханических характеристик

4.1. Генераторный режим с отдачей энергии в сеть

Регулятором напряжения $T1$ установить на статоре $60 \div 70$ В. Нажать кнопку «Пуск» $SB2$. Тумблеры $SA5 - SA6$ перевести в верхнее положение (добавочные сопротивления в цепи ротора $M1$ отсутствуют). Перед замыканием ключа $SQ2$ необходимо согласовать величину и направление напряжений на зажимах машин $M2$ и $M3$.

4.1.1. Согласование напряжений машин $M2$ и $M3$

В нижнем положении тумблера $SA1$ измерить напряжение $M2$, а в верхнем – напряжение $M3$. При несовпадении напряжений по знаку уменьшить ток резистором $R11$ в $LM3$ до нуля ($PA5$) и перевести $SA2$ в противоположное положение. Требуемую величину напряжения машины $M3$ установить изменением тока в $LM3$. **Только при совпадении напряжений по величине и направлению перевести $SQ2$ в верхнее положение (замкнуть якорные цепи машин $M2$ и $M3$).**

4.1.2. Увеличивая ток $LM3$, довести скорость $M1$ до предельно-допустимой скорости (не выше $1,2\omega_0$). После этого приступить к снятию характеристики $M1$ в генераторном режиме (когда $\omega > \omega_0$). Уменьшая ток $LM3$, снять 2-3 значения тока ($PA3$) и скорости ($PV2$) $M2$. При скорости $M1$ равной синхронной перейти к выполнению пункта 4.2.

4.2. Двигательный режим $M1$

Переход из генераторного режима в двигательный происходит автоматически при скорости $M1$ равной ω_0 . Уменьшая далее ток $LM3$ продолжить снятие характеристики (5-7 значений) до остановки $M1$. Если с уменьшением тока $LM3$ до нуля остановить $M1$ не удастся, то следует перевести $SA2$ в противоположное положение и продолжить снятие характеристики, увеличивая ток $LM3$. После остановки $M1$ перейти к выполнению пункта 4.3.

4.3. Режим торможения противовключением

Переход из двигательного режима в режим торможения противовключением происходит автоматически при смене направления вращения $M1$. Изменяя ток $LM3$, продолжить снятие характеристики (2-3 значения), при этом следить за выполнением условия $I_a < 1,2I_n$ ($PA3$).

После завершения опыта резистором $R11$ уменьшить ток $LM3$ до нуля, тумблер $SA2$ перевести в противоположное положение и, увеличивая ток $LM3$, добиться нулевого значения тока $PA3$ и отключить $SQ2$. Затем разомкнуть $SQ2$ и отключить $M1$ кнопкой «Стоп» $SB1$.

4.4. Режим динамического торможения $M1$

Уменьшить значение тока $LM3$ ($PA5$) до нуля и замкнуть $SQ2$. Нажать кнопку «ДТ» $SB3$ (индикатор $HL3$). Включением тумблера $SA3$ зашунтировать сопротивление $R2$ (измерить величину постоянного тока в цепи статора $M1$ при помощи $PA1$) и ввести в роторную цепь добавочное сопротивление –

соответственно в каждую фазу $R4$, $R6$, $R8$ (включением тумблера $SA6$ зашунтировать сопротивления $R5$, $R7$, $R9$).

Увеличивая ток $LM3$, снять 4-6 показаний скорости ($PV2$) и тока ($PA3$) нагрузочной машины $M2$. Опыт повторить при выключенном тумблере $SA6$ (полное сопротивление в роторе $M1$) для двух значений постоянного тока в статорной цепи.

После завершения эксперимента уменьшением тока в $LM3$ до нуля остановить $M2$, отключить $SQ2$, нажать кнопку «Стоп» $SB1$.

4.5. Реостатные характеристики $M1$ при введении добавочных сопротивлений в цепь ротора

Установить регулятором напряжения $T1$ 110 В. Ввести в роторную цепь добавочные сопротивления $R4$, $R6$, $R8$ (включить тумблер $SA6$). Нажать кнопку «Пуск» $SB2$. **Выполнив пункт 4.1.1**, замкнуть $SQ2$.

Уменьшая ток $LM3$, снять 5-7 показаний скорости ($PV2$) и тока ($PA3$) машины $M2$. Опыт повторить при другой величине сопротивления в цепи ротора (выключить тумблер $SA6$). После завершения эксперимента перейти к выполнению пункта 5.

5. Окончание лабораторной работы

Привести установку в исходное состояние – при нулевом значении тока якоря $M2$ ($PA3$) отключить $SQ2$, затем нажать кнопки «Стоп» $SB1$ и $SB4$. Выключить $SQ1$ и автомат $QF1$.

6. Расчет механических характеристик и анализ результатов

Расчет механических характеристик исследуемой машины $M1$ производится в следующем порядке:

6.1. На основании снятой в пункте 3 кривой $\omega = f(\Delta I)$ и коэффициента $c_M \Phi$ (пункт 2) рассчитать кривую потерь $\omega = f(\Delta M)$, используя формулу (2.5).

6.2. По данным, снятым в пунктах 4.1 – 4.5, выполнить расчет механических характеристик $\omega = f(M')$ при пониженном напряжении на статоре, используя формулы (2.5) и (2.4). Следить за соотношениями знаков в формуле (2.4) при расчете механических характеристик машины $M1$ в двигательном и тормозных режимах работы.

6.3. Используя формулу (4.10), пересчитать механические характеристики машины $M1$ из пункта 6.2 на номинальное напряжение $M1$.

6.4. На основании паспортных данных машины $M1$, используя выражения (4.6) и (4.8), рассчитать естественную механическую характеристику и сопоставить ее с экспериментальной.

6.5. Определить величины добавочных активных сопротивлений $R_{доб}$, включаемых в цепь ротора испытуемой машины $M1$, при проведении опытов в пункте 4.5.

6.6. Записать выводы по работе, характеризующие вид полученных в результате экспериментов механических характеристик АД, пояснить влия-

ние параметров элементов установки на изменение свойств этих характеристик и др.

4.6. Содержание отчета

1) Схема лабораторной установки; 2) паспортные данные машин и приборов; 3) таблицы с опытными и расчетными данными; 4) основные расчетные формулы; 5) механические характеристики испытуемого двигателя для всех режимов его работы; 6) графики естественной и искусственных теоретических механических характеристик АД, а также характеристики при его работе в различных тормозных режимах (пункт 4 разд. 2.3); 7) краткие выводы по работе.

4.7. Контрольные вопросы

1. Изобразить естественную характеристику АД в первом, втором, четвертом квадрантах и пояснить режимы работы двигателя в этих квадрантах.

2. Какую часть механической характеристики АД называют рабочим участком?

3. Как влияет изменение величины напряжения сети на механические характеристики АД?

4. Построить и объяснить механические характеристики АД:

а) при симметричном включении активных сопротивлений в цепь ротора;

б) при несимметричном включении активных сопротивлений в цепях ротора и статора;

в) при динамическом торможении с различными значениями добавочного сопротивления в цепи ротора и величины постоянного тока в цепи статора.

5. Какими способами может быть осуществлено торможение АД в его основной схеме включения?

6. Объяснить порядок расчета и построения механической характеристики АД по паспортным данным.

7. В каких диапазонах изменяется скольжение АД в режимах:

а) генераторного торможения с отдачей энергии в сеть;

б) двигательном;

в) торможения противовключением;

г) динамического торможения?

8. Что такое перегрузочная способность АД и какова ее зависимость от напряжения в обмотке статора?

9. Каков порядок включения лабораторной установки и снятия механических характеристик?

10. Какие правила техники безопасности следует выполнять при работе с лабораторной установкой?

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ

Цель работы: экспериментальное определение регулировочной и внешней характеристик тиристорного преобразователя (ТП), а также изучение механических характеристик системы электропривода ТП – ДПТ.

5.1. Основные теоретические положения

Основные способы регулирования скорости ДПТ (см. разд. 2.1) заключаются в изменении активного сопротивления якорной цепи $R_{яц}$, потока возбуждения Φ и подводимого к якору напряжения U . Достоинствами последнего способа являются: экономичность, стабильность механических характеристик, плавность и широкий диапазон регулирования.

Для изменения напряжения на якоре ДПТ применяются управляемые преобразователи напряжения, в качестве которых первоначально использовались электромашинные агрегаты – системы Г-Д (см. разд. 2.2). Однако с развитием электронной техники основным типом преобразователей в регулируемых электроприводах постоянного тока стали полупроводниковые статические преобразователи, в том числе и ТП. Они представляют собой управляемые неперверсивные и реверсивные выпрямители, собранные по нулевой или мостовой однофазной или трехфазной схемам [4, 7, 9, 11].

В обобщенном виде схема m -фазного ТП, к которой можно привести любую из известных схем, представлена на рис. 5.1, а. Цепь нагрузки состоит из ЭДС E (В), индуктивности $L_{яд}$ (Гн) и активного сопротивления $R_{яд}$ (Ом) якорной цепи ДПТ. Напряжение ΔU_B (В) эквивалентно падению напряжения на открытом тиристоре (принять $\Delta U_B \approx 1-2$ В). Трансформатор имеет фазные активное сопротивление R_ϕ (Ом) и индуктивность рассеяния L_ϕ (Гн). Ключи K_1-K_m (тиристоры) представляются идеальными.

Основными характеристиками ТП являются регулировочная $U_d = f(\alpha)$ и внешняя $U_d = f(I_я)$ характеристики, где U_d – выходное (выпрямленное) напряжение ТП, В; $I_я$ – ток нагрузки в якорной цепи ДПТ, А; α – угол управления ТП, характеризующий задержку включения тиристоров от точки их естественного отпираания, град.

