

ФГБОУ  
«Ставропольский государственный аграрный университет»  
Электроэнергетический факультет  
Кафедра электроснабжения и эксплуатации электрооборудования

В. А. Кобозев, А. И. Адошев, М. А. Мельников, Ю. С. Пименов

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ. Часть 2. Электрические машины переменного тока

Лабораторный практикум:  
учебное пособие

Ставрополь, 2019

Рецензент: к.т.н., доцент кафедры АЭС СКФУ      А. В. Петров

**Кобозев В. А.**

Электрические машины. Часть 2. Электрические машины переменного тока: лабораторный практикум: учебное пособие / В. А. Кобозев, А. И. Адошев, М. А. Мельников, Ю. С. Пименов – Ставрополь : Сервисшко-ла, 2019. - 62 с.

В учебном пособии приведены методические указания к лабораторно-практическим занятиям по курсу «Электрические машины», ч. 2. «Электрические машины переменного тока», основные теоретические сведения по соответствующим темам и необходимые для выполнения работ справочные материалы.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» (профиль подготовки «Электроснабжение») и 35.03.06 – «Агроинженерия» (профиль подготовки «Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве»).

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для изучения общепрофессиональной дисциплины «Электрические машины», часть 2. «Электрические машины переменного тока», которая согласно государственному образовательному стандарту входит в систему подготовки специалистов по направлениям подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение») и 35.03.06 – «Агроинженерия» (профиль «Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве»).

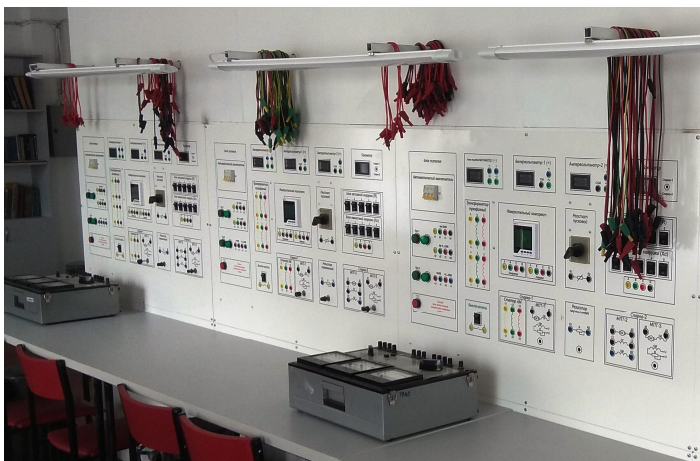
В результате выполнения лабораторного практикума студенты должны освоить:

- принципы построения обмоток, формирования вращающегося магнитного поля электрических машин переменного тока, и методику маркировки выводов обмоток;
- включение трехфазного синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации;
- методику определения параметров асинхронных машин по опытам холостого хода и короткого замыкания;
- методы расчета и экспериментального исследования механических и рабочих характеристик асинхронных электродвигателей;
- методику исследования характеристик асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в генераторных режимах работы;
- методы расчета и экспериментальных исследований характеристик трехфазных асинхронных электродвигателей при потере фазы питающего напряжения и при включении их в однофазную сеть.

Пособие построено таким образом, чтобы максимально облегчить студентам самостоятельную подготовку. С этой целью в начале методических указаний к каждому из занятий приводятся краткие теоретические сведения по соответствующей теме, а в приложениях даны справочные материалы, необходимые для выполнения работ.

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторно-практические занятия проводятся в учебной лаборатории кафедры электроснабжения и эксплуатации электрооборудования на специальных унифицированных стендах, обеспечивающих возможность фронтального выполнения работ (рис. В.1).



**Рисунок В. 1** - Общий вид специализированных стендов

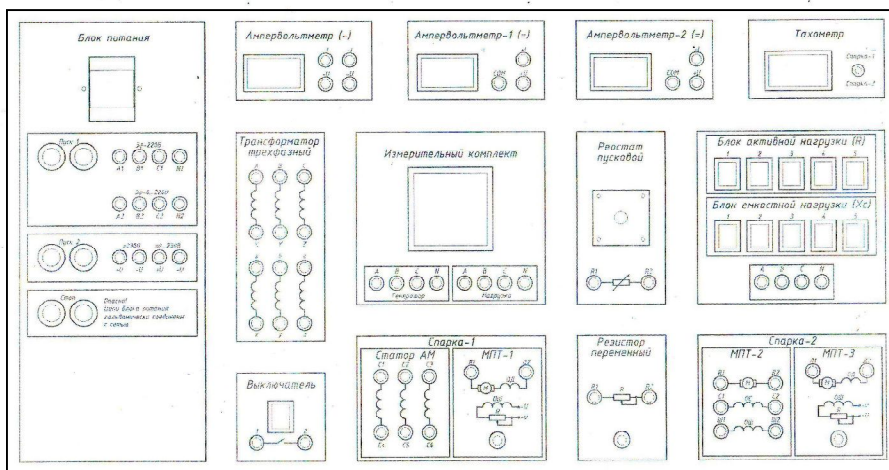
При первом знакомстве с лабораторией студентам необходимо ознакомиться с конструкцией стендов, обращая особое внимание на расположение коммутационных аппаратов, обеспечивающих включение и отключение самих стендов и отдельных модулей.

