

Министерство образования и науки Российской Федерации
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА
ВЕЛИКОГО

В.В.Андрущук, С.А.Важнов, Е.Ю.Кочеткова, Т.Г.Миневич

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Лабораторный практикум

Санкт-Петербург 2018

Содержание

Предисловие	3
Работа 1М. ПОЛУЧЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	4
1.1 АСИНХРОННЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ.....	4
1.2 АСИНХРОННЫЙ КОНДЕНСАТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ	9
1.3 АСИНХРОННЫЙ ОДНОФАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ЭКРАНИРОВАННЫМИ ПОЛЮСАМИ	13
Работа 2М. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	15
Работа 3М. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ СВОЙСТВ АСИНХРОН- НОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ТРЕХФАЗНОМ И ОДНОФАЗНОМ ПИТАНИИ	22
Литература	26

Предисловие

Рассматриваемый цикл лабораторных работ имеет целью ознакомление студентов с основными видами электрических машин переменного тока, используемых в различных системах электропривода. Особенностью лабораторных работ настоящего цикла является их демонстрационный характер в сочетании с экспериментальной частью, требующей от студентов выполнения опытов по получению характеристик двигателя. Содержание руководства адаптировано для студентов, прослушавших курс лекций по теме «Электрические машины» и продолжающих изучение материала курса, связанного с особенностями конструкции, принципом действия, регулировочными характеристиками асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Пособие содержит теоретические положения, описание используемого оборудования, план выполнения работы, указания по обработке результатов измерений и список дополнительной литературы, т.е. предоставляет студентам всю необходимую для выполнения работы информацию. Каждая лабораторная работа рассчитана на двухчасовое занятие бригады студентов в составе двух человек.

Рассматриваемые лабораторные работы реализованы на базе лаборатории электрических цепей кафедры «Теоретическая электротехника и электромеханика»

Работа 1М. ПОЛУЧЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

1.1 АСИНХРОННЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Лабораторная установка предназначена для ознакомления с принципом действия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. При выполнении работы экспериментально определяются скорость вращения магнитного поля статора двигателя и скорость вращения его ротора.

Основным источником питания асинхронного двигателя является трехфазная система напряжений, дающая возможность получения вращающегося магнитного поля.

На рис. 1 схематично изображено поперечное сечение асинхронного двигателя. Статор и ротор имеют одну пару полюсов на фазу ($p = 1$). Статорным обмоткам I, II, III соответствуют магнитные оси 1,2,3, смещенные друг относительно друга на пространственный угол $2\pi/3$. Магнитные силовые линии, создаваемые обмотками статора, замыкаются по пути, проходящему в массиве ротора, в воздушном зазоре и в статоре. Магнитное сопротивление линиям индукции \bar{B} определяется в основном воздушным зазором. Токи в обмотках статора образуют симметричную систему прямой последовательности. По такому же закону будет изменяться магнитная индукция в воздушном зазоре (рис.2):

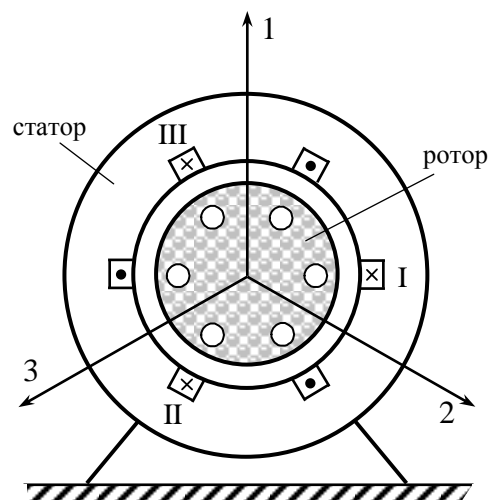


Рис.1

$$B_1 = B_m \sin(\omega_0 t), \quad B_2 = B_m \sin(\omega_0 t - 2\pi/3), \quad B_3 = B_m \sin(\omega_0 t - 4\pi/3).$$

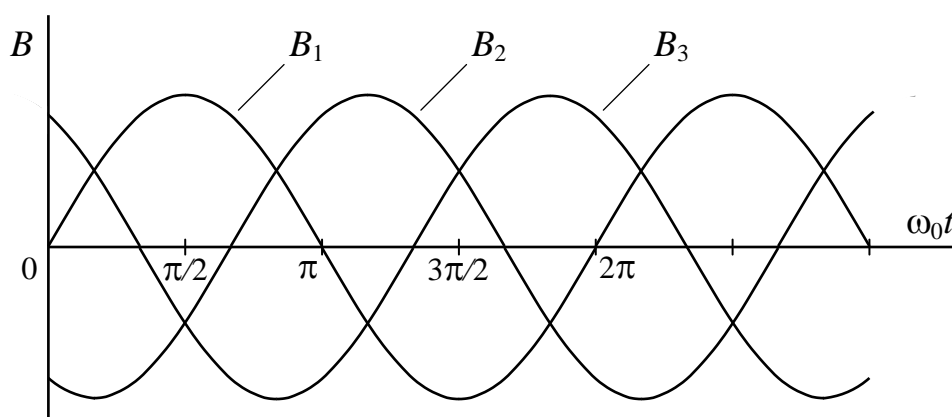
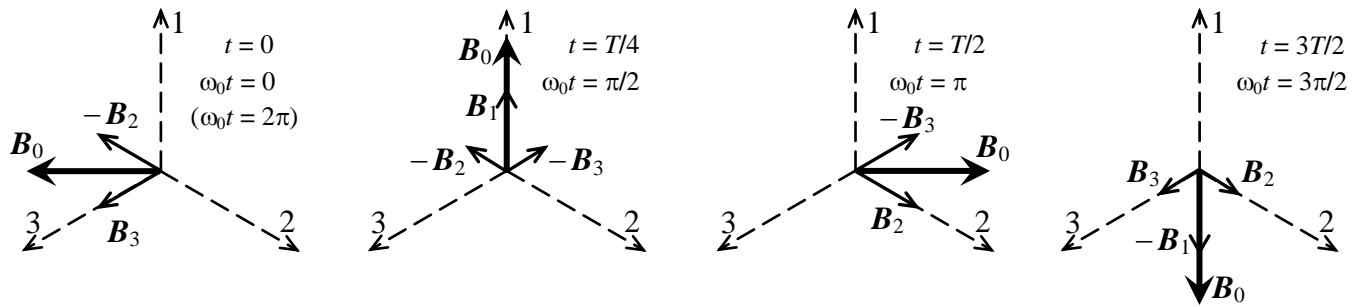


Рис.2

Изобразим для этих синусоидальных функций векторные диаграммы в моменты времени $t = 0, t = T/4, t = T/2, t = 3T/4, t = T$ или для соответствующих значений аргумента $\omega_0 t$ ($\omega_0 t = 0; \omega_0 t = \pi/2; \omega_0 t = \pi; \omega_0 t = 3\pi/2; \omega_0 t = 2\pi$).



Вектор результирующей магнитной индукции B_0 длиной $3B_m/2$ вращается в пространстве с угловой скоростью ω_0 в сторону обмотки с отстающим током.

Ферромагнитный ротор двигателя имеет пазы, в которых размещаются проводники роторной обмотки. Концы всех проводников с обоих торцов ротора замыкаются накоротко кольцами из проводящего материала (рис.3). Обмотка такого типа носит название «беличья клетка».

На рисунке 4 изображены фрагменты статора и ротора двигателя. Магнитное поле статора вращается с угловой скоростью ω_0 . В ту же сторону вращается ротор двигателя со скоростью $\omega < \omega_0$. Угловая скорость пересечения магнитным потоком статора проводников беличьей клетки равна $\Delta\omega = \omega_0 - \omega$, в то время как соответствующая линейная скорость равна $V = \Delta\omega \cdot R$, где R – радиус ротора.

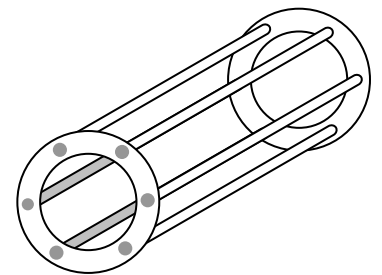


Рис.3

В проводниках ротора индуцируется ЭДС, определяемая выражением: $e_{\text{инд}} = [\vec{v} \times \vec{B}] \cdot d\vec{\ell} = \vec{E}_{\text{инд}} \cdot d\vec{\ell}$. Под действием этой ЭДС в проводниках ротора потечет ток i . В результате взаимодействия токов ротора с магнитным потоком статора возникают действующие на проводники роторной обмотки электромагнитные силы $\vec{F} = i \cdot [d\vec{\ell} \times \vec{B}]$. На ротор двигателя действует электромагнитный момент $M = \sum F \cdot R$.