Регулировочная характеристика системы ТП – ДПТ при непрерывном токе нагрузки ($L_{яц} = \infty$) определяется выражением:

$$U_d = E_{d0} \cdot \cos \alpha - \Delta U_B - R_{ТП} \cdot I_{якк}, \quad (5.1)$$

где $E_{d0} = \sqrt{2}E_{2\phi}k_{cx}$ – ЭДС ТП при $\alpha=0$; $E_{2\phi}$ – фазная ЭДС обобщенной схемы ТП (рис. 5.1, а); $k_{cx} = \frac{\sin(\pi/m)}{\pi/m}$ – коэффициент схемы выпрямления; m – число фаз обобщенной схемы ТП (число коммутаций тиристоров за период питающей сети); $R_{ТП} = R_{\phi} + m \cdot f \cdot L_{\phi}$ – активное сопротивление ТП, включающее в себя сопротивление трансформатора и сопротивление, характеризующее коммутационное падение напряжения при переключении тиристоров; $I_{яxx}$ – ток якоря ДПТ на холостом ходу; f – частота сети, Гц.

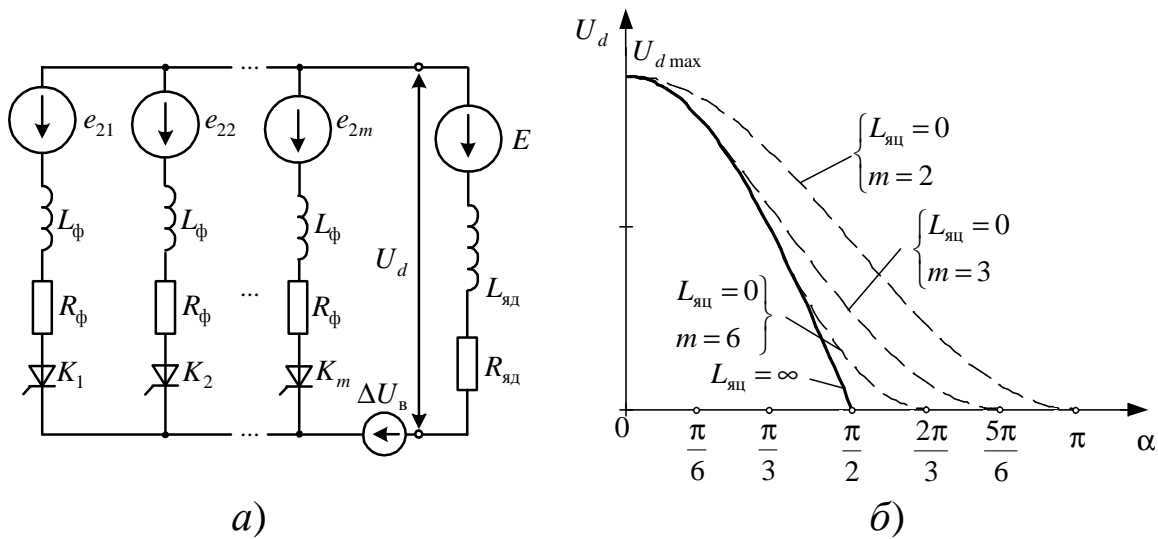


Рис. 5.1

Максимальное значение угла управления $\alpha_{гр}$, при котором ток начинает прерываться ($L_{яц} = 0$), можно определить следующим образом:

$$\alpha_{гр} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}. \quad (5.2)$$

При работе ТП на активную нагрузку с $\alpha > \alpha_{гр}$ регулировочная характеристика описывается уравнением:

$$U_d = E_{d0} \frac{1 - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{m}\right)}{2\sin(\pi/m)} - \Delta U_B - R_{ТП} \cdot I_{яxx}. \quad (5.3)$$

Регулировочные характеристики некоторых ТП приведены на рис. 5.1, б.

Уравнение внешних характеристик системы ТП – ДПТ аналогично (5.1), но предполагает изменение тока якоря от нуля до предельно возможной величины (при фиксированном значении $\alpha = \text{const}$). В нереверсивных ТП (в реверсивных с раздельным управлением) в зоне прерывистого тока внешние характеристики ТП и механические характеристики ДПТ нелинейны, так как двигатель реагирует не на среднее, а на мгновенное значение выпрямленного напряжения.

Особый интерес представляет граничный режим, когда ток становится начально-непрерывным:

$$I_{\text{ягр}} = \frac{E_{d0} \sin \alpha}{2\pi f L_{\text{яц}}} \left(1 - \frac{\pi}{m} \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right), \quad (5.4)$$

где $L_{\text{яц}} = L_{\text{ф}} + L_{\text{яд}}$; $L_{\text{яд}} = 51$ мГн – индуктивность якорной цепи ДПТ.

В зоне прерывистого тока при уменьшении $I_{\text{я}}$ до нуля напряжение ТП при $\alpha \leq \pi/m$ стремится к величине:

$$U_{d\text{max}} \approx \sqrt{2} E_{2\text{ф}} - \Delta U_{\text{в}}. \quad (5.5)$$

При $\alpha > \pi/m$ и $I_{\text{я}} = 0$ напряжение ТП равно мгновенному значению напряжения трансформатора в момент отпирания тиристора:

$$U_{d\text{max}} = \sqrt{2} E_{2\text{ф}} \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{m} \right) - \Delta U_{\text{в}}. \quad (5.6)$$

Уравнение механических характеристик системы ТП – ДПТ имеет вид:

$$\omega = \frac{E_{d0} \cdot \cos \alpha - \Delta U_{\text{в}}}{c_E \Phi} - \frac{R_{\text{яц}} M}{c_E c_M \Phi^2}, \quad (5.7)$$

где сопротивление якорной цепи включает в себя сопротивления ТП и якоря ДПТ ($R_{\text{яд}} = 5,3$ Ом) – $R_{\text{яц}} = R_{\text{ТП}} + R_{\text{яд}}$.

Механические характеристики системы ТП – Д, работающей в режиме прерывистых токов, зависят от угла проводимости тока $\lambda < 2\pi/m$, поэтому их расчет ведется путем определения среднего значения тока и ЭДС двигателя ($E = c_E \Phi \omega$) по формулам:

$$I_{\text{я}} = \frac{E_{d0} \sin(\lambda/2)}{2\pi f L_{\text{яц}} \sin(\pi/m)} \left[1 - \frac{\lambda}{2} \operatorname{ctg}\left(\frac{\lambda}{2}\right) \right] \sin\left(\frac{\lambda}{2} + \alpha - \frac{\pi}{m}\right);$$

$$E = \frac{\pi E_{d0}}{\lambda m \sin(\pi/m)} \left[\sin\left(\lambda + \alpha - \frac{\pi}{m}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{m}\right) \right] - I_{\text{я}} R_{\text{яц}}.$$
(5.8)

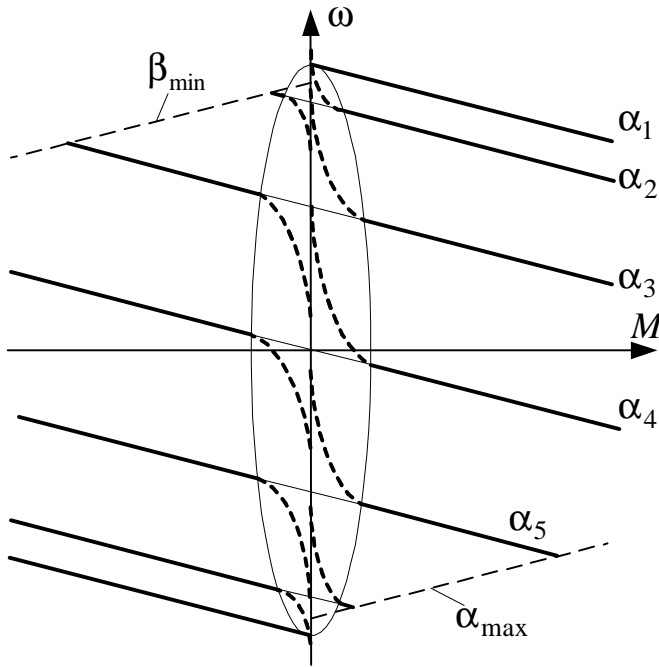


Рис. 5.2

Механические характеристики системы ТП – ДПТ приведены на рис. 5.2, где сплошные линии характеризуют работу электропривода в зоне непрерывного тока, а штриховые – в зоне прерывистого тока.

При $\alpha_4 = \pi/2$ получается характеристика динамического торможения. Если же угол регулирования $\alpha > \pi/2$, то система электропривода работает в режиме рекуперативного торможения. В этом случае ТП работает в инверторном режиме, преобразуя энергию постоянного тока, генерируемую ДПТ, в энергию переменного

тока и отдавая ее в сеть. ЭДС ДПТ уравновешивается противоЭДС инвертора и падением напряжений в якорной цепи:

$$E = E_{d0} \cos\beta + \Delta U_{\text{в}} + R_{\text{яц}} I_{\text{я}},$$
(5.9)

где $\beta = \pi - \alpha$ – угол опережения открывания тиристорov, используемый для инверторного режима работы ТП.

Максимальный угол регулирования (минимальный угол опережения), предотвращающий «опрокидывание» инвертора:

$$\alpha_{\text{max}} \leq \pi - (\gamma + \delta) \text{ или } \beta_{\text{min}} \geq \gamma + \delta,$$
(5.10)

где $\gamma = (15 \div 20)^\circ$ – угол коммутации одновременно работающих тиристорov, $\delta = (3 \div 5)^\circ$ – угол, характеризующий восстановление запирающих свойств полупроводниковых тиристорov.

Ограничение величины α_{\max} (β_{\min}) приводит к ограничению ЭДС двигателя, что в свою очередь ограничивает наибольшее значение скорости электропривода – пунктирные прямые линии на рис. 5.2.

Режим рекуперативного торможения можно получить при положительном значении угловой скорости и изменении направления тока в якорной цепи ДПТ (во втором квадранте), для чего используют два комплекта ТП.