Лицевая панель стенда, на которой расположены коммутационные аппараты, выводы измерительных приборов, исследуемых электрических машин, и нагрузки, показана на рис. В. 2.

Включение и защита стенда осуществляются с помощью расположенного в верхней части блока питания трехфазного автоматического выключателя.

Кнопка «Пуск 1» служит для подключения трехфазного напряжения сети ( $3\phi \sim 220 \text{ В}$ ), и регулируемого трехфазного напряжения ( $3\phi \sim 0 \dots 220 \text{ В}$ ), изменение которого осуществляется с помощью расположенного непосредственно перед стендом фазорегулятора. О подключении переменного напряжения сигнализирует расположенная справа от кнопки «Пуск 1» сигнальная лампочка.

На блоке питания также расположена кнопка «Пуск 2» и сигнальная лампочка включения источника постоянного нерегулируемого ( $=230\text{ В}$ ), и регулируемого ( $=0 \dots 230\text{ В}$ ) напряжения.



**Рисунок В. 2** – Лицевая панель стенда

Отключение переменного и постоянного напряжения осуществляется с помощью красной кнопки «Стоп», расположенной в нижней части блока питания.

В верхней части лицевой панели стенда расположены однофазный ампервольтметр переменного тока и два ампервольтметра постоянного тока, а также тахометр для измерения частоты вращения электрических машин с переключателем на различные спарки.

В центре панели расположен трехфазный измерительный комплект, позволяющий фиксировать токи, фазные и междуфазные напряжения, активную, реактивную и полную мощности.

Исследования асинхронных машин выполняются с помощью вспомогательных машин постоянного тока, которые соединены с исследуемыми машинами общим валом, образуя спарку 1 (рис. В. 3). Машина постоянного тока имеет независимое возбуждение, и в зависимости от вида исследований используется либо в качестве нагрузки и работает в режиме генератора, либо в качестве первичного привода, и работает в двигательном режиме.



**Рисунок В. 3** – Спарка электрических машин

На лицевой панели расположены следующие элементы, используемые при исследованиях электрических машин переменного тока.

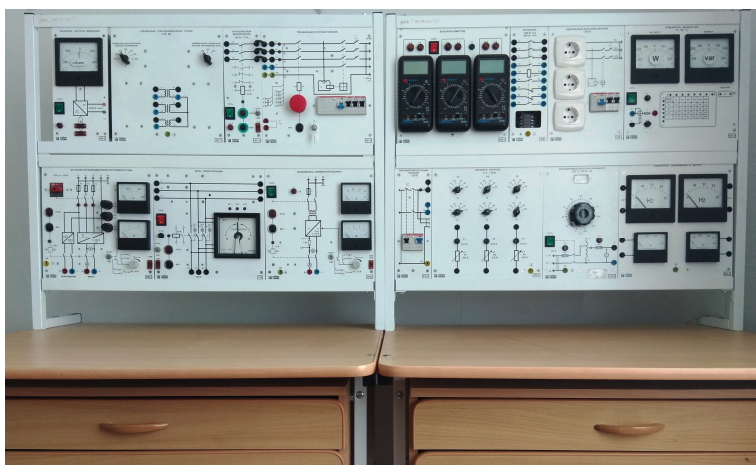
- Спарка-1: выводы обмотки статора асинхронной машины (С1-С4, С2-С5, С2-С6) и выводы обмотки якоря (Я1, Д2) связанной с ней общим валом вспомогательной машины постоянного тока МПТ-1, а также регулировочный реостат в цепи ее возбуждения.
- Реостат пусковой, используемый для ограничения токов в цепи якоря машин постоянного тока, и резистор переменный для регулирования тока в цепях возбуждения.
- Выключатель для исследования неполнофазных режимов работы асинхронных машин.
- Блоки активной и емкостной нагрузки с переключателями, и выходными клеммами А, В, С, N.

Кроме того, на лицевой панели расположены следующие элементы, которые используются при исследованиях трансформаторов и электрических машин постоянного тока.

- Трансформатор трехфазный: выводы первичных (А-Х, В-У, С-З) и вторичных (а-х, b-y, c-z) обмоток трансформатора.
- Спарка-2: выводы обмотки якоря (Я1, Д2), серийной (С1, С2) и шунтовой (Ш1, Ш2) обмоток возбуждения исследуемой машины постоянного тока МПТ-2, и выводы обмотки якоря (Я1, Д2) связанной с ней общим валом вспомогательной машины постоянного тока МПТ-3, а также регулировочный реостат в цепи ее возбуждения.

Помимо приборов, расположенных на стенде, при проведении некоторых работ используются и другие переносные приборы. При проведении с их помощью измерений необходимо внимательно выбирать измеряемый параметр и пределы измерений.