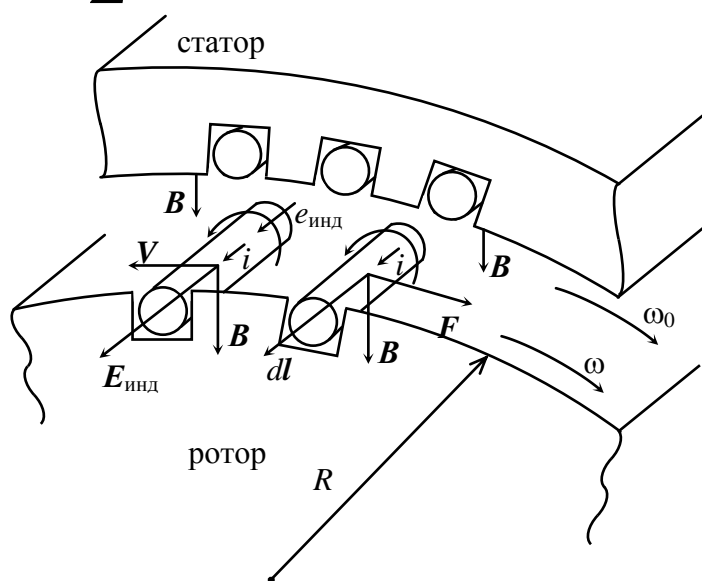


Рис.4

Разность угловых скоростей асинхронного двигателя характеризует скольжение $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$. Для двигателя с числом пар полюсов на фазу $p > 1$ угловая скорость $\omega_0 = 2\pi f_0 / p$ (рад/с) или $n_0 = 60 f_0 / p$ (об/мин.) В этих соотношениях f_0 – частота трехфазной системы статорных токов (Гц). Механическая характеристика асинхронного двигателя $\omega = F(M)$ представлена на рис.5.

Здесь

- M_{Π} – пусковой момент двигателя;
- $M_{\text{к}}$ – критический момент двигателя;
- $\omega_{\text{к}}$ – критическая угловая скорость.
- $M_{\text{н}}$ – нагрузочный момент двигателя

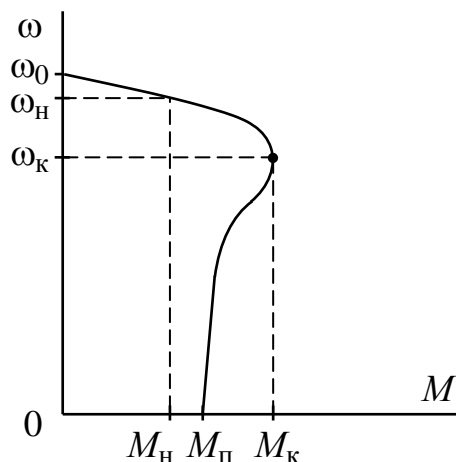


Рис.5

При нагрузочном моменте на валу двигателя $M_{\text{н}}$, превышающем значение $M_{\text{к}}$ – двигатель останавливается, переходя в режим короткого замыкания.

Лабораторная установка, предназначенная для наблюдения и измерения скорости вращения магнитного поля статора и скорости вращения ротора трехфазного асинхронного двигателя, выполнена на базе серийного двигателя.

Ротор двигателя укорочен путем удаления вала и части шихтованного магнитопровода с одной из сторон машины. При этом проводники обмотки ротора (беличьей клетки) со стороны удаленного вала замкнуты накоротко специальным кольцом из проводящего материала. Ротор консольно закреплен в корпусе двигателя, расположенного вертикально на специальном основании (рис.6).

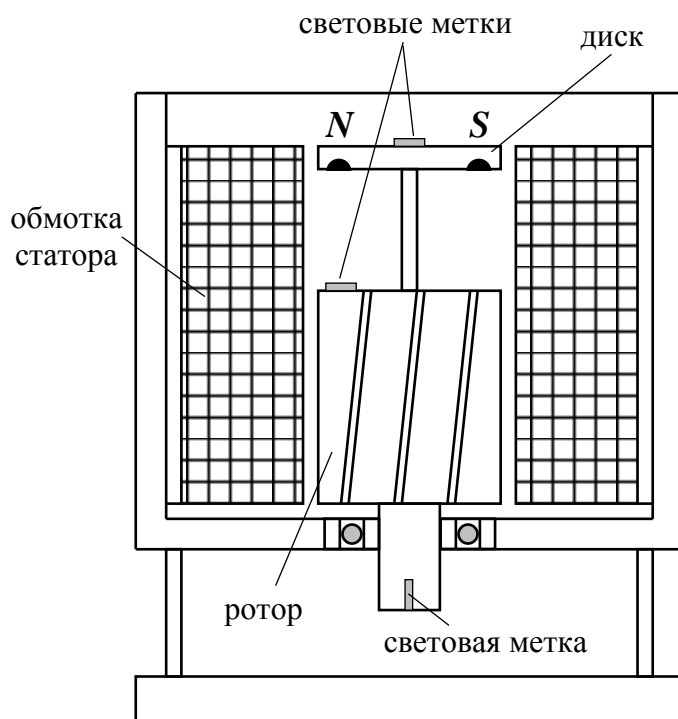


Рис. 6

В освободившейся области статорного пространства на специальной оси размещен диск из непроводящего материала. На диске закреплены фрагменты постоянного магнита таким образом, чтобы были сформированы северный N и южный S полюса. На диске и на роторе двигателя закреплены светоотражающие полосы (световые метки). Такая же полоска расположена на выступающем в нижней части агрегата валу двигателя.

Измерение скорости вращения осуществляется с помощью стробоскопического тахометра, состоящего из кварцевого генератора ЗГ и усилителя-формирователя световых импульсов УФСИ (рис.7). К выходу УФСИ подключен кабель со светодиодом СД.

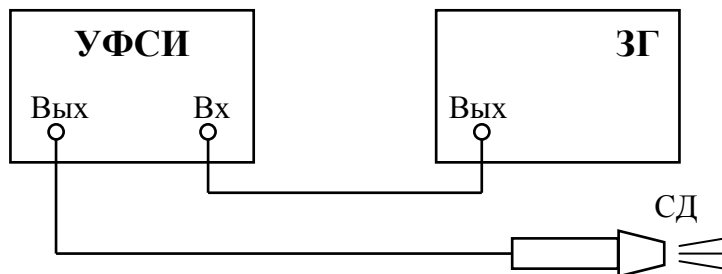


Рис. 7

Программа выполнения работы

1. Включить кварцевый генератор ЗГ и усилитель-формирователь световых импульсов УФСИ и прогреть приборы в течение 15 минут.
2. Установить на выходе генератора ЗГ напряжение величиной 2,0 В при частоте сигнала 24,5 Гц. Убедиться в появлении световых импульсов на светодиоде СД.

Внимание: категорически **запрещается** направлять в глаза световой луч светодиода СД.

3. Подключить статорную обмотку асинхронного двигателя к трехфазному источнику питания.

Ротор двигателя разгоняется до скорости, определяемой нагрузочным моментом на валу. Диск с постоянными магнитами через 20 – 30 секунд также достигает максимальной скорости вращения, равной скорости вращения магнитного поля статора.

4. Световой луч светодиода СД направить на диск и наблюдать за перемещением на нем световой метки. Если частота световых импульсов $f_{СД}$ не равна частоте вращения диска $f_{Д}$, световая метка будет перемещаться в сторону вращения диска при $f_{Д} > f_{СД}$ и в обратном направлении в случае $f_{Д} < f_{СД}$. При равенстве частот $f_{Д} = f_{СД}$ световая метка на диске остается неподвижной.

Скорость вращения магнитного поля статора определяется соотношениями:

$$n_0 = 60 \cdot f_{0СД} \text{ [об/мин]} \quad \text{или} \quad \omega_0 = 2\pi \cdot f_{0СД} \text{ [рад/с]}.$$

5. Для определения частоты вращения ротора двигателя $f_{р}$ луч светодиода направляют на световую метку ротора в области между полюсами статорной обмотки и боковой поверхностью диска. При частоте импульсов $f_{0СД}$ световая метка ротора будет перемещаться в сторону отставания с небольшой скоростью. Уменьшая частоту световых импульсов, следует добиться неподвижного положения метки ротора

$f_p = f_{pCD}$. При этом световая метка диска будет перемещаться в сторону опережения с небольшой скоростью.

Скорость вращения ротора определяется соотношениями:

$$n = 60 \cdot f_{pCD} \text{ [об/мин]} \quad \text{или} \quad \omega = 2\pi \cdot f_{pCD} \text{ [рад/с]}.$$

Число пар полюсов p обмотки статора можно определить из соотношения $\omega_0 = 2\pi \cdot f_{0CD} = 2\pi \cdot f_0 / p$, где f_0 – частота питающего напряжения, в виде

$$p = f_0 / f_{0CD}.$$

Скольжение ротора характеризуют величины

$$\Delta n = 60 \cdot (f_{0CD} - f_{pCD}) \text{ [об/мин]} \quad \text{или} \quad \Delta\omega = 2\pi \cdot (f_{0CD} - f_{pCD}) \text{ [рад/с]}.$$

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Описание вращающегося магнитного поля в воздушном зазоре трехфазного асинхронного двигателя.
2. Описание лабораторной установки.
3. Результаты измерения и расчета скорости вращения магнитного поля статора, скорости вращения ротора, скольжения ротора и числа пар полюсов.

1.2 АСИНХРОННЫЙ КОНДЕНСАТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Асинхронные конденсаторные двигатели применяются в тех случаях, когда источником питания является однофазная сеть переменного тока.

На статоре двигателя располагаются две обмотки, сдвинутые в пространстве друг относительно друга на угол $\pi/2$. Обмотка ротора двигателя выполнена в виде «беличьей клетки» (рис.8). При подключении к источнику переменного напряжения одной обмотки a , ее ток создает пульсирующее магнитное поле. Оно может быть представлено в виде суммы двух вращающихся полей: прямого $B_{a1} = B_{m1} \cdot \sin(\omega_0 t)$ и обратного поля $B_{a2} = B_{m2} \cdot \sin(-\omega_0 t)$. При этом справедливо равенство $B_{m1} = B_{m2} = B_{ma}/2$ (рис.9).