Применяется два основных способа включения комплектов ТП [11]: перекрестный (восьмеричный) и встречно-параллельный (противопараллельный). В перекрестных схемах преобразователи получают питание от изолированных групп вторичных обмоток трансформатора. При встречно-параллельном включении преобразователей используется одна многофазная группа вторичных обмоток трансформатора.

Характер работы двухкомплектных схем ТП определяется в основном принципами их совместного или раздельного управления. В первом случае управляющие сигналы подаются на оба комплекта ТП, один из которых работает в выпрямительном, а другой – в инверторном режиме. При этом под действием разности средних значений ЭДС выпрямителя и инвертора, минуя цепь нагрузки (ДПТ), может протекать уравнивающий ток. Для ограничения этого тока, дополнительно нагружающего тиристоры и трансформаторы, используются уравнивающие реакторы, увеличивающие электромагнитную инерционность и массогабаритные показатели электропривода.

Раздельное управление комплектами ТП применяется для полного исключения уравнивающих токов. При этом в двигательном режиме электропривода импульсы управления подаются на один комплект ТП при надежно закрытом втором комплекте. Для перехода в режим генераторного торможения вначале снимаются импульсы управления с первого комплекта и после паузы 5-10 мс подают управление на второй комплект, работающий в инверторном режиме. При переходе привода из одного режима в другой неизбежно появляется область прерывистых токов, а при линейном согласовании углов управления ($\alpha_1 + \alpha_2 = \pi$) еще и разрыв механических характеристик вблизи точки холостого хода (рис. 5.2).

5.2. Описание лабораторной установки

Функциональная схема стенда приведена на рис. 5.3. Подключение установки осуществляется автоматом $QF1$, при этом подается трехфазное напряжение на первичные обмотки трансформаторов $T1$ и $T2$, питающих два идентичных реверсивных трехфазных мостовых тиристорных преобразователя ТП1 и ТП2. Регулирование выходной ЭДС последних осуществляется соответствующими системами управления (СУ), питание которых обеспечивается замыканием ключа $SA1$.

Направление вращения механически связанных машин постоянного тока $M1$ и $M2$ задается кнопками $SB1$ «Вперед» и $SB2$ «Назад», что определяет режим работы ТП (выпрямительный или инверторный) и ДПТ (двигательный или генераторный). Углы регулирования α и опережения β задаются соответствующими регуляторами R_p . Задающее устройство (ЗУ) вырабатывает сигнал управления U_y , который поступает на вход системы импульсно-фазового управления (СИФУ).

Переключатель характеристик (ПХ) осуществляет согласование однополярной регулировочной характеристики с реверсивным сигналом U_y . Раздельное управление комплектами ТП обеспечивается логическим переключающим устройством (ЛПУ), которое в зависимости от знака сигнала задания U_3 при разрешающем сигнале U_p с датчика проводимости вентилей (ДПВ) осуществляет подачу управляющих импульсов с СИФУ на тиристоры соответствующего комплекта – «Вперед» или «Назад».

В установившихся режимах момент на валу испытуемой машины определяется по формуле (2.4). Электромагнитный момент нагрузочной машины $M_{эм}$ определяется в соответствии с выражением (2.5), где коэффициент пропорциональности $c_M\Phi$ можно определить по формуле:

$$c_M\Phi = \frac{U_H(1+\eta_H)}{2\omega_H}. \quad (5.11)$$

Для определения момента ΔM снимается кривая потерь $\omega = f(\Delta I)$, где $\Delta I = I_{якx}$ – ток якоря машины на холостом ходу. Учитывая коэффициент пропорциональности $c_M\Phi$ (5.11), рассчитывается кривая потерь $\omega = f(\Delta M)$.

5.3. Задание для домашней подготовки

1. Усвоить основные положения разд. 5.1 и повторить теоретический материал, посвященный регулированию скорости ДПТ путем изменения питающего якоря напряжения, а также устройству и принципу действия различных ТП [2 – § 3.1.3-3.1.5; 3 – § 3.5.3, 3.8; 4 – § 2.9, 8.2-8.4; 7 – § 4.7; 9 – § 4.4].

2. Изучить устройство электроустановки и выяснить назначение всех регуляторов, переключателей и измерительных приборов (разд. 5.2).

3. Подготовить отчет для проведения лабораторной работы, содержащий порядок проведения работы, таблицы для занесения результатов опытов и необходимые расчетные формулы.

4. Нарисовать принципиальную электрическую схему силовой части системы ТП – ДПТ, используемую в лабораторной установке.

5. Рассчитать и построить семейство внешних характеристик системы ТП – ДПТ по формулам (5.1), (5.3) и (5.4) при изменении тока якоря от нуля

до 8 А. Активное сопротивление фазы трансформатора $T1$ принять $R_{\phi} = 0,3$ Ом, индуктивность рассеяния $L_{\phi} = 1$ мГн. При этом учесть, что в трехфазной мостовой схеме выпрямления ток протекает через два тиристора по двум вторичным обмоткам трансформатора, поэтому следует удвоить значения величин $\Delta U_{в}$ и R_{ϕ} .

5.4. Программа работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки.
2. Снять кривую потерь $\omega = f(\Delta I)$.
3. Снять регулировочную характеристику $U_d = f(\alpha)$.
4. Снять внешние $U_d = f(I_{я})$ и скоростные $\omega = f(I_{я})$ характеристики реверсивной системы ТП – ДПТ в перечисленных ниже режимах работы.
 - 4.1. Двигательный режим в первом квадранте осей координат.
 - 4.2. Генераторный режим во втором квадранте осей координат.
 - 4.3. Двигательный режим в третьем квадранте осей координат.
 - 4.4. Генераторный режим в четвертом квадранте осей координат.
5. Рассчитать и построить характеристики системы ТП – ДПТ и проанализировать результаты работы.

5.5. Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки и записать паспортные данные машин $M1$ и $M2$.

Проверить исходное состояние оборудования установки:

- автомат $QF1$ в нижнем положении (выключен);
- ключ $SA1$ в горизонтальном положении (выключен);
- регуляторы « α » и « β » в крайнем левом положении.

Доложить преподавателю о состоянии готовности установки и подать напряжение на стенд, о чем сигнализирует индикатор $HL1$.

При работе с установкой **запрещается** допускать превышение тока в якорных цепях машин $M1$ и $M2$ выше значения $1,6I_{н}$.

2. Снятие кривой потерь $\omega = f(\Delta I)$

Включить автомат $QF1$ (индикатор $HL2$) – первичные обмотки трансформаторов $T1$ и $T2$ подключаются к трехфазной сети. Подать питание на систему управления ключом $SA1$ (индикатор $HL3$).

Нажав кнопку «Вперед» $SB1$ и, медленно вращая ручку регулятора « α » по часовой стрелке, задаем 5-7 значений углов α и фиксируем показания тока по амперметру $PA1$ и скорости по вольтметру $PV3$.

Вывести регулятор « α » в крайнее левое положение, нажать кнопку «Стоп» *SB3* и после выдержки времени (6 с) нажать кнопку «Назад» *SB2*. Снять кривую потерь при противоположном вращении роторов машин, вращая регулятор « α » и фиксируя ток (*PA1*) и скорость (*PV3*). После завершения опыта вывести регулятор « α » в крайнее левое положение и нажать кнопку «Стоп» *SB3*.

3. Снятие регулировочной характеристики $U_d = f(\alpha)$

Нажать кнопку «Вперед» *SB1*. Медленно вращая регулятор « α » по часовой стрелке, задаем 7-10 значений углов α и фиксируем показания вольтметра *PV1*. После завершения опыта вывести регулятор « α » в крайнее левое положение.

4. Снятие внешних и скоростных характеристик системы ТП – ДПТ

4.1. Работа в первом квадранте осей координат

Регулятором « α » установить напряжение на двигателе *M1* (*PV1*) 110 В. Медленно вращая ручку регулятора « β », задаем 5-7 значений тока по амперметру *PA1* и фиксируем показания вольтметров *PV1* и *PV3*. Следить за выполнением условия $I_{\alpha} < 1,6I_{н}$. При срабатывании защиты от перегрузок по току следует вывести все регуляторы в крайнее левое положение (против часовой стрелки) и нажать кнопки «Сброс».

Вывести регулятор « β » в крайнее левое положение и повторить опыт при напряжении на двигателе *M1* 220 В (α_{\min}). После завершения опыта вывести регуляторы « β » и « α » в крайнее левое положение.

4.2. Работа во втором квадранте осей координат

Регулятором « α » установить напряжение на *M1* (*PV1*) 220 В. Медленно вращая ручку регулятора « β », нагрузить машину *M1* до $1,6I_{н}$ (*PA1*). Регулятором « α » задаем 5-7 значений тока по амперметру *PA2* и фиксируем показания вольтметров *PV2* и *PV3*. Следить за выполнением условия $I_{\alpha} < 1,6I_{н}$.

Вывести регулятор « α » в крайнее левое положение, регулятор « β » в крайнее правое положение (β_{\max}). Регулятором « α » установить такое напряжение на *M1*, чтобы выполнялось условие $I_{\alpha} < 1,6I_{н}$. Медленно вращая ручку регулятора « α » в крайнее левое положение (против часовой стрелки), задаем 5-7 значений тока по амперметру *PA2* и фиксируем показания вольтметров *PV2* и *PV3*. После завершения опыта вывести регуляторы « α » и « β » в крайнее левое положение и нажать кнопку «Стоп» *SB3*.

4.3. Работа в третьем квадранте осей координат

Нажать кнопку «Назад» *SB2*. Проведение эксперимента осуществить аналогично пункту 4.1. После завершения опыта вывести регуляторы « β » и « α » в крайнее левое положение.

4.4. Работа в четвертом квадранте осей координат

Проведение эксперимента осуществить аналогично пункту 4.2. После завершения опыта вывести регуляторы « α » и « β » в крайнее левое положение, нажать кнопку «Стоп» *SB3*, отключить *SA1* и *QF1*.