Исследования синхронной машины выполняются на специализированном стенде из комплекта учебного оборудования ООО «Учебная техника» (рис. В. 4).



**Рисунок В. 4** – Специализированный стенд для исследования синхронных машин «Учебная техника»

Перечень используемых в экспериментальной установке модулей приведен в методических указаниях по выполнению работы.

**Важно!** Особое внимание перед подключением регулируемых блоков питания следует обращать на правильность начальной установки напряжения с помощью фазорегулятора, поскольку при проведении различных опытов требуется напряжение от нуля до номинального значения, и неправильная его установка может привести к выходу из строя оборудования. Напряжение следует проверять с помощью вольтметра до сборки схемы экспериментальных исследований.

На первом занятии студенты обязаны пройти инструктаж по технике безопасности и расписаться в журнале, ознакомиться с правилами поведения в лаборатории, и далее неукоснительно соблюдать их. Наручители от занятий отстраняются.

Сборка и любые изменения схем производятся только при полностью выключенных стендах.

**Категорически запрещается** включать стенд без предварительной проверки ведущим занятия преподавателем!

В случае возникновения внештатной ситуации (искрение, запах горения и др.) необходимо немедленно выключить общий автоматический выключатель, и обратиться к преподавателю, не пытаясь самостоятельно устранить неисправность.

При подготовке к работе студент должен.

1. Изучить соответствующий раздел лекционного материала, и теоретические сведения, приведенные в настоящем пособии.
2. Хорошо представлять себе возможный конечный результат в виде характеристик, значений измеряемых и рассчитываемых параметров и т.д.
3. Знать принцип действия экспериментальной установки и точный порядок выполнения всех операций.
4. Подготовить отчет, в который далее будут вноситься полученные в ходе выполнения работы данные.

Готовность студента к занятиям работы проверяется преподавателем в ходе опроса до выполнения работы.

После завершения экспериментальных исследований и расчетов оформляется окончательный отчет, который предъявляется для проверки преподавателю. Защита отчета производится путем индивидуального собеседования.

## Работа № 1

### Исследование вращающегося магнитного поля и маркировка выводов обмоток электрических машин переменного тока

**Цель работы:** изучить принципы построения обмоток, формирования вращающегося магнитного поля электрических машин переменного тока, и методику маркировки выводов обмоток.

#### 1. Основные теоретические сведения

Принцип действия электрических машин переменного тока основан на получении вращающегося магнитного поля при протекании токов по их обмоткам.

Обмотки электрических машин представляют собой систему определенным образом взаимосвязанных между собой проводников, уложенных в пазы магнитной системы.

К обмоткам якоря синхронных машин и обмоткам статора асинхронных машин предъявляются одинаковые требования, и строятся они по одинаковым принципам.

Простейшим элементом любой обмотки является *виток*, который состоит из двух проводников, размещенных в пазах, находящихся друг от друга на расстоянии « $y$ », которое называется шагом обмотки. Витки, расположенные в одних и тех же пазах образуют *катушку* (рис. 1.1). Любая катушка характеризуется направлением намотки и имеет начало и конец.

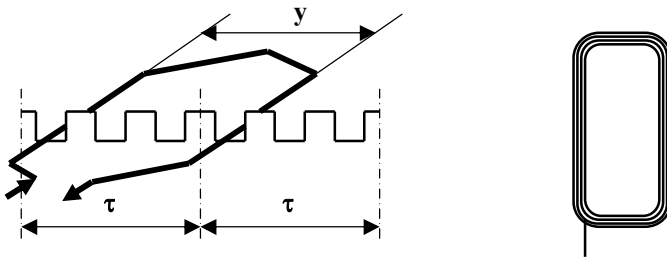


Рисунок 1.1 – Элементарный виток и катушка обмотки

Несколько определенным образом соединенных между собой катушек представляют собой *катушечную группу*. Катушечные группы образуют обмотку одной фазы. Простейшая фазная обмотка двухполюсной машины состоит из одной катушки, и называется сосредото-

точной. По числу фаз обмотки делятся на однофазные и многофазные, а по технологии изготовления – на однослойные и двухслойные. В однослойных обмотках в одном пазу размещается одна сторона катушки, в двухслойных – две стороны различных катушек.