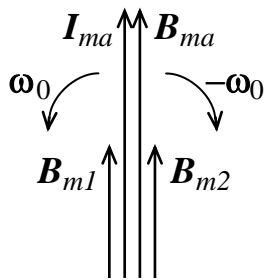


Рис.9

При неподвижном роторе эти поля создают одинаковые по величине, но разные по знаку электромагнитные моменты M_1 и M_2 . При пуске двигателя результирующий момент $M = M_1 - M_2$ равен нулю. Если с помощью пускового устройства привести ротор двигателя во вращение в ту или иную сторону, то один из моментов M_1 или M_2 будет преобладать (рис.10). Из рисунка 10 следует, что в случае, когда M будет больше момента M_H , двигатель будет вращаться с угловой скоростью ω_H . Подключив вторую обмотку b к источнику напряжения через конденсатор C (рис.8), можно получить вращающееся магнитное поле. Для этого емкость конденсатора необходимо подобрать так, чтобы обеспечить сдвиг магнитных индукций по фазе на угол $\pi/2$:

$$B_a = B_m \cdot \sin(\omega_0 t),$$

$$B_b = B_m \cdot \sin(\omega_0 t + \pi/2).$$

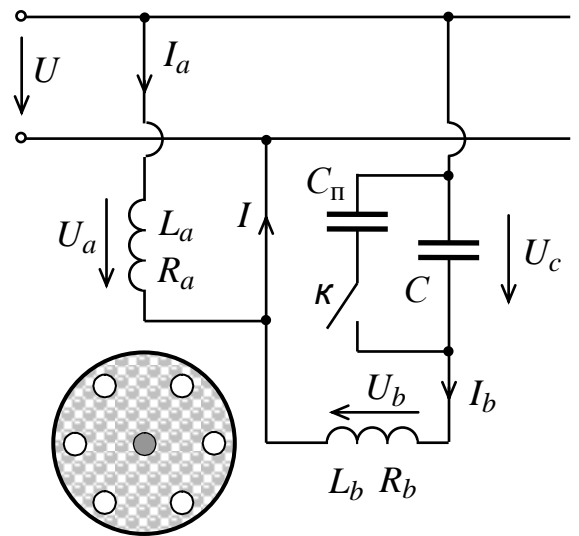


Рис.8

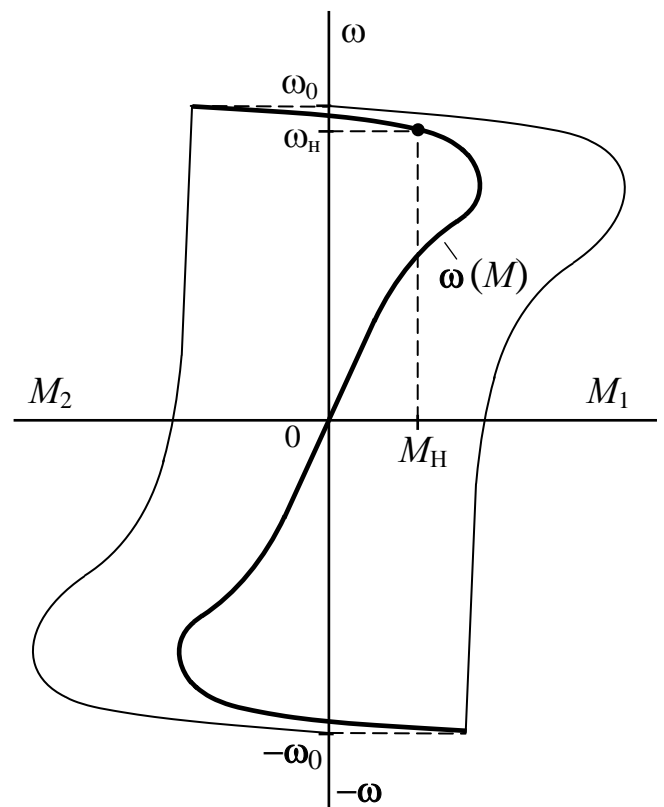
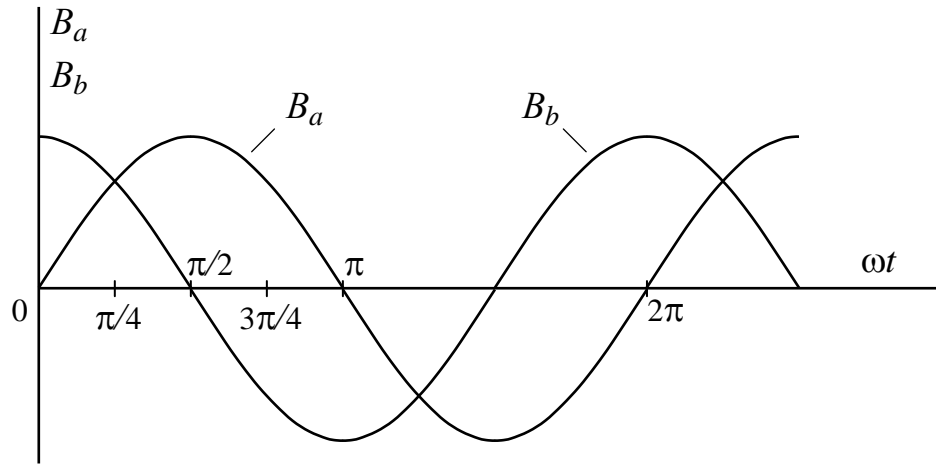
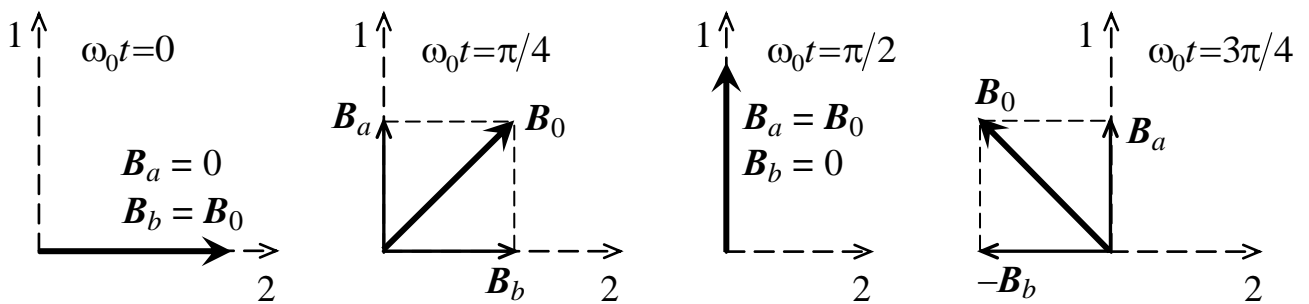


Рис.10



Изобразим для этих функций векторные диаграммы для моментов времени $t=0, t=T/8, t=T/4, t=3T/8$ или для соответствующих значений аргумента $\omega_0 t$ ($\omega_0 t=0, \omega_0 t=\pi/4, \omega_0 t=\pi/2, \omega_0 t=3\pi/4$). На диаграммах изображены магнитные оси 1 и 2 статорных обмоток двигателя, смещенных на пространственный угол $\pi/2$. Вектор результирующей магнитной индукции $B_0=B_m$ вращается в пространстве с угловой скоростью ω_0 в сторону обмотки с отстающим током, обеспечивая создание кругового магнитного поля.



Векторная диаграмма конденсаторного асинхронного двигателя приведена на рисунке 11. Величина емкости конденсатора C , необходимая для создания кругового поля определяется выражением

$$C = \frac{1}{\omega_0(\omega_0 L_b - R_a \cdot R_b / \omega_0 L_a)},$$

где: L_a, L_b, R_a, R_b – индуктивности и активные сопротивления обмоток двигателя.

В пусковых режимах емкость конденсатора необходимо увеличивать для создания нужного пускового момента. Для этой цели служит дополнительный конденсатор емкостью $C_{\text{п}}$, подключаемый параллельно основному конденсатору C с помощью ключа K (рис.8).

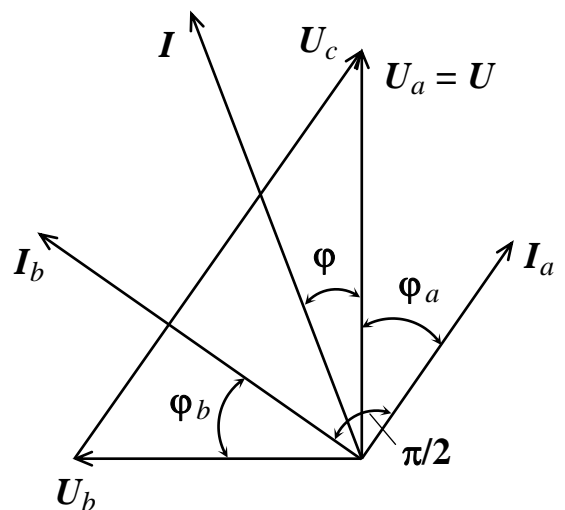


Рис.11

Принципиальная электрическая схема лабораторной установки с асинхронным конденсаторным двигателем приведена на рис.12.