5. Расчет и построение характеристик системы ТП – ДПТ

5.1. На основании формул (5.1) и пункта 2 рассчитать и построить регулировочную характеристику системы ТП – ДПТ. Сравнить ее с экспериментальной характеристикой $U_d = f(\alpha)$, полученной в пункте 3.

5.2. На основании данных пункта 2 и рассчитанного по формуле (5.11) коэффициента $c_M \Phi$ рассчитать и построить кривую потерь $\omega = f(\Delta M)$, используя выражение (2.5).

5.3. На основании снятых в пункте 4 данных построить внешние и механические характеристики, используя формулы (2.4), (2.5) и кривую потерь $\omega = f(\Delta M)$ из пункта 5.2. Знак плюс в выражении (2.4) соответствует генераторному режиму работы испытуемой машины, минус – двигательному режиму. Используя выражения (5.7) и (5.8), рассчитать и построить «теоретические» механические характеристики системы ТП – ДПТ.

5.4. Записать выводы по работе, характеризующие вид полученных в результате экспериментов характеристик системы ТП – ДПТ, пояснить их поведение и сравнить с «теоретическими».

5.6. Содержание отчета

1) Принципиальная электрическая схема лабораторной установки; 2) паспортные данные машин; 3) таблицы с опытными и расчетными данными; 4) основные расчетные формулы; 5) графики регулировочных характеристик, снятые экспериментально и рассчитанные; 6) графики внешних и механических характеристик системы ТП – ДПТ для различных режимов работы, снятые экспериментально и рассчитанные; 7) краткие выводы по работе.

5.7. Контрольные вопросы

1. Какие разновидности ТП используются в электроприводе?
2. Поясните принцип действия управляемого ТП.
3. Какова особенность реверсивного ТП?
4. Укажите назначение ЛПУ в реверсивной системе ТП – ДПТ.
5. Поясните принципы отдельного и совместного управления реверсивным ТП. Укажите их основные достоинства и недостатки.
6. Объясните назначение блока СИФУ в системе ТП – ДПТ.
7. Перечислите основные характеристики системы ТП – ДПТ.
8. Как влияет режим прерывистого тока на вид механических характеристик системы ТП – ДПТ?

Лабораторная работа № 6

ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Цель работы: изучение методов и законов частотного управления в асинхронном электроприводе; исследование характеристик трехфазного АД при частотном регулировании скорости.

6.1. Основные теоретические положения

Регулирование скорости АД с помощью изменения частоты f_1 питающего его статор напряжения U_1 является более экономичным по сравнению со способами регулирования, сопровождающимися изменением скольжения: уменьшение амплитуды U_1 , введение в цепь ротора добавочного активного сопротивления или источника электрической энергии (двигатели двойного питания и каскадные схемы [3]).

Для изменения частоты питающего напряжения чаще всего применяют статические преобразователи частоты (ПЧ) на автономных инверторах напряжения. КПД современных ПЧ составляет около 98 %, из сети потребляется практически только активная составляющая тока нагрузки, микропроцессорная система управления обеспечивает высокое качество управления электродвигателем и контролирует множество его параметров, предотвращая возможность развития аварийных ситуаций. В связи с этим исследование методов управления и регулирования асинхронного двигателя при частотном управлении является актуальной задачей.

Максимальный (критический) момент АД, согласно формуле (2.4), можно выразить через величины U_1 и f_1 (при допущении $R_1 = 0$) [4]:

$$M_{\max} = M_k = c \cdot \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2, \quad (6.1)$$

где $c = 3p / (8\pi^2 L_k)$ – постоянная величина, Гн^{-1} ; L_k – индуктивность короткого замыкания, Гн; p – число пар полюсов АД.

Из (6.1) следует, что при изменении f_1 для сохранения перегрузочной способности АД ($\lambda = M_k / M_c = \text{const}$) необходимо изменять амплитуду U_1 . В 1925 г. академик М. П. Костенко сформулировал закон частотного управления:

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \frac{f_1}{f_{1н}} \sqrt{\frac{M_c}{M_n}}, \quad (6.2)$$

где M_n , U_{1n} и f_{1n} – номинальные значения нагрузочного момента, амплитуды и частоты питающего напряжения АД.

Если требуется регулировать частоту вращения при постоянном нагрузочном моменте ($M_c = \text{const}$ на рис. 6.1, а), то уравнение (6.2) примет вид:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const}, \quad (6.3)$$

т. е. питающее напряжение следует изменять прямо пропорционально его частоте. При этом мощность двигателя увеличивается прямо пропорционально возрастанию частоты вращения ω : $P_2 = M \cdot \omega$.

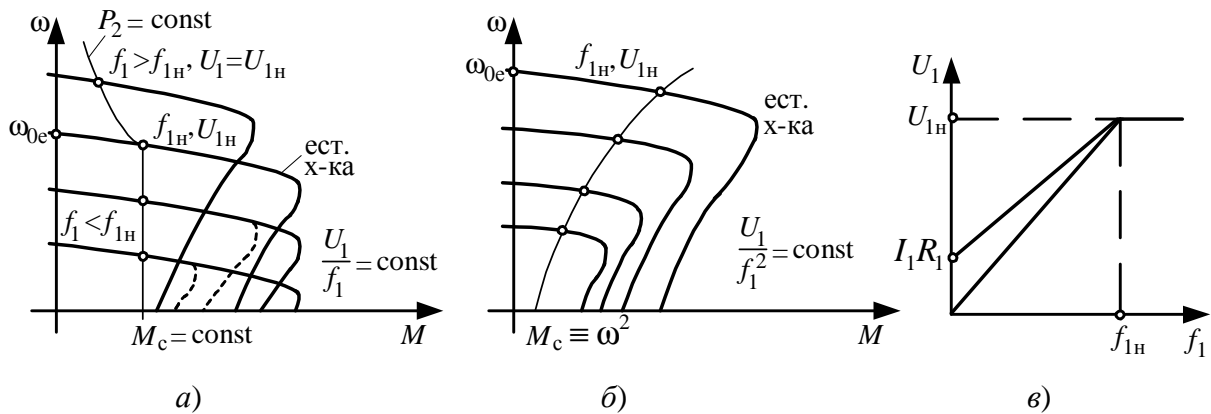


Рис. 6.1

Если требуется поддерживать режим постоянной мощности электродвигателя ($P_2 = \text{const}$), то следует выполнять условие:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}. \quad (6.4)$$

Как правило, такой режим используется при повышенных значениях частоты ($f_1 > f_{1n}$ на рис. 6.1, а), поскольку напряжение, прикладываемое к статорным обмоткам АД, по условиям нагревостойкости изоляции не должно быть больше U_{1n} . Магнитный поток АД при $f_1 > f_{1n}$ и $U_1 = U_{1n} = \text{const}$ будет уменьшаться $\Phi \equiv 1/f_1$ [10], синхронная скорость $\omega_0 \equiv f_1$ – увеличиваться, а критический момент M_k – уменьшаться пропорционально $(U_1/f_1)^2$.

При «вентиляторной» нагрузке ($M_c \equiv \omega^2$ на рис. 6.1, б) для сохранения $\lambda = \text{const}$ закон (6.2) будет иметь вид:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}, \quad (6.5)$$

т. е. амплитуду напряжения статора U_1 необходимо изменять пропорционально квадрату частоты f_1 .

Активное сопротивление обмоток статора $R_1 \neq 0$, поэтому реальная величина напряжения, прикладываемая к контуру намагничивания АД, меньше на величину падения напряжения на этом сопротивлении: $\dot{U}'_1 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 R_1$. При малых значениях частоты ($f_1 < 0,5 f_{1н}$) влияние R_1 становится более заметным – критический момент АД в соответствии с (4.4) уменьшается (пунктирные линии на рис. 6.1, а). Для выполнения условия $\lambda = \text{const}$ в формулах (6.3-6.5) величину напряжения следует уменьшать в меньшей степени, по сравнению с уменьшением f_1 , $\sqrt{f_1}$ и f^2 соответственно, т. е. скомпенсировать падение напряжения на R_1 . Так, в выражении (6.3) амплитуда U_1 некоторых ПЧ изменяется по закону:

$$U_1 = U_{1н} \frac{f_1}{f_{1н}} + I_1 R_1 \left(1 - \frac{f_1}{f_{1н}} \right). \quad (6.6)$$

Такой способ управления АД получил название частотного регулирования с IR -компенсацией. Графическая интерпретация закона управления (6.6) с IR -компенсацией приведена на рис. 6.1, в.

В ПЧ многих фирм существует специальный режим измерения R_1 (с учетом нагрева проводников обмотки статора), поэтому IR -компенсация выполняется достаточно точно. В частности, в ПЧ *FVR (Fuji)* и *VLT (Danfoss)* диапазон IR -компенсации составляет 30-100 В.

6.2. Описание лабораторной установки

Основой лабораторного стенда, принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 6.2, является ПЧ (инвертор напряжения) *FVR2.2E11S-4EN* фирмы *Fuji Electric*, предназначенный для привода трехфазных АД.

ПЧ подключается к трехфазной сети напряжением 380 В через автоматический выключатель *QF1* клеммами *L1, L2, L3*. Клеммы выхода инвертора (*U, V, W*) подсоединяются к трехфазному АД, соблюдая чередования фаз. Клеммы *P1, P(+)* предназначены для подсоединения дросселя *L1* в звене постоянного тока, основное назначение которого заключается в фильтрации высокочастотных помех со стороны инвертора.