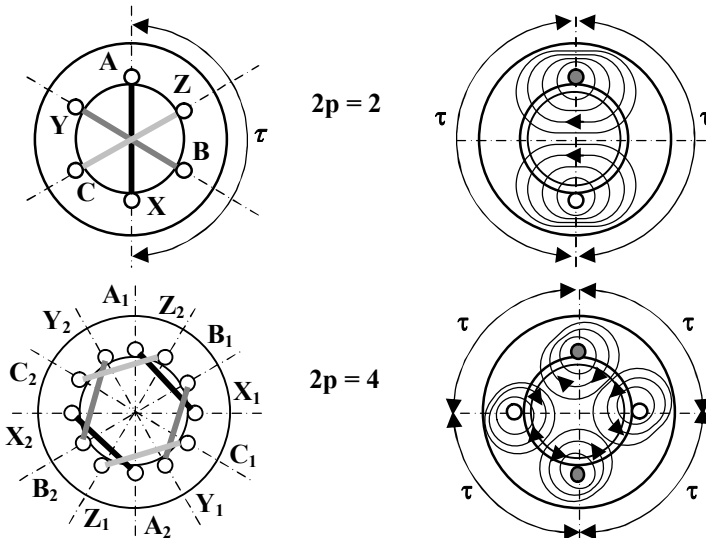
Основным расчетным параметром любой обмотки является *полюсное деление*, которое представляет собой длину дуги расточки статора, которая приходится на один полюс:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \tag{1.1}$$

Обычно полюсное деление выражается в числе пазов, приходящихся на один полюс:

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} \tag{1.2}$$

Шаг обмотки всегда равен полюсному делению, или очень близок к нему. Если:  $y = \tau$ , шаг обмотки называется *диаметральным*, если:  $y < \tau$  – укороченным. Обмотки могут образовывать одну или несколько пар полюсов (рис. 1.2).



**Рисунок 1.2** – Расположение катушек и картина магнитных полей трехфазных сосредоточенных обмоток с одной ( $2p = 2$ ) и двумя ( $2p = 4$ ) парами полюсов

В двухполюсных обмотках окружности статора соответствует два полюсных деления ( $2\tau = 360^\circ$ ), в четырех полюсных обмотках – четыре ( $4\tau = 360^\circ$ ), в шести полюсных – шесть ( $6\tau = 360^\circ$ ) и т.д., поэтому помимо геометрических градусов различают *электрические градусы*, которые связаны с геометрическими градусами выражением:

$$\alpha_{\text{эл}}^0 = p\alpha_{\text{геом}}^0. \quad (1.3)$$

Окружности (расточке) статора соответствует  $p \times 360^\circ$  электрических градусов. Фазовый сдвиг между двумя соседними пазами, выраженный в электрических градусах составляет:

$$\alpha_{\text{эл}} = \frac{p}{Z_1} 360^\circ. \quad (1.4)$$

Распределение обмотки по пазам характеризуется числом пазов на полюс и фазу:

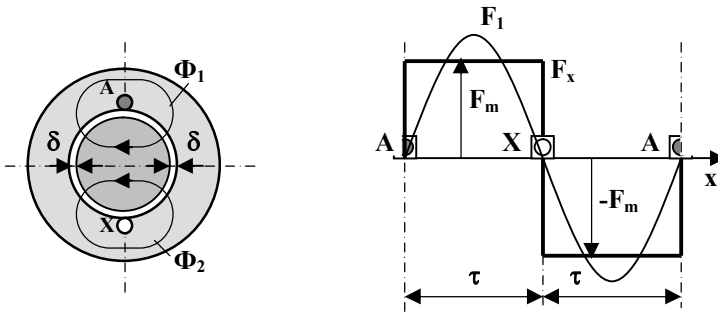
$$q = \frac{Z_1}{2pt} \geq 1. \quad (1.5)$$

В сосредоточенных обмотках  $q = 1$ , в остальных случаях  $q > 1$ , и может быть дробным числом.

В сосредоточенных обмотках размеры пазов получаются весьма большими, поскольку в них закладывается большое количество витков. Кроме того, для них характерно не синусоидальное, а прямоугольное распределение намагничивающей силы вдоль окружности статора. На рис. 1.3 показана характерная картина магнитного поля, создаваемого однофазной сосредоточенной обмоткой с диаметральной шагом. Полная намагничивающая сила в любой момент времени определяется произведением мгновенного значения тока на количество витков в катушке, и имеет максимальное значение в тот момент времени, когда максимальным будет ток:

$$F_{\text{м.к}} = I_{\text{м}} W_{\text{к}} = \sqrt{2} I_{\text{д}} W_{\text{к}}, \quad (1.6)$$

где  $I_{\text{м}}$ ,  $I_{\text{д}}$  – амплитуда и действующее значение тока.



**Рисунок 1.3** –Картина магнитного поля и диаграмма пространственного распределения намагничивающей силы сосредоточенной обмотки

Силловые линии магнитного поля замыкаются через два воздушных зазора, и направления их противоположны: для одного полюса – от статора к ротору, для другого – наоборот. Полное магнитное сопротивление практически равно сумме сопротивлений двух воздушных зазоров, поэтому вдоль каждого из полюсов действуют противоположно направленные **н.с.** (рис. 1.3) амплитуды которых равны:

$$F_m = \frac{F_{m.k}}{2} = \frac{\sqrt{2}I_d W_k}{2} . \quad (1.7)$$

Прямоугольное распределение периодической функции  $F_x$  можно представить в виде ряда гармонических составляющих:

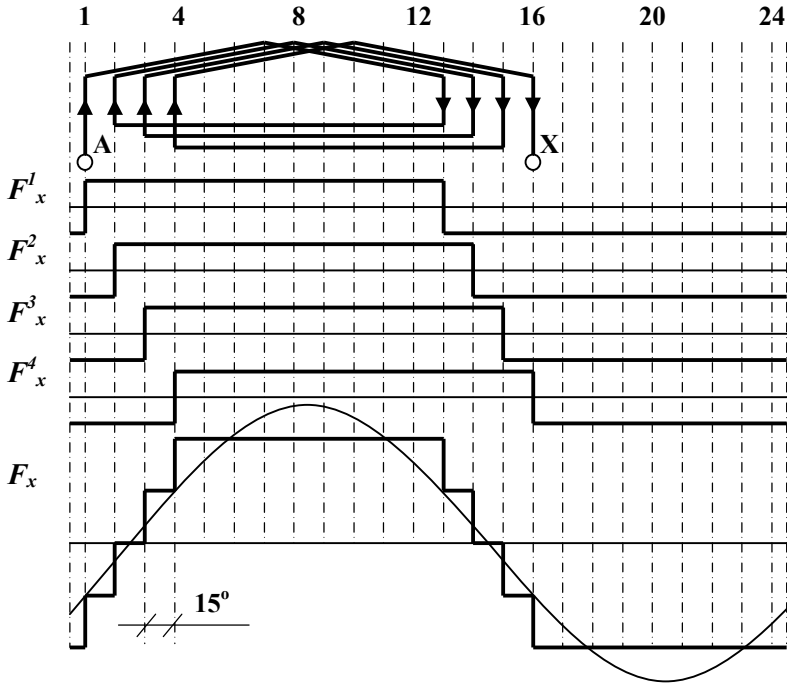
$$F_x = \frac{4}{\pi} F_m \left( \sin \frac{\pi}{\tau} x + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi}{\tau} x + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi}{\tau} x + \dots \right), \quad (1.8)$$

откуда следует, что амплитуда **н.с.** основной частоты равна:

$$F_{m1} = \frac{4F_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d W_k \approx 0,9 I_d W_k \quad (1.9)$$

Высшие гармонические составляющие вредно влияют на все характеристики электрических машин, и их устранение или значительное ослабление являются важной задачей, которая решается тремя основными методами: *распределением обмоток, укорочением их шага, и скосом пазом.*

Распределенные обмотки выгодно отличаются от сосредоточенных меньшими размерами пазов, лучшими условиями охлаждения, и более близким к синусоиде пространственным распределением **н.с.** Это достигается за счет того, что каждая из фазных обмоток состоит из нескольких смещенных в пространстве на определенный угол катушек (рис. 1.4).



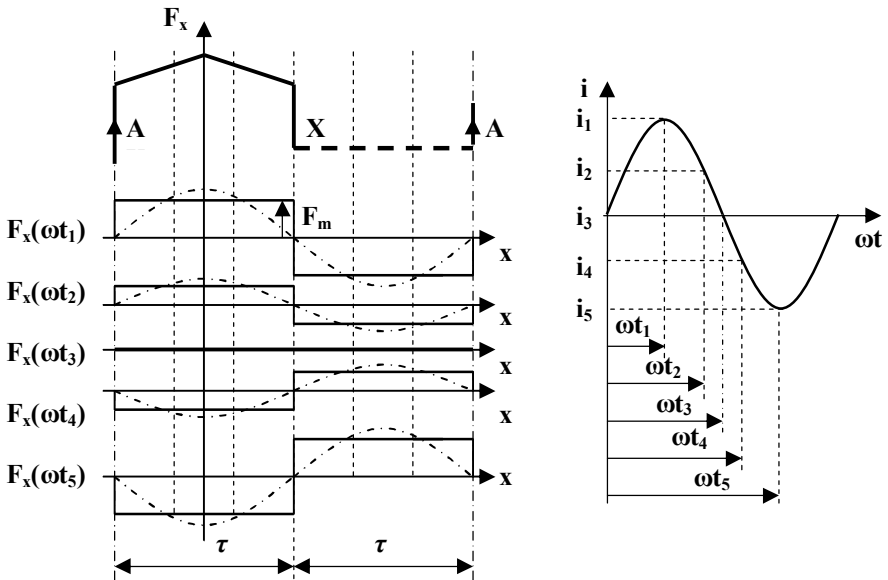
**Рисунок 1.4** – Распределение намагничивающей силы распределенной обмотки по расточке статора:  $Z_1 = 24$ ;  $y = \tau = 12$ ;  $q = 4$ ;  $\alpha_{\text{зд}} = 15^\circ$

Результирующая намагничивающая сила  $F_x$  определяется геометрической суммой **н.с.** отдельных катушек:  $F_x^1, F_x^2, F_x^3, F_x^4$ , и ее распределение по расточке статора приближается к синусоидальному. Эффективность использования распределенных обмоток оценивается с помощью *коэффициентов распределения* гармонических составляющих, которые численно равны отношению модуля результирующей **н.с.** к сумме модулей **н.с.** отдельных катушек.