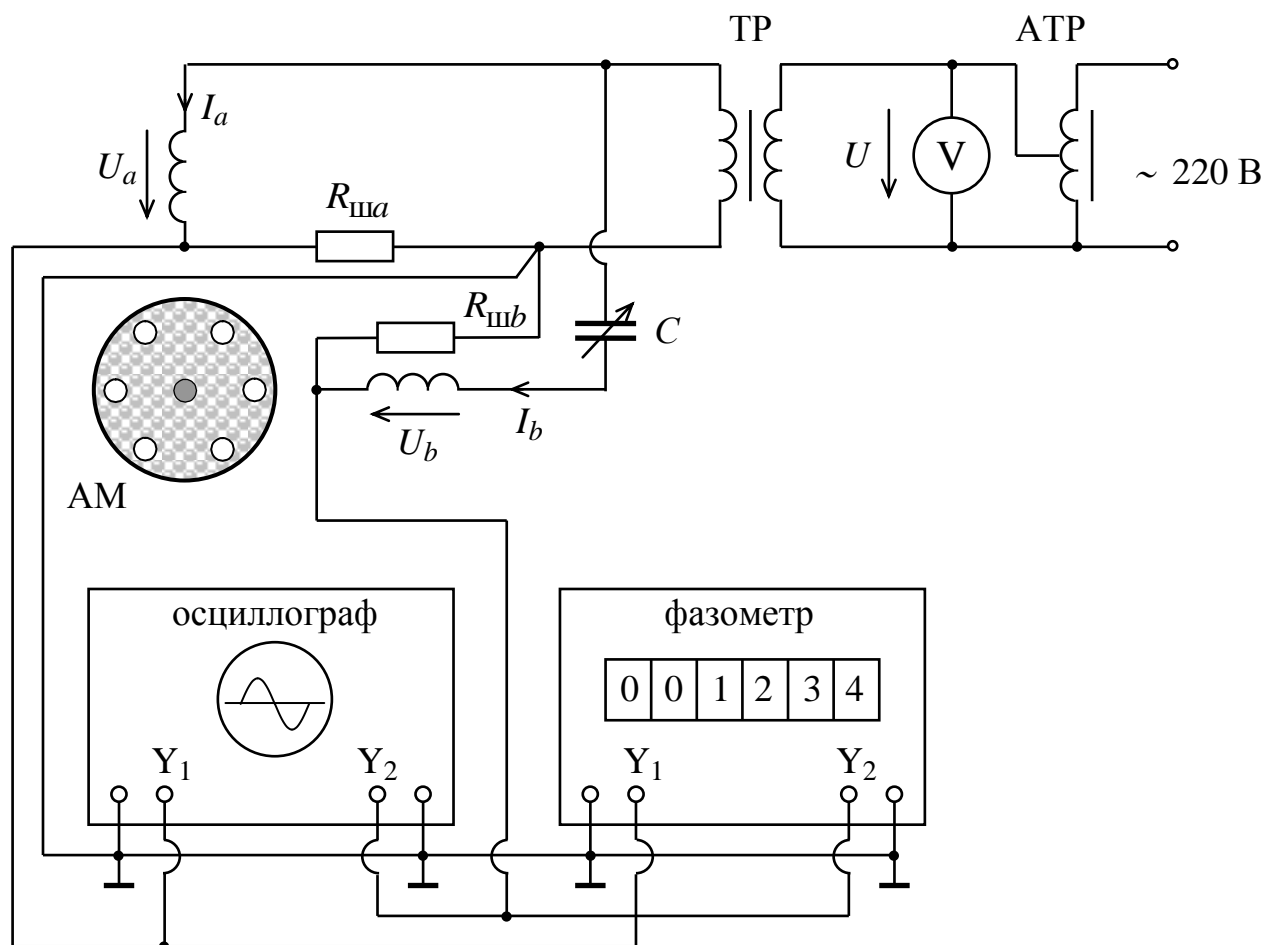


Рис.12

В качестве регулируемого источника питания в установке используются автотрансформатор АТР и разделительный трансформатор ТР. В обмотках двигателя, сдвинутых в пространстве на угол $\pi/2$, включены резисторы $R_{ша}$ и $R_{шб}$, напряжения на которых пропорциональны токам в обмотках. Обмотка a подключена непосредственно к источнику питания. Обмотка b подключена к источнику через конденсатор C переменной емкости, что обеспечивает фазовый сдвиг на угол $\pi/2$ между токами I_a и I_b в обмотках двигателя. Напряжения с резисторов $R_{ша}$ и $R_{шб}$ подаются на входы фазометра и двухканального осциллографа. Осциллограф позволяет наблюдать кривые тока в обмотках. Кроме того, в режиме ХУ (см. техническое описание осциллографа) на экране наблюдается фигура Лиссажу, представляющая траекторию перемещения в пространстве вектора результирующей магнитной индукции. Фазометр измеряет угол сдвига между токами в обмотках.

Программа выполнения работы

1. Установить АТР в положение «min».
2. Включить осциллограф и фазометр и погреть приборы в течение 15 минут.
3. Подать питание на автотрансформатор АТР.
4. Установить на батарее конденсаторов емкость 15 мкФ.
5. Установить на автотрансформаторе АТР напряжение в пределах 80 – 110 В. Асинхронный двигатель, постепенно разгоняясь, выйдет на рабочий режим. Измерить угол сдвига между токами в обмотках двигателя, обратив внимание на кривые тока, форма которых ввиду нелинейности системы может отличаться от синусоидальной. Изменяя величину емкости конденсатора и напряжение питания, установить угол сдвига между токами 90 градусов. Переключить осциллограф в режим X-Y, наблюдая на экране фигуру Лиссажу – траекторию перемещения в пространстве вектора результирующей магнитной индукции.

6. Измерить скорость вращения двигателя с помощью строботачометра. Определить число пар полюсов двигателя.

Примечание. Величина емкости конденсатора C , необходимая для создания кругового поля, зависит от напряжения питания, тока нагрузки, формы кривых тока и напряжения. Поэтому практически любое изменение режима работы двигателя приводит к изменению магнитного поля и вместо кругового оно становится эллиптическим, приводя к уменьшению электромагнитного момента двигателя.

Повторить эксперимент при другом значении питающего напряжения в диапазоне 110 – 130 В.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Описание вращающегося магнитного поля в воздушном зазоре асинхронного конденсаторного двигателя.
2. Описание лабораторной установки.
3. Осциллограммы кривых токов в обмотках двигателя и рисунок (фотографию) траектории перемещения в пространстве вектора результирующей магнитной индукции. (фигуру Лиссажу). Значение угла сдвига между токами в обмотках. Эти данные необходимо получить при двух значениях емкости конденсатора C : C_1 – когда фигура Лиссажу близка к кругу; C_2 – когда фигура Лиссажу существенно отличается от круга.

1.3 АСИНХРОННЫЙ ОДНОФАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ЭКРАНИРОВАННЫМИ ПОЛЮСАМИ

Асинхронный двигатель с экранированными полюсами имеет на статоре явно-выраженные полюса с однофазной обмоткой и ротор с обмоткой в виде беличьей клетки (рис.13). Часть наконечника каждого полюса, примыкающая к его сбегающему краю, охватывается короткозамкнутым витком. Ток однофазной обмотки статора I_1 , образует в набегавшей (не экранированной) части полюса пульсирующий поток $\Phi_{1Н}$, в сбегающей (экранированной) части полюса – пульсирующий поток $\Phi_{1С}$. Изобразим векторную диаграмму магнитных потоков статора, представляющих собой гармонические функции времени (рис.14). Поток $\Phi_{1С}$ индуцирует в короткозамкнутом витке ЭДС E_K , отстающую от потока на $\pi/2$. Короткозамкнутый виток обладает активным сопротивлением и его ток I_K отстает от ЭДС на угол $\varphi_K < \pi/2$. Ток I_K создает

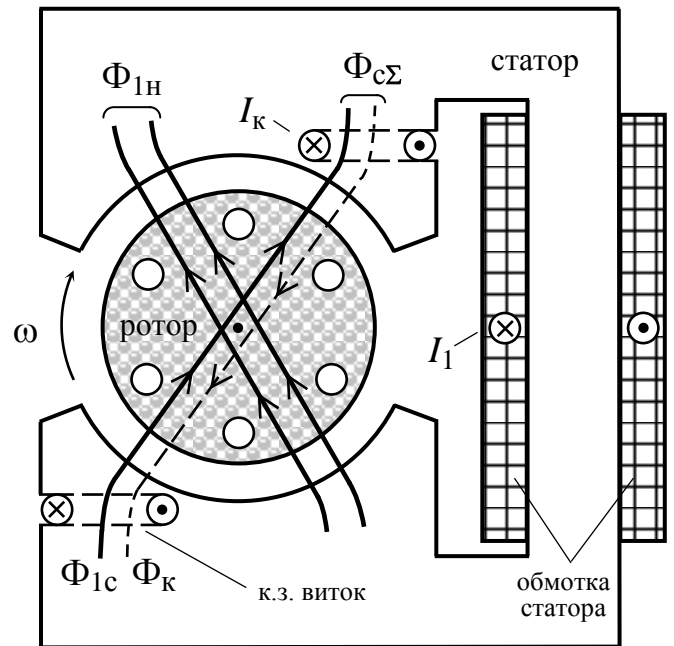


Рис.13

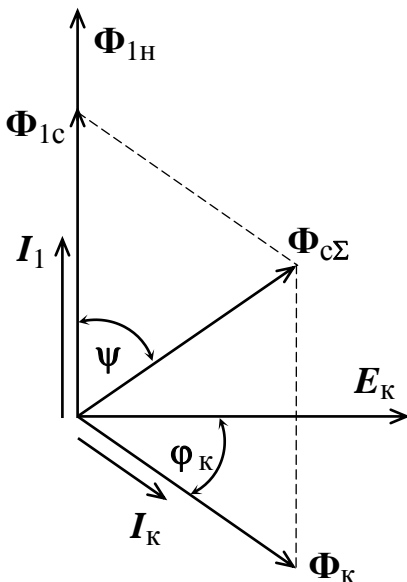


Рис.14

поток Φ_K , оказывающий экранирующее действие на поток $\Phi_{1С}$. В результате суммарный поток в сбегающей части полюса $\Phi_{с\Sigma} = \Phi_{1С} + \Phi_K$ отстает во времени относительно потока $\Phi_{1Н}$ на угол ψ . Поскольку оси потоков $\Phi_{1Н}$ и $\Phi_{с\Sigma}$ смещены и в пространстве, возникает вращающееся магнитное поле. Это поле является не круговым, а эллиптическим, так как потоки $\Phi_{1Н}$ и $\Phi_{с\Sigma}$ не равны по величине и сдвинуты в пространстве и во времени на небольшие углы. Несмотря на это, двигатель имеет большой пусковой момент $M_{П} = (0,2 \div 0,5) M_{НОМ}$, что позволяет использовать его в качестве привода для технических устройств мощностью до 300 ватт. В то же время, вследствие значительных потерь в короткозамкнутом витке, двигатель имеет невысокий (25 ÷ 40%) коэффициент полезного действия.