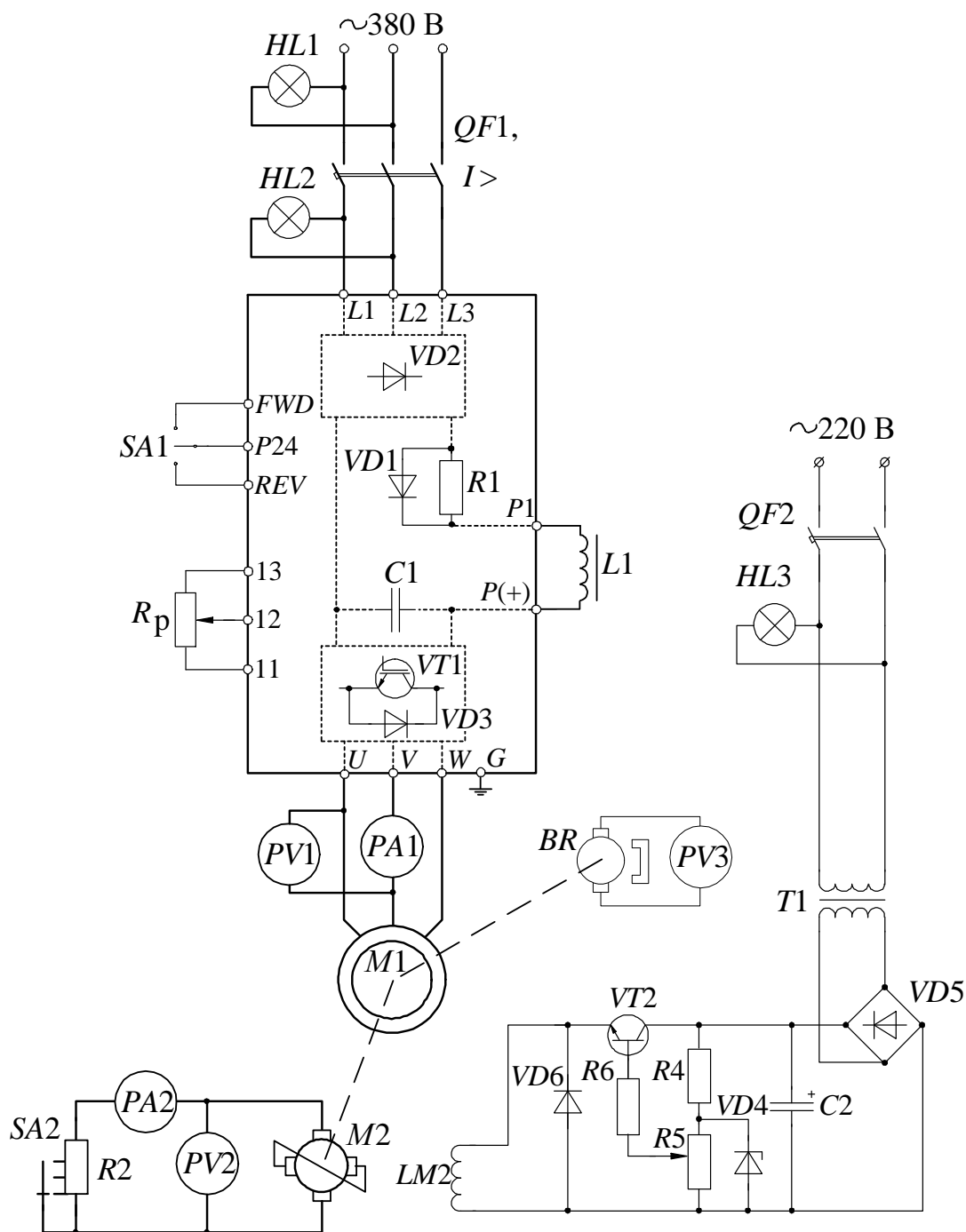


Рис. 6.2

Для задания направления вращения АД используются клеммы $P24$, FWD и REV . При прямом вращении АД замыкаются накоротко $FWD-P24$, а при обратном – $REV-P24$ (ключ $SA1$). Регулировка частоты осуществляется потенциометром R_p , подключенного своими зажимами к клеммам управления 11, 12, 13.

В качестве исполнительного двигателя используется АД с короткозамкнутым ротором $M1$. Нагрузкой АД является электромашинный усилитель (ЭМУ) постоянного тока с поперечным полем $M2$. К якорной цепи ЭМУ под-

ключено сопротивление нагрузки R_2 , величину которого можно изменить переключателем SA_2 (три ступени). Система управления током возбуждения ЭМУ получает питание через автомат QF_2 . Ток возбуждения ЭМУ регулируется потенциометром R_5 .

Крутящий момент на валу M_1 определяется по выражению (2.4). Моментом потерь ΔM пренебречь. Электромагнитный момент $M_{эм}$ нагрузочной машины M_2 может быть найден по измеренным значениям тока в обмотке якоря ЭМУ $I_я$ по формуле (2.5). При изменении тока возбуждения ЭМУ изменяется поток возбуждения Φ , а следовательно, и коэффициент пропорциональности $c_M \Phi$. Поэтому расчет значения коэффициента $c_M \Phi$ необходимо проводить каждый раз при изменении тока возбуждения ЭМУ по формуле (2.6).

Так как ЭМУ хорошо скомпенсирован, то при определении его ЭДС E_{M_2} влиянием реакции якоря на магнитный поток пренебрегают:

$$E_{M_2} = U_{M_2} + R_{яц} I_я, \quad (6.7)$$

где $R_{яц} = R_я + R_{ко} + R_{дп} + R_{по} = 2,1$ Ом – сопротивление якорной цепи ЭМУ; $R_я$, $R_{ко}$, $R_{дп}$ и $R_{по}$ – активные сопротивления якорной, компенсационной обмотки, добавочных полюсов и поперечной обмотки ЭМУ.

Для снятия точки критического момента на механической характеристике АД из-за недостаточной нагрузочной способности ЭМУ следует уменьшить значение напряжения на статоре. При построении механических характеристик испытуемого двигателя M_1 необходимо момент, полученный из опыта, пересчитать на номинальное напряжение по формуле (4.10).

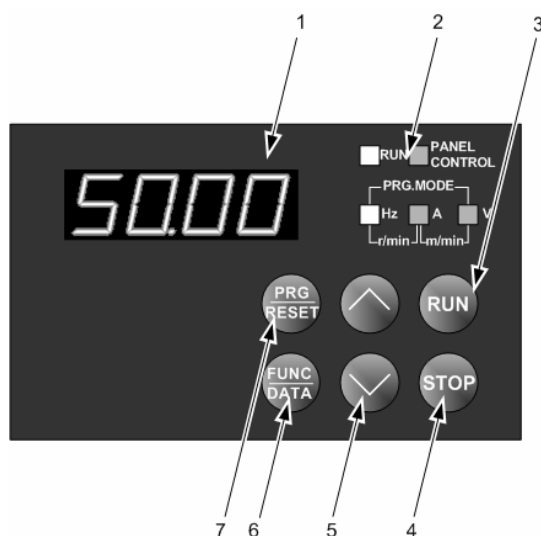


Рис. 6.3

После подключения ПЧ к сети на дисплее панели управления (рис. 6.3) мигает индикация частоты. Основное назначение элементов панели управления:

1. Цифровой дисплей – индикация кодов и данных для программирования; во время эксплуатации на дисплее отображаются значения частоты, тока и др.; при срабатывании системы защиты дисплей при помощи кодов ошибок отображает причину неисправности (табл. 6.1).

2. Индикатор выводимого на дисплей параметра и режима работы (параметр, отображаемый на цифровом дисплее, указывается при помощи светодиодов).

3 и 4. Кнопки ПУСК (RUN) и

СТОП (*STOP*) – кнопки управления инвертором непосредственно с панели управления (местное управление).

5. Кнопки \wedge / \vee – увеличение / уменьшение значения частоты или скорости; в режиме программирования изменяется код функций и их данные (основные группы кодов функций приведены в табл. 6.2).

6. Кнопка ФУНКЦИЯ / ДАННЫЕ (*FUNC / DATA*) – в режиме работы переключает показания частоты, выходного тока и других данных по схеме: частота выходного напряжения → выходной ток → выходное напряжение → синхронная скорость вращения → линейная скорость → частота и т. д.; в режиме программирования необходима для изменения данных функций.

7. Кнопка ПРОГРАММИРОВАНИЕ / СБРОС (*PRG / RESET*) – переключение между режимами работы и программирования; после срабатывания функции защиты сбрасывает состояние аварийного останова.

Таблица 6.1

Индикация на дисплее	Описание функции защиты ПЧ
<i>OC1-3</i>	защита от перегрузки по выходному току
<i>OU1-3</i>	защита от перенапряжения
<i>LU</i>	защита от понижения напряжения
<i>OLU</i>	защита от перегрева элементов силовой цепи
<i>OH1</i>	защита от перегрева радиатора

Таблица 6.2

Группа кодов функций	Функции
F00 – F42	Основные функции
E01 – E41	Функции расширения
C01 – C33	Функции управления частотой
P01 – P10	Параметры двигателя
H01 – H46	Эксплуатационные характеристики
A01 – A19	Параметры 2-го двигателя

6.3. Порядок настройки функций ПЧ

1. Запустить режим программирования – клавиша *PRG / RESET*.
2. Выбрать код функции – клавиши \wedge / \vee (чтобы сменить группу функций, нажать клавишу \wedge (\vee) и, не отпуская ее, нажать *PRG / RESET* – порядок чередования групп соответствует порядку табл. 6.2).
3. Вызвать режим редактирования данных функции – клавиша *FUNC / DATA*.
4. Изменить данные функции – клавиши \wedge / \vee .
5. Сохранить изменения данных – клавиша *FUNC / DATA*.

6. Выйти из режима программирования – клавиша *PRG / RESET*.

В ходе выполнения лабораторной работы **запрещается** проводить настройку параметров ПЧ при работающем АД.