При протекании по однофазной обмотке переменного тока возникает намагничивающая сила, закон изменения которой определяется законом изменения тока и исполнением обмотки. Сосредоточенная обмотка создает в каждой точке воздушного зазора, расположенной на расстоянии «х» от ее оси, н.с.  $F_x$ , которая зависит только от времени и частоты изменения тока:

$$F_x(\omega t) = F_m \sin \omega t = \frac{I_m W_k}{2} \sin \omega t . \quad (1.10)$$

Соответствующее этому случаю пространственное распределение н.с. показано на рис. 1.5.



**Рисунок 1.5** – Пространственное распределение намагничивающих сил относительно оси сосредоточенной однофазной обмотки

Из формулы (1.10) и показанных на рис. 1.5 диаграмм следует, что временные изменения тока (рис. 1.5 – б) приводят только к изменениям  $F_x$  во времени в пределах:  $-F_m \leq F_x \leq F_m$ , но не приводят к ее перемещению в пространстве по расточке статора. Такое поле называется *пульсирующим*.

При синусоидальном распределении **н.с.** на расточке статора, которое имеет место в распределенных обмотках, значение  $F_{tx}$  определяется по формуле:

$$F_{tx} = F_m \sin \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x, \quad (1.11)$$

где  $F_m \sin \omega t$  – **н.с.** в точке, расположенной по оси обмотки, которая зависит от частоты изменения тока  $\omega$  и времени  $t$ , а множитель  $\cos \frac{\pi}{\tau} x$  определяет пространственное положение точки  $x$ , для которой определяется **н.с.** на расточке статора.

Намагничивающая сила, создаваемая однофазной распределенной обмоткой, при изменениях тока пульсирует, принимая в каждой из точек на расточке статора значения в пределах:

$$-F_m \cos \frac{\pi}{\tau} x \leq F_x(\omega t) \leq F_m \cos \frac{\pi}{\tau} x. \quad (1.12)$$

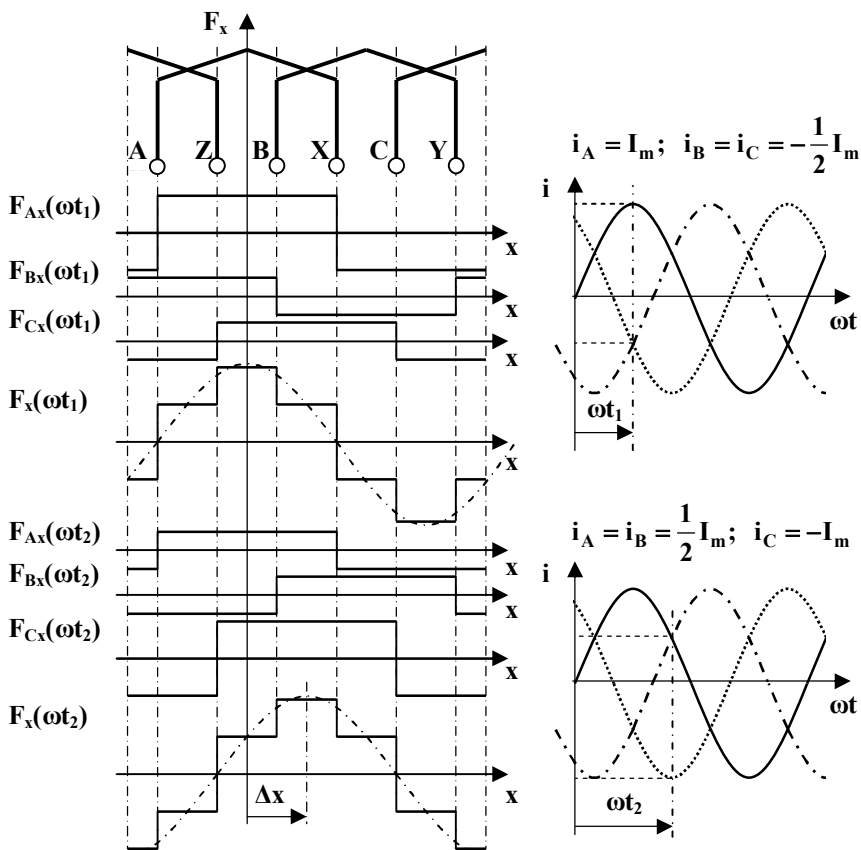
Обязательным условием работы электрических машин переменного тока является наличие вращающегося магнитного поля, которое в принципе невозможно получить в однофазных обмотках. В трехфазной обмотке результирующая намагничивающая сила в воздушном зазоре определяется путем суммирования **н.с.** отдельных фаз на каждом участке расточки статора. Для простоты рассмотрим образование вращающегося магнитного поля трехфазной сосредоточенной обмотки (рис. 1.6).