Принципиальная электрическая схема лабораторной установки приведена на рис. 15. Установка содержит асинхронный однофазный двигатель с экранированными полюсами АМ, задающий генератор ЗГ2, усилитель мощности УМ2. К выходу усилителя мощности подключен кабель со светодионом СД.

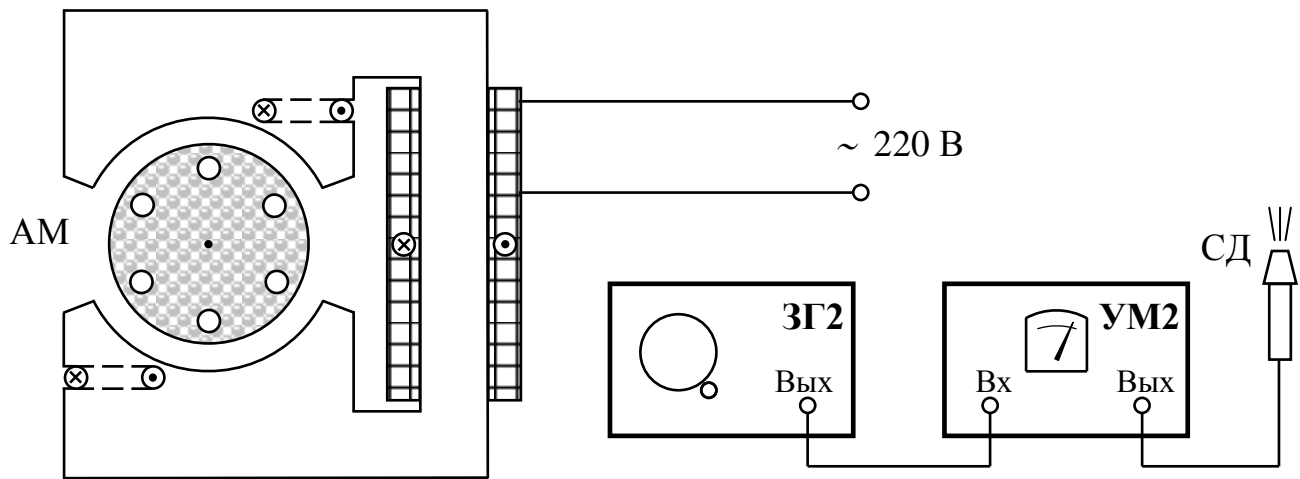


Рис.15

Целью данной работы является ознакомление с конструктивными особенностями двигателя, а также с одним из способов получения вращающего магнитного поля.

Программа выполнения работы

1. Включить задающий генератор ЗГ2, усилитель мощности УМ2. Прогреть приборы в течение 15 минут.
2. Установить частоту выходного сигнала генератора 25 Гц.
3. Установить уровень выходного напряжения усилителя мощности в пределах 5 – 10 В. Убедиться в появлении световых импульсов на светодиоде СД.

Внимание: категорически **запрещается** направлять в глаза световой луч светодиода СД.

4. Подключить двигатель к источнику переменного напряжения 220 В. Через 2 – 3 секунды двигатель выйдет на рабочий режим. Скорость вращения ротора будет определяться нагрузочным (вентиляторным) моментом на валу двигателя.
5. Световой луч светодиода СД направить на ротор двигателя и наблюдать за смещением световой метки на роторе.

Изменяя частоту световых импульсов $f_{\text{СД}}$ необходимо добиться, чтобы световая метка на роторе оставалась неподвижной.

Скорость вращения ротора определяется соотношениями:

$$n = 60 \cdot f_{\text{РСД}} \text{ [об/мин]} \text{ или угловой частотой } \omega = 2\pi \cdot f_{\text{РСД}} \text{ [рад/с]}.$$

Для угловой частоты вращения магнитного поля статора можно записать: $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0 / p$, где f_0 – частота питающего напряжения, p – число пар полюсов двигателя; для данного двигателя $p = 1$.

Скольжение ротора характеризуют величины $\Delta n = 60 \cdot (f_0 - f_{\text{РСД}})$ [об/мин] и $\Delta \omega = 2\pi \cdot (f_0 - f_{\text{РСД}})$ [рад/с].

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Описание вращающегося магнитного поля в воздушном зазоре асинхронного двигателя с экранированными полюсами.
2. Описание лабораторной установки.
3. Результаты измерения скорости вращения ротора, скольжения ротора.

Работа 2М. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В лабораторной работе рассматриваются различные способы регулирования скорости вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Экспериментально определяются регулировочные характеристики двигателя малой мощности.

Угловая скорость вращения асинхронного двигателя ω определяется в виде

$$\omega = \omega_0(1-s),$$

где: s – скольжение ротора, $\omega_0 = 2\pi \cdot f_1 / p$ представляет собой угловую скорость вращения магнитного поля статора двигателя, зависящую от частоты напряжения питания f_1 и числа пар полюсов p обмотки статора.

Таким образом, угловая скорость вращения двигателя определяется как

$$\omega = 2\pi \cdot f_1 \cdot (1-s) / p$$

и можно выделить следующие способы ее регулирования:

- изменением числа пар полюсов p обмотки статора;
- изменением частоты питающего напряжения;
- изменением скольжения s при постоянстве угловой скорости ω_0 .

Этот способ предполагает регулирование скорости за счет уменьшения величины питающего напряжения.

Регулирование скорости вращения изменением числа пар полюсов p

Этот способ используется для двигателей с короткозамкнутым ротором, так как при этом требуется изменять число пар полюсов только статорной обмотки. Изменить число пар полюсов статора можно двумя способами:

1. применением на статоре нескольких обмоток, которые уложены в общих пазах и имеют разные числа пар полюсов p ;
2. применением обмотки специального типа, которая позволяет получить различные значения p изменением (переключением) схемы соединений обмотки.

Двигатели с изменением числа пар полюсов называют многоскоростными. Как правило, выпускаются машины, рассчитанные на 2, 3 или 4 скорости вращения.

Регулирование скорости вращения изменением частоты питающего напряжения

Этот способ регулирования относится к категории наиболее экономичных способов регулирования. При этом имеется возможность изменять частоту, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения по отношению к номинальному значению $f_1 = 50$ Гц. Тем самым обеспечивается двухзонное регулирование.

Схема частотного управления скоростью вращения двигателя приведена на рисунке 1.

Критический момент трехфазного асинхронного двигателя, определяющий его перегрузочную способность, можно приближенно представить в виде:

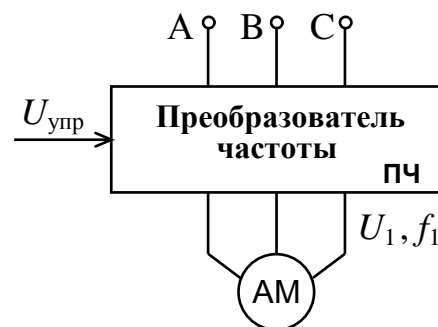


Рис. 1

$$M_K \cong \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot X_K},$$

где : U_1 – фазное напряжение обмотки статора, $\omega_0 = 2\pi \cdot f_1 / p$ – угловая скорость вращения магнитного поля статора, X_K – приведенное реактивное сопротивление фазной обмотки статора, учитывающее реактивное сопротивление ротора двигателя, причем X_K пропорционально частоте f_1 .

Приведенное выражение для M_K справедливо в номинальном режиме работы двигателя при условии $X_K \gg R_1$, где R_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора. Следовательно, критический момент двигателя M_K пропорционален отношению U_1^2 / f_1^2 .

Электромагнитный момент асинхронного двигателя является его основной выходной характеристикой. Момент зависит от частоты f_1 и напряжения U_1 . Наличие двух управляющих величин дает возможность реализовать оптимальный режим управления. В первой зоне регулирования при изменении частоты от f_{\min} до $f_{\text{ном}} = 50$ Гц применяется пропорциональный закон регулирования $U_1 / f_1 = \text{const}$. Этот закон получен при допущении $X_K \gg R_1$ и теоретически обеспечивает постоянство критического момента. Отметим, что данное допущение справедливо лишь для двигателей средней и большой мощности ($P > 300$ Вт).

В двигателях малой мощности величины сопротивлений X_K и R_1 соизмеримы. По мере снижения частоты и напряжения возрастает падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора, уменьшается критический момент и жесткость механических характеристик. Для поддержания в первой зоне постоянной перегрузочной способности двигателя вводится корректировка закона регулирования путем увеличения напряжения питания на низких частотах. Во второй зоне регулирования изменение частоты осуществляется при постоянстве статорного напряжения U_1 на уровне его номинального значения. В этом случае с увеличением частоты происходит уменьшение критического момента, так как M_K обратно пропорционален квадрату частоты питающего напряжения.

Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании приведены на рисунке 2.