6.4. Задание для домашней подготовки

1. Усвоить основные положения разд. 6.1 и повторить теоретический материал, посвященный частотному способу регулирования скорости АД, а также устройству и принципу действия ПЧ [3 – § 4.4.1, 4.8; 4 – § 3.6.3, 8.5; 6 – § 4.9; 7 – § 5.6; 8 – § 6.2-6.4; 9 – § 4.12; 12 – § 8.5].

2. Изучить устройство электроустановки и выяснить назначение всех регуляторов, переключателей и измерительных приборов (разд. 6.2).

3. Подготовить отчет для проведения лабораторной работы, содержащий порядок проведения работы, таблицы для занесения результатов опытов и необходимые расчетные формулы.

4. Нарисовать принципиальную электрическую схему ПЧ и временные диаграммы, поясняющие принцип его работы при коммутации ключей инвертора с ШИМ.

5. Рассчитать и построить графики законов управления ПЧ $U_1 = f(f_1)$ при $M_c = \text{const}$ и $M_c \equiv \omega^2$. Для первого случая по формуле (6.6) реализовать IR -компенсацию, если $I_1 R_1 = 95 \text{ В}$.

6.5. Программа работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки.
2. Исследование законов управления ПЧ при $M_c = \text{const}$ и $M_c \equiv \omega^2$.
3. Снятие данных для построения семейства механических характеристик АД при различных законах частотного управления.
4. Построение графиков механических характеристик АД и законов частотного управления.

6.6. Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки и записать паспортные данные машин $M1$ и $M2$.

Проверить исходное состояние оборудования установки:

– автоматы $QF1$ и $QF2$ в нижнем положении (выключены);

– ключ $SA1$ в среднем положении (выключен);

– переключатель $SA2$ в положении «1» (максимальная нагрузка ЭМУ);

– регуляторы R_p и $R5$ в крайнем левом положении (полностью введены).

Доложить преподавателю о состоянии готовности установки и подать напряжение на стенд, о чем сигнализирует индикатор $HL1$.

2. Исследование законов управления ПЧ

2.1. Включить автоматический выключатель $QF1$ (индикатор $HL2$).

2.2. Задать необходимый закон частотного управления АД, меняя установку функции $F09$ преобразователя в соответствии с табл. 6.3 и разд. 6.3 (переключатель $SA1$ в нейтральном положении, светодиод RUN не горит – режим программирования ПЧ).

Таблица 6.3

Код функции	Данные	Закон управления ПЧ
F09	1	$U_1 / f_1^2 = \text{const}$
	2	$U_1 / f_1^2 = \text{const}$ с IR -компенсацией
	3	$U_1 / f_1 = \text{const}$
	31	$U_1 / f_1 = \text{const}$ с IR -компенсацией

2.3. Установить переключатель $SA1$ в положение «Вперед».

2.4. Увеличивая частоту f_1 потенциометром R_p , зафиксировать показания линейного напряжения по вольтметру $PV1$ при 5-7 значениях f_1 .

2.5. Осуществить реверс АД, переведя переключатель $SA1$ в положение «Назад», и повторить пункт 2.4.

2.6. После окончания опыта перевести переключатель $SA1$ в нейтральное положение. Для исследования другого закона управления ПЧ (табл. 6.3) перейти к пункту 2.2, иначе перейти к выполнению пункта 3.

3. Исследование семейства механических характеристик АД

3.1. Включить автоматический выключатель $QF2$ (индикатор $HL3$).

3.2. В функции $F05$ ПЧ установить пониженное значение напряжения $U_1 = 160\text{В}$ (порядок установки в разд. 6.3).

3.3. Перевести тумблер $PV3$ в положение «Вкл» для подачи питания цифровому вольтметру $PV3$.

3.4. Задать требуемый закон частотного управления (см. пункт 2.2).

3.5. Вывести потенциометр R_p в крайнее правое положение ($f_1 = 50\text{ Гц}$) и, установив переключатель $SA1$ в положение «Вперед», запустить $M1$.

3.6. Увеличивая потенциометром $R5$ ток возбуждения $M2$, зафиксировать показания вольтметров $PV2$ и $PV3$ для 5-7 значений тока якоря (амперметр $PA2$). Для правильного определения максимального момента АД необходимо как можно точнее снять показание тока якоря ЭМУ при плавном увеличении его тока возбуждения – в момент снижения тока якоря (при увеличении тока возбуждения) зафиксировать «критическую» частоту вращения и уменьшить потенциометром $R5$ ток возбуждения $M2$.

3.7. Повторить пункт 3.6 для 2-3 значений частоты f_1 ПЧ. Регулирование частоты осуществлять потенциометром R_p .

3.8. После завершения опытов перевести переключатель SA1 в нейтральное положение. Для исследования другого закона управления ПЧ (табл. 6.3) перейти к пункту 3.4, иначе перейти к выполнению пункта 3.9.

3.9. Перевести регуляторы R_p и $R5$ в крайнее левое положение и выключить автоматы QF1 и QF2 (нижнее положение).

4. Построение законов управления и механических характеристик

4.1. На основании пункта 2 построить графики зависимостей $U(f)$ для всех законов управления ПЧ и сравнить их с расчетными.

4.2. На основании снятых в пункте 3 данных рассчитать коэффициенты $c_{M\Phi}$ по формулам (2.6) и (6.7) и выполнить расчет механических характеристик $\omega = f(M')$ по (2.5) при пониженном напряжении на статоре АД.

4.3. Используя формулу (4.10), пересчитать и построить механические характеристики машины M1 из пункта 4.2 на номинальное напряжение.

4.4. Записать выводы по работе, характеризующие вид полученных в результате экспериментов механических характеристик АД, пояснить их поведение при различных законах частотного управления и сравнить с теоретическими.

6.7. Содержание отчета

1) Принципиальная электрическая схема лабораторной установки; 2) паспортные данные машин; 3) таблицы с опытными и расчетными данными; 4) основные расчетные формулы; 5) графики законов частотного управления, снятые экспериментально и рассчитанные; 6) графики механических характеристик АД при частотном управлении; 7) краткие выводы по работе.

6.8. Контрольные вопросы

1. Укажите основные достоинства и недостатки частотного регулирования скорости АД.

2. Почему при изменении частоты необходимо одновременно изменять величину напряжения?

3. Зачем в современных ПЧ запрограммированы несколько вариантов законов частотного управления?

4. Как выполняется условие постоянства мощности при частотном управлении?

5. Как влияет пренебрежение активным сопротивлением статора на механические характеристики АД при частотном управлении?

6. Объясните принцип работы ПЧ со звеном постоянного тока.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: исследование теплового процесса короткозамкнутого АД при его работе в длительном и повторно-кратковременном режимах, а также в режиме динамического торможения.

7.1. Основные теоретические положения

Степень использования двигателя и допустимая продолжительная нагрузка определяется нагревом его изоляции. Существует шесть классов нагревостойкости изоляции двигателей с предельно допустимыми значениями температуры:

1) $A < 105^{\circ}\text{C}$ – пропитанные электроизоляционной жидкостью волокнистые материалы (хлопок, бумага, шелк);

2) $E < 120^{\circ}\text{C}$ – синтетические органические пленки;

3) $B < 130^{\circ}\text{C}$ – асбест, слюда, стекловолокно, пропитанные органическими веществами.

4) $F < 155^{\circ}\text{C}$ – асбест, слюда, стекловолокно, пропитанные синтетическими веществами.

5) $H < 180^{\circ}\text{C}$ – асбест, слюда, стекловолокно, пропитанные кремнийорганическими веществами.

6) $C > 180^{\circ}\text{C}$ – слюда, керамика, стекло без пропитки или пропитанные неорганическими веществами.

Наиболее употребляемыми являются классы E , B и F , реже H .

При соблюдении установленных ограничений срок службы изоляции электродвигателей составляет 15-20 лет. Нагрев изоляции выше предельных значений резко сокращает срок службы электродвигателей. Так, для изоляции класса A увеличение нагрева на каждые 10°C выше допустимого значения сокращает срок службы изоляции в два раза.

При выборе мощности двигателя по условиям нагревания различают три основных режима работы двигателя: длительный, кратковременный и повторно-кратковременный.

В длительном режиме работы продолжительность рабочего периода настолько велика, что температура двигателя успевает достичь установившегося режима.

Кратковременный режим работы характеризуется тем, что в рабочий период температура двигателя не успевает достичь установившегося значения, а за время паузы температура двигателя снижается до температуры окружающей среды. Для этого режима установлены следующие стандарты длительности рабочего периода: 15, 30, 60 и 90 мин.

При повторно-кратковременном режиме (рис. 7.1) в период работы температура двигателя не успевает достигнуть установившегося значения, в период паузы не успевает снизиться до температуры окружающей среды. Повторно-кратковременный режим характеризуется коэффициентом включения, б/р:

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} = \frac{t_p}{t_p + t_0},$$

где t_p – время работы двигателя, с; $t_{\text{ц}}$ – время цикла, с; t_0 – время паузы, с.

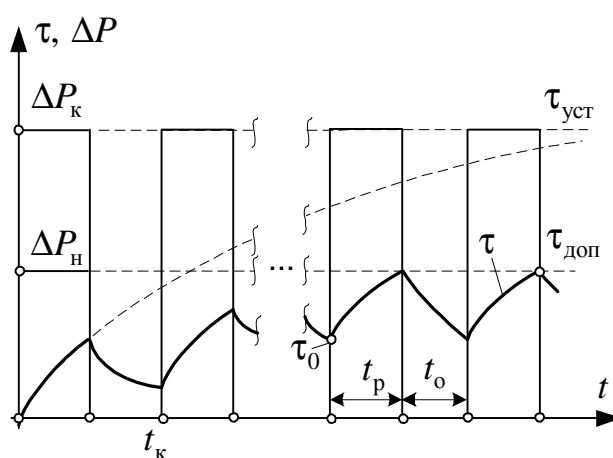


Рис. 7.1

На практике коэффициент включения выражают в процентах и называют относительной продолжительностью включения $\text{ПВ}\% = \varepsilon \cdot 100\%$. Стандартизованы следующие значения ПВ: 15, 25, 40 и 60 %, для которых продолжительность цикла не должна превышать 10 минут.