Каждая из фазных **н.с.** определяется по мгновенным значениям токов в заданный момент времени с учетом пространственного смещения обмоток. Например, в момент времени  $t_1$  намагничивающие силы в точке  $x = 0$ , расположенной по оси обмотки фазы **A** равны:

$$F_{Axt_1} = F_m; F_{Bxt_1} = F_{Cxt_1} = \frac{1}{2} F_m; F_{xt_1} = 2F_m,$$

а в момент времени  $t_2$ :

$$F_{Axt_2} = \frac{1}{2} F_m; F_{Bxt_2} = -\frac{1}{2} F_m; F_{Cxt_2} = F_m; F_{xt_2} = F_m.$$



**Рисунок 1.6** – Образование вращающегося магнитного поля трехфазной сосредоточенной обмотки

Аналогичным образом определяются **н.с.** на других участках и строятся зависимости, определяющие распределение **н.с.** на расточке статора, в результате чего можно убедиться в том, что суммирование пульсирующих **н.с.** отдельных фаз приводит к пространственному смещению результирующей **н.с.** на  $\Delta x$  по расточке статора. Дальнейшие временные изменения тока ведут и к дальнейшему пространственному смещению. Периоду изменения токов соответствует перемещение волны **н.с.** на расстояние, равное двум полюсным делениям:  $x = 2\tau$ , то есть – на **360** электрических градусов. В результате образуется *вращающееся магнитное поле*, частота вращения которого зави-

сит от частоты изменения тока ( $f_1$ ) и числа пар полюсов, формируемых обмоткой. Она называется частотой вращения поля статора, а также синхронной частотой или частотой идеального холостого хода, и численно равна:

$$\omega_c = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (1.13)$$

где  $f_1$  – частота питающего напряжения;  $p$  – число пар полюсов.

Намагничивающие силы трехфазных распределенных обмоток зависят от их пространственного расположения. Оси обмоток фаз **B** и **C** смещены по отношению к оси обмотки фазы **A** на расстояние, равное двум третям полюсного деления  $\pm \frac{2}{3}\tau$ , а токи смещены во времени на  $\pm 120^\circ$ , поэтому для любой точки на расточке статора, смещенной от оси на расстояние  $x$ , намагничивающие силы в фазах определяются уравнениями:

$$\begin{cases} F_{\text{Atx}} = F_{\text{m1}} \sin \omega t \cos \left( \frac{\pi}{\tau} x \right) \\ F_{\text{Btx}} = F_{\text{m1}} \sin(\omega t - 120^\circ) \cos \left( \frac{\pi}{\tau} x - 120^\circ \right), \\ F_{\text{Ctx}} = F_{\text{m1}} \sin(\omega t - 240^\circ) \cos \left( \frac{\pi}{\tau} x - 240^\circ \right) \end{cases}$$

которые путем преобразования с помощью известной формулы:

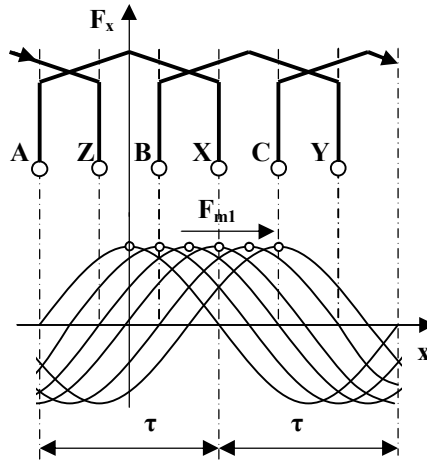
$\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \sin(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \sin(\alpha + \beta)$  можно привести к виду:

$$\begin{cases} F_{\text{Atx}} = \frac{1}{2} F_{\text{m1}} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) + \frac{1}{2} F_{\text{m1}} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{\tau} x \right) \\ F_{\text{Btx}} = \frac{1}{2} F_{\text{m1}} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) + \frac{1}{2} F_{\text{m1}} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{\tau} x - 240^\circ \right). \\ F_{\text{Ctx}} = \frac{1}{2} F_{\text{m1}} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) + \frac{1}{2} F_{\text{m1}} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{\tau} x - 120^\circ \right) \end{cases} \quad (1.14)$$

Результирующую **н.с.** для любого момента времени и любой точки «**x**» получаем путем суммирования составляющих:

$$F_{tx} = F_{Atx} + F_{Btx} + F_{Ctx} = 1,5F_{m1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right). \quad (1.15)$$

Из этого уравнения следует, что вращающееся магнитное поле принципиально отличается от пульсирующего поля. Первое отличие заключается в том, что амплитуда его основной гармоники остается неизменной, в то время как амплитуда пульсирующего поля изменяется при временных изменениях тока. Второе отличие заключается в том, волна **н.с.**, оставаясь неизменной во времени, перемещается в пространстве по расточке статора с синхронной частотой, и за один период изменения частоты  $f_1$  смещается по расточке статора на расстояние, равное двум полюсным делениям, эквивалентное 360 электрическим градусам (рис. 1.7)