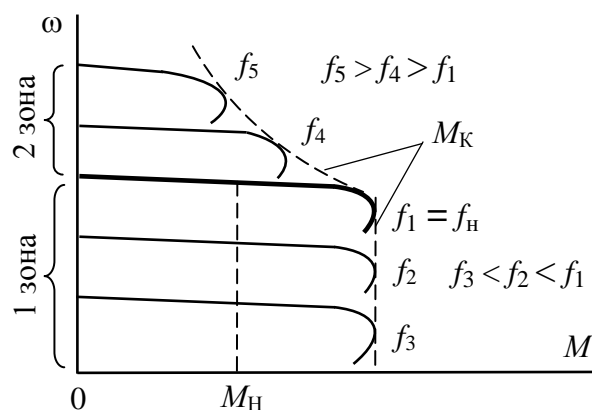


Рис.2

Характер нагрузки определяет различные варианты взаимосвязанного управления напряжением и частотой.

При постоянном нагрузочном моменте M_H целесообразно обеспечить условие $U_1 / f_1 = const$ (1 зона регулирования на рис.2).

При постоянной мощности на валу двигателя $P = const$ частота и напряжение источника питания связаны соотношением $\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\frac{f_1}{f_2}}$ или $\frac{U_1^2}{f_1} = \frac{U_2^2}{f_2}$.

При вентиляторной нагрузке M_H пропорционален ω^2 . В этом случае

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \text{ или } \frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_2}{f_2^2}.$$

На рисунке 3 приведены механические характеристики при постоянстве мощности на валу асинхронного двигателя и на рисунке 4 – механические характеристики при вентиляторной нагрузке.

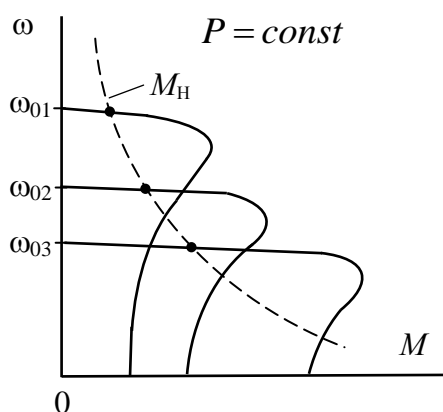


Рис.3

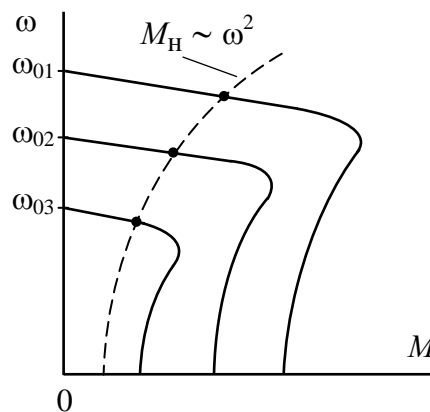


Рис.4

Регулирование скорости вращения уменьшением напряжения питания статора

Изменение напряжения питания статорной обмотки позволяет регулировать скорость асинхронного двигателя с помощью относительно простых технических средств и схем управления. Для этого между синусоидальным источником напряжения и статорной обмоткой двигателя включается регулятор напряжения. При уменьшении подводимого к статорной обмотке напряжения U_1 , уменьшается критический момент и соответственно изменяются механические характеристики двигателя (рис.5). В результате изменяется рабочая скорость двигателя в диапазоне $\omega_H < \omega < \omega_K$ при заданной зависимости $M_H = F(\omega)$.

Следует учитывать, что при повышенных значениях скольжения s увеличиваются потери, вызывающие нагрев ротора двигателя.

В связи с пониженным к.п.д. рассмотренный способ регулирования скорости применяется только для двигателей малой мощности.

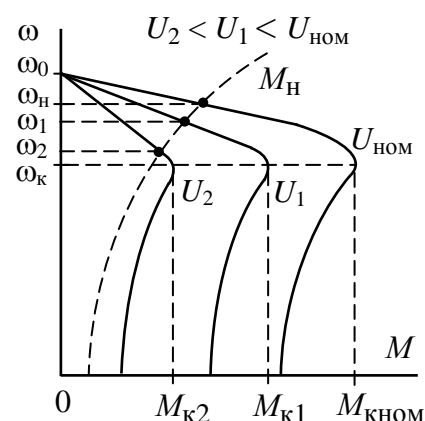


Рис.5

Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для исследования способов регулирования скорости вращения асинхронного двигателя путем изменения частоты и уменьшением напряжения питания приведена на рисунке 6.

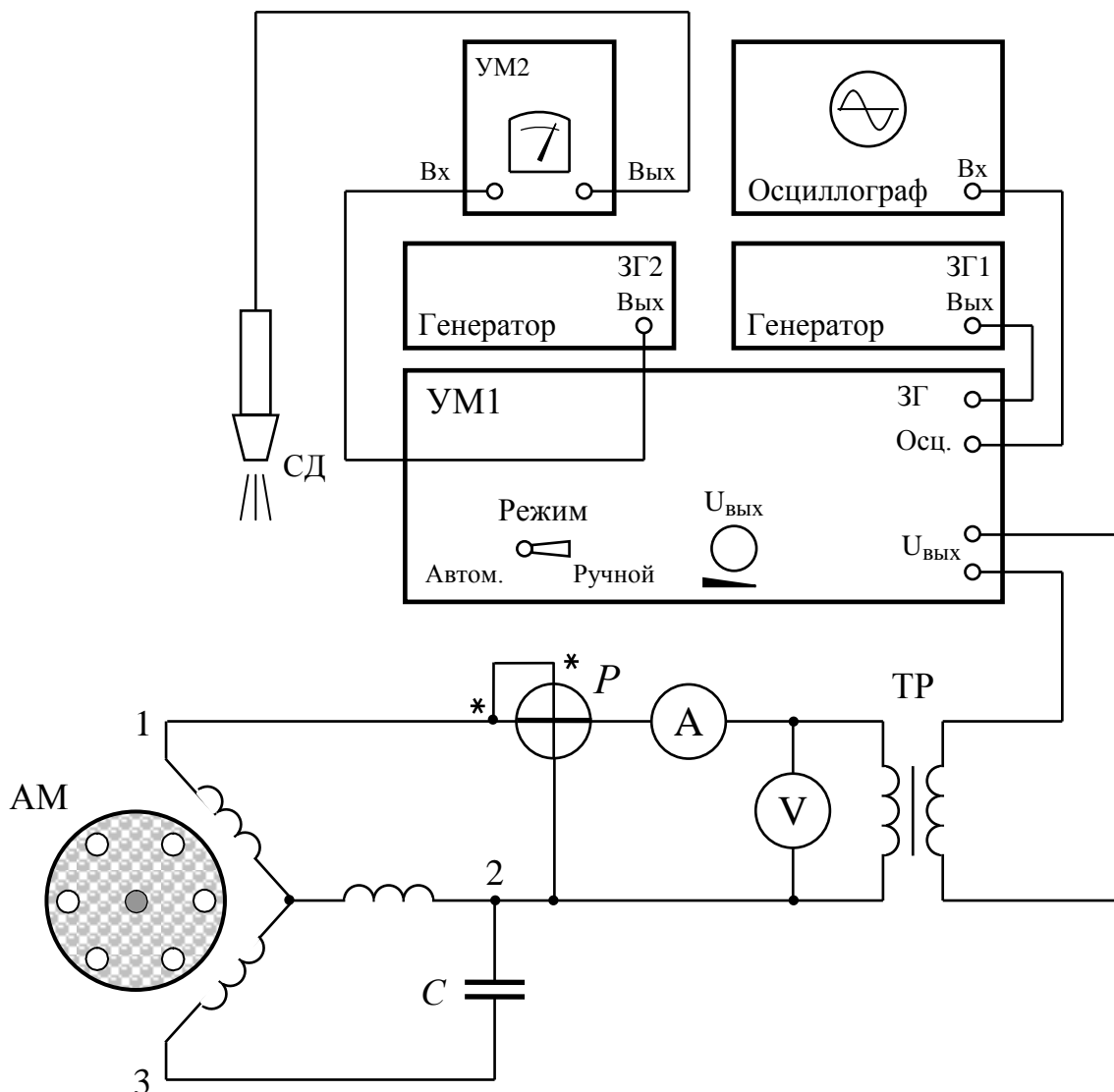


Рис.6

Установка содержит усилитель мощности УМ1, на вход которого поступает гармонический сигнал с задающего генератора ЗГ1. Сигнал с выхода усилителя мощности $U_{ВЫХ}$ подается на разделительный трансформатор ТР и далее на трехфазный асинхронный двигатель, включенный по схеме однофазного питания. Контроль формы выходного сигнала осуществляется с помощью осциллографа. Величину выходного напряжения можно изменять с помощью потенциометра $U_{ВЫХ}$ на передней панели УМ1. С помощью амперметра, вольтметра и ваттметра осуществляется контроль и измерение тока, напряжения и активной мощности, потребляемой асинхронным двигателем.

Измерение скорости выполняется с помощью строботачометра, состоящего из задающего генератора ЗГ2, усилителя мощности УМ2, к выходу которого подключен кабель со светодиодом СД.

ПРОГРАММА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка к работе лабораторного оборудования

1. Выставить ручку регулятора $U_{\text{ВЫХ}}$ на передней панели усилителя мощности УМ1 в положение, соответствующее минимальному значению выходного напряжения.
2. Выставить ручки регуляторов выходного напряжения генераторов ЗГ1 и ЗГ2 в положение «0».
3. Включить осциллограф, приборы ЗГ1, ЗГ2, УМ1, УМ2 и прогреть их в течение 15 минут.
4. Установить на выходе генератора ЗГ2 напряжение, при котором выходной сигнал УМ2 составит 10 В. Убедиться в появлении световых импульсов на светодиоде СД.

Внимание: категорически запрещается направлять в глаза световой луч светодиода СД.

Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением частоты питающего напряжения

Эксперимент проводится в два этапа.

Первый этап:

отношение напряжения питания к его частоте остается неизменным
 $U_1/f_1 = \text{const.}$

Частота сигнала составляет 50, 40, 30, 20 Гц;

При выполнении условия $U_1/f_1=1$ необходимо устанавливать следующие значения напряжения питания: 50, 40, 30, 20 В.

1. Установить на генераторе ЗГ1 частоту $f_1=50$ Гц.
2. Установить ручку регулятора выходного напряжения УМ1 в положение, соответствующее максимальному значению.
3. Используя ручку регулирования выходного напряжения ЗГ1, установить напряжение питания асинхронного двигателя 50 В. Контроль за величиной напряжения осуществляется с помощью вольтметра V .
4. С помощью строботахометра измерить частоту вращения вала асинхронного двигателя f .
5. Используя амперметр и ваттметр, измерить ток I и активную мощность P_{Σ} , потребляемую двигателем на заданной частоте.
6. Полученные значения f_1, f, U, I, P_{Σ} занести в таблицу 1.
7. Повторить измерения для частот 40, 30, 20 Гц, пропорционально изменяя напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Второй этап:

напряжение питания остается неизменным $U_1 = \text{const.}$

Частота питающего напряжения составляет 50, 60, 70, 80 Гц;

Напряжение питания 50 В.

1. Провести измерения f_1, f, U, I, P_{Σ} в указанном диапазоне частот. Полученные результаты занести в таблицу 2.

Первая зона регулирования

Таблица 1

f_1	f	ω_0	ω	N	U	I	P_{Σ}	P_{MEX}	M
Гц	Гц	рад/с	рад/с	об/мин.	В	А	Вт	Вт	Нм
50					50				
40					40				
30					30				
20					20				

Вторая зона регулирования

Таблица 2

f_1	f	ω_0	ω	N	U	I	P_{Σ}	P_{MEX}	M
Гц	Гц	рад/с	рад/с	об/мин.	В	А	Вт	Вт	Нм
50					50				
60					50				
70					50				
80					50				

Расчетные формулы:

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f_1 / p, \quad \text{где } p \text{ – число пар полюсов (для исследуемого двигателя } p = 1);$$

$$\omega = 2\pi \cdot f / p; \quad n = 60 \cdot f / p;$$

$$P_{MEX} = P_{\Sigma} \cdot \eta, \quad \text{где } \eta \text{ – к.п.д. (для исследуемого двигателя } \eta = 0,6);$$

$$M = P_{MEX} / \omega.$$

На основании приведенных в таблицах 1, 2 данных, необходимо построить механические характеристики $\omega = F(P_{MEX})$ асинхронного двигателя.

Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя уменьшением величины питающего напряжения

Выполнить подготовку к работе лабораторного оборудования (см. выше).

1. Установить на генераторе ЗГ1 частоту $f_1 = 50$ Гц.
2. Установить ручку регулятора выходного напряжения УМ1 в положение, соответствующее максимальному значению.
3. Используя ручку регулирования выходного напряжения ЗГ1, установить напряжение питания асинхронного двигателя 50 В. Контроль за величиной напряжения осуществляется с помощью вольтметра V .
4. С помощью строботахометра измерить частоту вращения вала асинхронного двигателя f .
5. Используя амперметр и ваттметр, измерить ток I и активную мощность P_{Σ} , потребляемую двигателем на заданной частоте.

6. Полученные значения f_1 , f , U , I , P_Σ занести в таблицу 3.

7. Повторить измерения при напряжении питания 40, 30, 20 В. Полученные результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3

f_1	f	ω_0	ω	N	U	I	P_Σ	$P_{\text{МЭХ}}$	M
Гц	Гц	рад/с	рад/с	об/мин.	В	А	Вт	Вт	Нм
50					50				
50					40				
50					30				
50					25				

На основании полученных данных, необходимо построить механические характеристики $\omega = F(P_{\text{МЭХ}})$ асинхронного двигателя.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Описание способов регулирования скорости вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
2. Описание лабораторной установки.
3. Результаты измерений и расчеты механических характеристик асинхронного двигателя при различных режимах его работы.

Работа 3М. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ СВОЙСТВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ТРЕХФАЗНОМ И ОДНОФАЗНОМ ПИТАНИИ

В лабораторной работе проводятся экспериментальные исследования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Определяются механические характеристики двигателей при трехфазном и однофазном питании.

Регулировочные свойства асинхронного двигателя в установившихся режимах определяются статическими характеристиками, к которым относятся механические характеристики $\omega = F(M_H)$.

Для снятия механических характеристик к валу исследуемого двигателя АМ подключается нагрузочная машина постоянного тока НМ (рис.1). Нагрузочная машина может работать в тормозном (генераторном) режиме, создавая момент нагрузки на валу асинхронного двигателя. В этом случае якорь нагрузочной машины подключается к резистору R_H . Напряжение и ток в якорной цепи нагрузочной машины измеряются с помощью вольтметра и амперметра.

При работе нагрузочной машины в двигательном режиме, якорь НМ подключается к регулируемому источнику постоянного напряжения. Испытуемый асинхронный двигатель в этом случае отключается от сети.

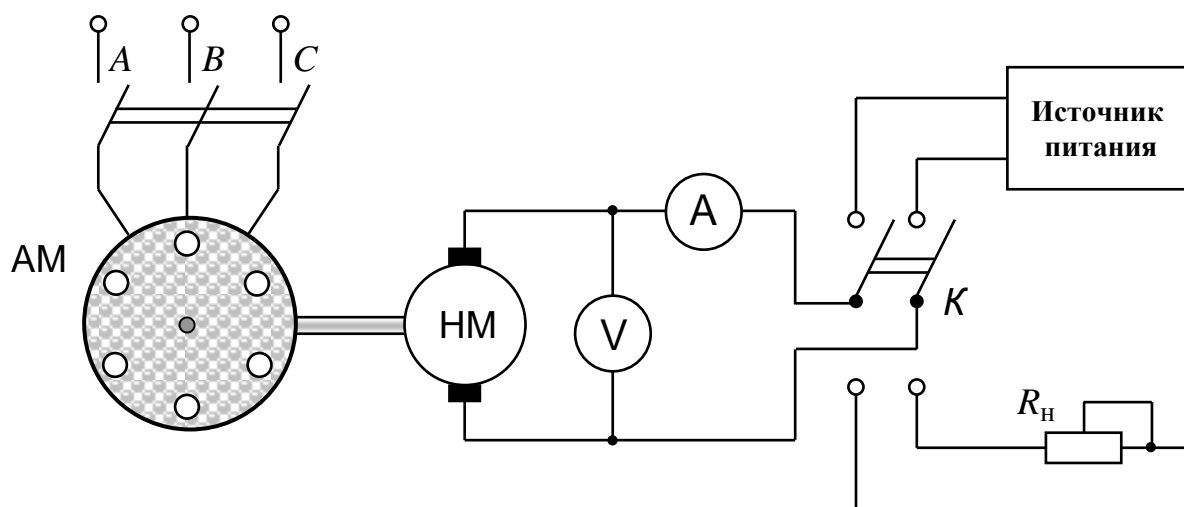


Рис.1

Для снятия механических характеристик асинхронного двигателя нагрузочную машину переводят в тормозной (генераторный) режим, подключив якорь НМ к нагрузочному резистору R_H . Механические характеристики асинхронного двигателя и нагрузочной машины приведены на рисунке 2. Механические характеристики нагрузочной машины располагаются во втором квадранте (область отрицательного момента M) и представляют собой семейство прямых линий 1, 2, 3, 4, исходящих из начала координат. Тангенс угла наклона этих линий пропорционален значению сопротивления R_H .

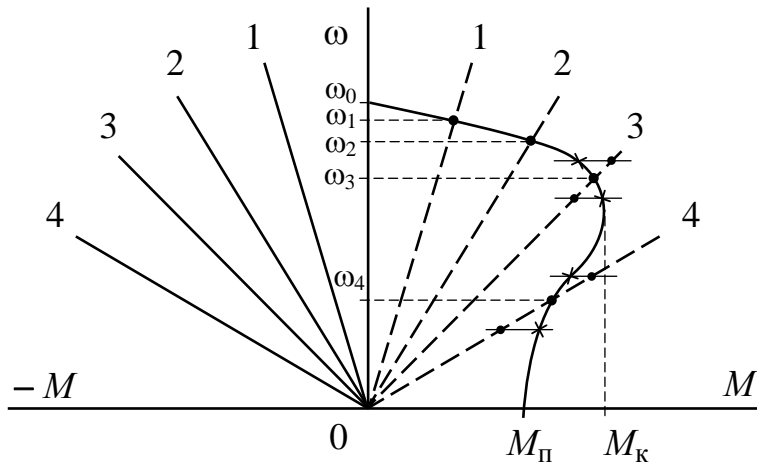


Рис.2

Точки пересечения зеркального изображения механических характеристик нагрузочной машины с механической характеристикой асинхронного двигателя, как следует из рисунка 2, являются точками устойчивого равновесия. Следовательно, использование нагрузочной машины в генераторном режиме позволяет снять все участки механической характеристики асинхронного двигателя.

При расчете механической характеристики АМ необходимо учитывать потери мощности в нагрузочной машине и в асинхронном двигателе.

Потери мощности в электрической машине зависят от тока нагрузки и скорости вращения ротора. Определяемые током нагрузки составляющие потерь ΔP_V принято называть переменными потерями. Составляющие потерь ΔP_A , зависящие от скорости вращения, от сил трения в подшипниках, вентиляционного момента, представляют собой так называемые постоянные потери. Сюда же относят потери в магнитопроводе машины.