Учет всех тепловых процессов, имеющих место в двигателе, не представляется возможным из-за различия свойств материалов, использованных для изготовления машины, условий работы и сложности процессов обмена тепла между отдельными частями машины. Поэтому при проверке тепловых режимов двигателя нагревание реальной машины заменяют нагреванием однородного твердого тела, обладающего бесконечно большой теплопроводностью.

Основное уравнение нагрева имеет следующий вид:

$$\tau = \tau_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}} \right) + \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}, \quad (7.1)$$

где τ – перегрев (превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды), град; $\tau_{\text{уст}}$ – установившаяся температура перегрева; $\tau_{\text{нач}}$ – на-

чальная температура перегрева; t – время, с; $T_n = C / A$ – постоянная времени нагрева, с; C и A – теплоемкость (Дж/град) и теплоотдача (Дж/град/с) двигателя.

Если температура двигателя в начале работы равна температуре окружающей среды, то в выражении (7.1) начальный перегрев $\tau_{\text{нач}} = 0$. Как следует из уравнения (7.1), изменение температуры нагрева происходит по экспоненциальному закону.

Уравнение охлаждения двигателя также описывается уравнением (7.1), но при этом $\tau_{\text{уст}} < \tau_{\text{нач}}$. Кроме того, постоянная времени охлаждения T_0 для двигателей без принудительной вентиляции больше постоянной времени нагрева из-за ухудшения условий теплоотдачи, т. е. $T_0 > T_n$.

Отношение T_n к T_0 называется коэффициентом ухудшения теплоотдачи:

$$\alpha_0 = \frac{T_n}{T_0}. \quad (7.2)$$

Для двигателей с самовентиляцией $\alpha_0 = 0,25 \div 0,35$.

Установившаяся температура перегрева и постоянная времени нагрева могут быть определены опытным путем на основании температурной кривой наиболее нагретых участков двигателя.

Установившуюся температуру перегрева определяют графическим способом. На кривой нагрева берут три точки, отстоящие друг от друга по оси времени на одинаковом расстоянии Δt (рис. 7.2) и находят приращения температур $\Delta\tau_1 = \tau_2 - \tau_1$ и $\Delta\tau_2 = \tau_3 - \tau_2$. На горизонталях, проходящих через τ_1 и τ_2 , влево от оси ординат откладывают эти приращения $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$. Полученные точки соединяют прямой и продолжают до пересечения с осью ординат. Точка пересечения дает установившуюся температуру перегрева двигателя $\tau_{\text{уст}}$, которая не должна быть больше допустимой $\tau_{\text{доп}}$, определяемой классом нагревостойкости изоляции двигателя.

Для определения T_n методом касательной определяют время t_1 от точки проведения касательной к кривой нагрева до точки ее пересечения с горизонтальной линией $\tau_{\text{уст}} = \text{const}$ (рис. 7.2). Ввиду отличия экспериментальной кривой нагрева от идеальной экспоненты касательные проводят в нескольких точках (как правило в начальной, средней и конечной части кривой нагрева) и определяют среднее значение постоянной нагрева:

$$T_{n\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}. \quad (7.3)$$

Аналогично определяется постоянная времени охлаждения T_0 по экспериментальной кривой охлаждения двигателя.

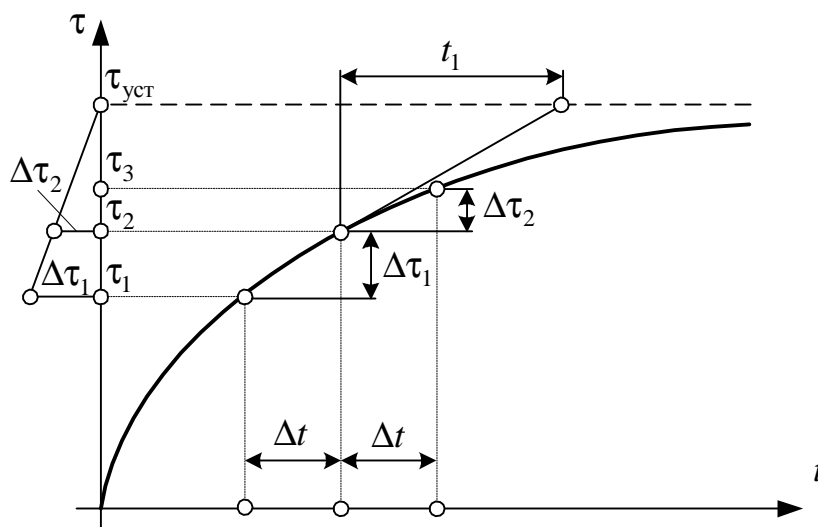


Рис. 7.2

Если двигатель работает при температуре окружающей среды, отличающейся от стандартной (40°C), то его нагрузку (I_x) следует уменьшить (увеличить) по сравнению с номинальной (I_n), исходя из пропорции:

$$\frac{\tau'_{уст}}{\tau_{уст}} = \frac{\tau_{доп} - \Delta\tau}{\tau_{доп}} = \frac{\alpha_n + (I_x / I_n)^2}{\alpha_n + 1}, \quad (7.4)$$

где $\tau'_{уст}$ – установившийся перегрев изоляции двигателя при температуре окружающей среды, отличающейся от стандартной на $\Delta\tau$; α_n – коэффициент, характеризующий отношение постоянных потерь двигателя к номинальному значению переменных потерь. Для различных типов двигателей значение коэффициента α_n может изменяться в пределах от 0,4 до 1,1.

Используя выражение (7.4), можно определить установившийся перегрев при номинальной нагрузке и класс изоляции двигателя, если кривая нагрева снималась при нагрузке I_x . Однако следует учитывать отличие температуры окружающей среды от стандартной, а также точность измерения температуры методом сопротивления – $\pm 5-10^{\circ}\text{C}$.

7.2. Описание лабораторной установки

Принципиальная схема установки приведена на рис. 7.3. Нагрузкой испытуемого АД $M1$ в двигательном режиме служит машина постоянного тока $M2$, работающая в режиме динамического торможения, а при динамическом торможении $M1$ машина $M2$ работает двигателем.

Датчиками температуры являются термосопротивления, заложенные в паз статора, железо статора, лобовую часть обмотки и корпус машины. Изме-

рения температуры осуществляются с помощью вольтметра *PV3*, включенного в диагонали моста сопротивлений $Z1 - Z4$ ($Z5, Z6, Z7$). Переключение моста на измерение температуры в различных точках машины осуществляется ручкой позиционного переключателя *SA2*. В данной работе кривые нагревания и охлаждения снимаются для четырех рабочих точек двигателя – паз статора, железо статора, лобовые части обмотки, внешняя поверхность корпуса машины. Переключателем *SA1* устанавливается требуемый режим работы испытуемого двигателя. В этой работе рассматриваются только длительный и повторно-кратковременный режимы.

7.3. Задание для домашней подготовки

1. Усвоить основные положения разд. 7.1 и повторить теоретический материал, посвященный основным режимам работы двигателя и теории нагрева электрических машин [2 – § 1.3.3; 3 – § 7.3; 4 – § 5.2, 5.4; 6 – § 9.4; 7 – § 9.2, 9.3; 9 – § 9.3].

2. Изучить устройство электроустановки и выяснить назначение всех регуляторов, переключателей и измерительных приборов (разд. 7.2).

3. Подготовить отчет для проведения лабораторной работы, содержащий порядок проведения работы, таблицы для занесения результатов опытов и необходимые расчетные формулы.

4. Нарисовать примерные графики нагрева и охлаждения двигателя.

7.4. Программа работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки.

2. Снять и построить кривые нагрева и охлаждения при перечисленных ниже условиях.

2.1. Повторно-кратковременный двигательный режим работы *M1*.

2.2. Длительный двигательный режим работы *M1*.

2.3. Режим динамического торможения *M1*.

3. Определить постоянные нагрева и охлаждения, а также значение установившейся температуры перегрева (графо-аналитическим методом).

4. Рассчитать и построить теоретические кривые нагрева и охлаждения. Определить класс изоляции испытуемого двигателя.