Переменные потери в обмотке якоря нагрузочной машины с возбуждением от постоянных магнитов определяются выражением

$$\Delta P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{д}},$$

где $R_{\text{д}}$ – сопротивление обмотки якоря нагрузочной машины.

Потери мощности в щеточном контакте машины

$$\Delta P_{\text{щ}} \cong 2 \cdot \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{я}}, \quad \Delta U_{\text{щ}} = 1 \text{ В.}$$

В итоге, переменные потери в якорной цепи нагрузочной машины будут равны:

$$\Delta P_{\text{в.я}} = \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{я}} = 2 \cdot \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{д}}.$$

Постоянные потери в агрегате с учетом постоянных потерь в АМ и НМ определяются экспериментально. Для этого асинхронный двигатель отключают от сети, нагрузочную машину переключают на источник постоянного напряжения, переводя ее таким образом в двигательный режим.

Изменяя напряжения питания, необходимо добиться вращения агрегата в пределах исследуемого скоростного диапазона от ω_{\min} до ω_{\max} . При этом производятся измерения напряжения $U_{\text{Я}}$ и тока $I_{\text{Я}}$ в якорной цепи нагрузочной машины.

Постоянные потери определяются выражением:

$$P_A = U_{\text{Я}} \cdot I_{\text{Я}} - \Delta P_{\text{ВЯ}}.$$

Лабораторная работа выполняется на установке, принципиальная электрическая схема которой представлена на рисунке 3.

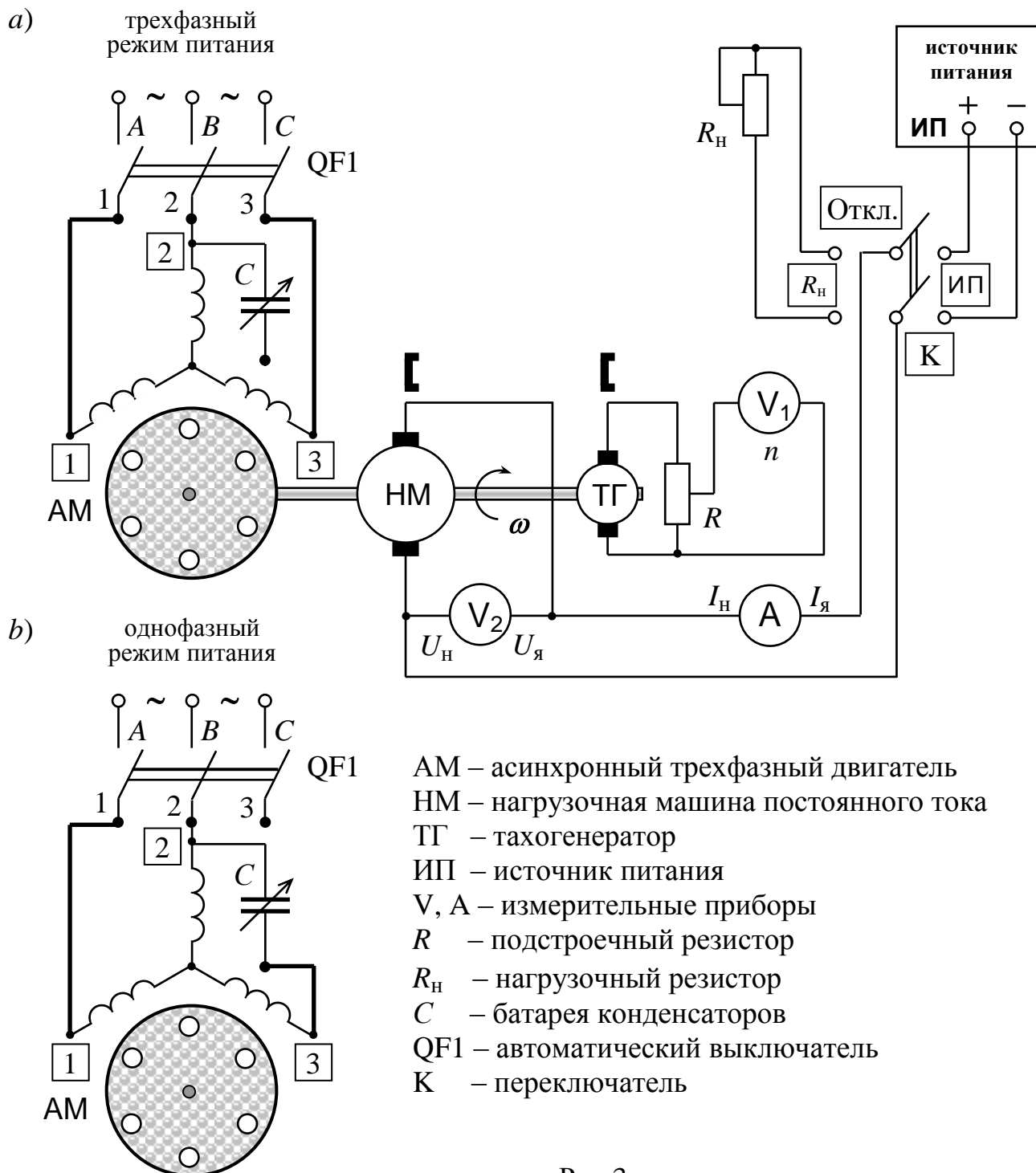


Рис.3

Программа выполнения работы

1. Асинхронный двигатель АМ подключается к источнику трехфазного напряжения (рис. 3а).
2. Нагрузочная машина НМ подключается к переменному резистору R_H . Изменяя сопротивление резистора R_H , изменяют ток в якорной цепи нагрузочной машины. Диапазон изменения тока задается преподавателем. Нагрузочная машина в этом опыте работает в генераторном режиме. В таблицу 1 заносятся значения скорости вращения агрегата n , измеряемые с помощью вольтметра V_1 , ток нагрузки I_H и напряжение U_H , измеряемые с помощью амперметра А и вольтметра V_2 . Затем определяются угловая скорость агрегата ω , мощность P_H , учитывающая потери в резисторе R_H и потери в якорной цепи нагрузочной машины ΔP_{VH} .
3. Асинхронный двигатель отключают от источника трехфазного напряжения. Нагрузочную машину переключают с резистора R_H на источник питания ИП. Изменяя напряжение источника питания, устанавливают такие же значения скорости, как в предыдущем опыте. Нагрузочная машина при этом работает в режиме двигателя.

Проводятся измерения тока якоря $I_я$ и напряжения якоря $U_я$ в цепи нагрузочной машины. Полученные данные заносятся в таблицу 1 и далее рассчитывается мощность P_A , определяемая потерями на трение в подшипниках и вентиляционными потерями за вычетом потерь $\Delta P_{Vя}$ в якорной цепи двигателя.

Полученные результаты позволяют определить механическую мощность $P_{Мех}$ и момент M_H на валу асинхронного двигателя. На основании полученных выше данных следует рассчитать и построить механическую характеристику $\omega = F(M_H)$ асинхронного двигателя в режиме трехфазного питания.

4. Асинхронный двигатель переводится в режим однофазного питания (см. рис.3б) и все указанные выше опыты повторяются.

Таблица 1

n	ω	I_H	U_H	ΔP_{VH}	P_H	$I_я$	$U_я$	$\Delta P_{Vя}$	P_A	$P_{Мех}$	M_H
об/мин.	рад/с	А	В	Вт	Вт	А	В	Вт	Вт	Вт	Нм

Расчетные формулы:

$$\omega = \pi n / 30;$$

$$P_H = U_H \cdot I_H + \Delta P_{VH}, \quad \Delta P_{VH} = 2 \cdot \Delta U_{щ} \cdot I_H + I_H^2 \cdot R_d;$$

где $\Delta U_{щ} = 1$ В – падение напряжения в щеточном контакте, $R_d = 0,22$ Ом – сопротивление обмотки якоря нагрузочной машины.

$$P_A = U_я \cdot I_я - \Delta P_{Vя}, \quad \Delta P_{Vя} = 2 \cdot \Delta U_{щ} \cdot I_я + I_я^2 \cdot R_d;$$

$$P_{Мех} = P_H + P_A;$$

$$M_H = P_{Мех} / \omega;$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 / p, \text{ где } p \text{ – число пар полюсов (для исследуемого двигателя } p = 2);$$

f_0 – частота напряжения питания.

Примечание.

Паспортные данные электрических машин

АМ – АИР56В4У3; Δ / \wedge ; 220/380; 1,09/0,63 А; 1350 об/мин; 180 Вт

НМ – ПЯ-250Ф УХЛ4; 36 В; 18 А; 3000 об/мин; 0,8 Нм

ТГ – ДПМ-20-01Н-0,5; 14 В; 0,07 А; 2000 об/мин; 0,04 Вт

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Описание методики экспериментального получения механических характеристик асинхронного двигателя.
2. Описание лабораторной установки.
3. Экспериментальные и расчетные механические характеристики асинхронного двигателя.
4. Графики механических характеристик асинхронного двигателя при трехфазном и однофазном питании.

Литература

1. Вольдек А.И., Попов В.В.. Электрические машины. Машины переменного тока. Учебник для вузов. – СПб, Питер, 2007.
2. Иванов-Смоленский А.В.. Электрические машины. Учебник для вузов в 2 томах. – Москва, Изд. дом МЭИ, 2006.
3. К.С.Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В.Коровкин, В.Л.Чечурин. Теоретические основы электротехники. Учебник для вузов в 3-х томах. Том1. – СПб, Питер, 2003.
4. В.В. Андрущук, И.М. Семенов. Электропривод. Лабораторный практикум, СПб ГПУ, 2011г.