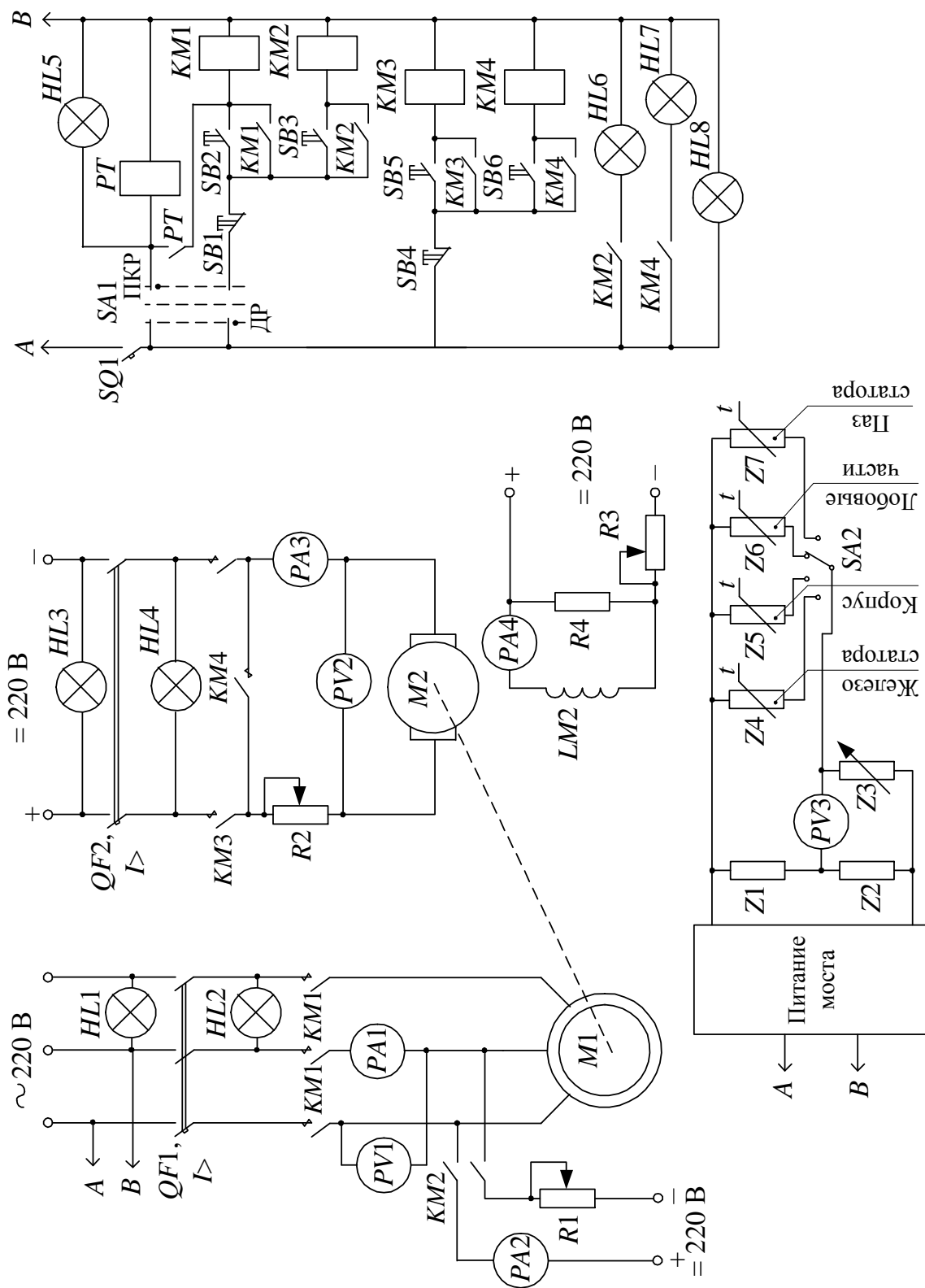


Рис. 7.3

7.5. Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с электрооборудованием установки и записать паспортные данные машин $M1$ и $M2$.

Проверить исходное состояние оборудования установки:

- автоматы $QF1$ и $QF2$ в нижнем положении (выключены);
- ключ $SQ1$ в нижнем положении (выключен);
- переключатели $SA1$ и $SA2$ в положении «Откл»;
- регуляторы $Z3$ и $R3$ в крайнем левом положении;
- потенциометры $R1$ и $R2$ полностью введены.

Доложить преподавателю о состоянии готовности установки и подать напряжение на стенд, о чем сигнализируют индикаторы $HL1$ и $HL3$.

2. Снятие кривых нагрева и охлаждения

2.1. Повторно-кратковременный режим (ПКР) работы $M1$

Включить автоматы $QF1$ и $QF2$ (индикаторы $HL2$ и $HL4$). Подать напряжение питания на схему управления ключом $SQ1$ (индикатор $HL8$). Приняв начальную температуру всех частей двигателя равной температуре окружающей среды, установить ее регулятором $Z3$ на приборе измерения температуры ($PV3$). Нажать кнопку «ДТ» $SB6$ (индикатор $HL7$). Установить переключателем $SA1$ исследуемый режим работы – положение «ПКР» (индикатор $HL5$).

С помощью нагрузочной машины $M2$ установить требуемый ток I_x в статоре $M1$ (задается преподавателем) и поддерживать его потенциометрами $R2$ и $R3$ в течение всего опыта неизменным. Снятие кривых нагревания производится периодическим отсчетом показаний приборов для всех положений переключателя $SA2$ через 2 минуты в первые 10-15 минут, а затем через 5 минут. При повторно-кратковременном режиме отключение и включение электродвигателя происходит автоматически с помощью программируемого реле времени PT .

Измерение закончить по достижении установившихся колебаний температуры в контрольных точках. После завершения опыта переключатель $SA1$ перевести в положение «Откл» и охладить двигатель.

2.2. Длительный режим работы $M1$

Кривая нагрева снимается по методике, изложенной в пункте 2.1. При этом переключатель $SA1$ в положении «ДР» (длительный режим). Для запуска $M1$ нажать кнопку «Пуск» $SB2$. По достижении установившейся температуры, когда в течение 5 минут изменение температуры не превосходит 1°C , отключить $M1$ от сети, нажав «Стоп» $SB1$, и снять кривую охлаждения двигателя в неподвижном его состоянии. После завершения опыта нажать кнопку «Стоп» $SB4$.

2.3. Режим динамического торможения $M1$

Нажать кнопку «ДТ» $SB3$ (индикатор $HL6$). Потенциометром $R1$ установить требуемый ток в статоре $M1$ (задается преподавателем) и поддержи-

вать его постоянным. Потенциометр $R2$ полностью введен в цепь якоря $M2$. Нажать кнопку «Пуск» $SB5$ и, уменьшая величину $R2$, разогнать $M2$.

Снятие кривых нагревания производится аналогично пункту 2.1. По достижении установившейся температуры, когда в течение 5 минут изменение температуры не превосходит 1°C , остановить $M2$, нажав «Стоп» $SB4$, и снять кривую охлаждения двигателя в неподвижном его состоянии. После завершения опыта нажать кнопку «Стоп» $SB1$, переключатель $SA1$ перевести в положение «Откл», выключить $SQ1$, $QF1$ и $QF2$.

3. Установившаяся температура перегрева двигателя определяется графо-аналитическим методом по экспериментальной кривой нагрева. Постоянные нагрева и охлаждения также определяются по опытным кривым, полученным в пунктах 2.1–2.3, методом касательной (см. разд. 7.1). Определить коэффициент ухудшения теплоотдачи α_0 по формуле (7.2).

4. Используя уравнение (7.1) и данные пункта 3, рассчитать и построить теоретические кривые нагрева и охлаждения и сравнить их с экспериментальными. На основании пропорции (7.4) определить установившийся перегрев двигателя при номинальной нагрузке I_n . Полученное значение следует скорректировать ввиду отличия температуры окружающей среды от стандартной на величину Δt . При определении класса изоляции двигателя учесть погрешность измерения температуры методом сопротивления.

7.6. Содержание отчета

1) Схема лабораторной установки; 2) паспортные данные машин; 3) таблицы с опытными и расчетными данными; 4) основные расчетные формулы; 5) кривые нагрева и охлаждения двигателя; 6) краткие выводы по работе.

7.7. Контрольные вопросы

1. Назвать основные режимы работы двигателей.
2. Перечислить классы изоляции и их влияние на $\tau_{\text{доп}}$.
3. Охарактеризовать понятия длительности рабочего периода и продолжительности включения. Указать их стандартные значения.
4. Что такое постоянные времени нагрева и охлаждения?
5. Что называется коэффициентом ухудшения теплоотдачи?
6. Как графически определить установившееся значение перегрева двигателя и постоянную времени нагрева?
7. Что называется теплоемкостью и теплоотдачей двигателя?
8. Как следует изменить нагрузку двигателя при отличии температуры окружающей среды от стандартного значения?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вешеневский, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С. Н. Вешеневский. М.: Энергия, 1977. 432 с.
2. Водовозов, В. М. Теория и системы электропривода: Учеб. пособие / В. М. Водовозов. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 306 с.
3. Ильинский, Н. Ф. Основы электропривода: Учебник для вузов / Н. Ф. Ильинский. М.: Издательство МЭИ, 2003. 224 с.
4. Кацман, М. М. Электрический привод: Учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / М. М. Кацман. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 384 с.
5. Кацман, М. М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу: Учеб. пособие для студ. сред. спец. учеб. заведений / М. М. Кацман. М.: Высш. шк., 2000. 215 с.
6. Ковчин, С. А. Теория электропривода: Учебник для вузов / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2000. 496 с.
7. Москаленко, В. В. Электрический привод: Учеб. пособие для сред. проф. образования / В. В. Москаленко. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 368 с.
8. Онищенко, Г. Б. Электрический привод: учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. М.: РАСХН, 2003. 320 с.
9. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода: Учебник для вузов / Чиликин М. Г., Сандлер А. С. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.
10. Лазовский, Н. Ф. Автоматизированный электропривод. Регулирование координат: Метод. указания для студентов всех форм обучения спец. 140604.65 – «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» / Н. Ф. Лазовский, А. Н. Пахомов. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 43 с.
11. Лазовский, Н. Ф. Системы управления электроприводами: Учеб. пособие по курсовому проектированию / Н. Ф. Лазовский, А. Н. Пахомов. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. 111 с.
12. Фираго, Б. И. Теория электропривода: Учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. Мн.: ЗАО «Техноперспектива», 2004. 527 с.
13. Электрический привод: метод. указания к лабораторным работам / сост. А. Н. Пахомов. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 63 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Организация выполнения лабораторных работ.....	3
Краткие сведения по технике безопасности при проведении работ в лаборатории электропривода.....	4
Лабораторная работа № 1. Экспериментальное определение момента инерции электропривода.....	6
Лабораторная работа № 2. Исследование механических характеристик электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения.....	15
Лабораторная работа № 3. Исследование механических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.....	28
Лабораторная работа № 4. Исследование характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором.....	41
Лабораторная работа № 5. Исследование характеристик системы тиристорный преобразователь – двигатель.....	55
Лабораторная работа № 6. Частотно-управляемый асинхронный электропривод.....	65
Лабораторная работа № 7. Исследование нагревания асинхронного двигателя	74
Библиографический список.....	82