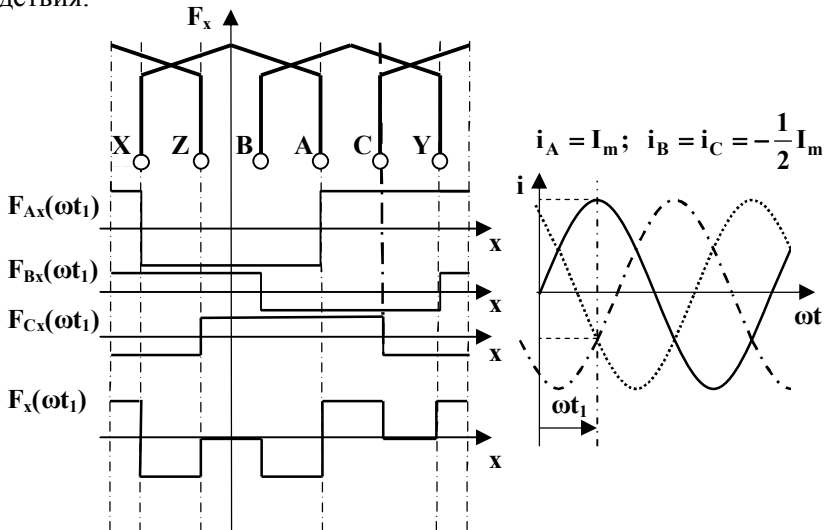


**Рисунок 1.7** – Круговое вращающееся магнитное поле распределенной трехфазной обмотки

Магнитное поле перемещается в сторону оси той фазы, в которой ожидается ближайший максимум тока. Изменение направления вращения магнитного поля достигается путем изменения порядка чередования фаз питающего напряжения (токов в обмотках).

## 2. Маркировка выводов обмоток

Форма создаваемых обмотками статора **н.с.** близка к синусоиде только при строго определенном соединении выводов. В случае неправильного соединения, например при изменении полярности одной из обмоток, **н.с.** искажаются (рис. 2.1), что приводит к резкому ухудшению характеристик машины, может вызвать насыщение магнитной системы, увеличение тока холостого хода и другие негативные последствия.

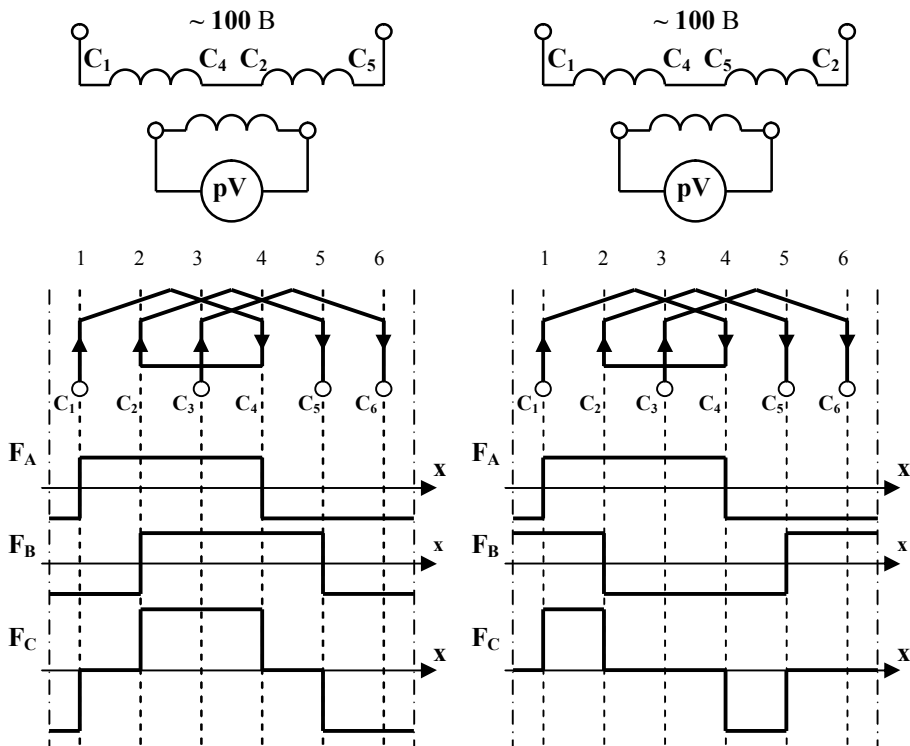


**Рисунок 2.1** – **Н.с.** симметричной сосредоточенной трехфазной обмотки для момента времени  $t_1$  при ошибочной маркировке выводов А и X

Маркировка выводов производится методом трансформации, суть которого поясняется рис. 2.2.

Вначале с помощью омметра определяются пары выводов, принадлежащих определенной обмотке. Затем две маркируемые обмотки (в данном случае  $C_1 - C_4$  и  $C_2 - C_5$ ) соединяется последовательно, а третья обмотка ( $C_3 - C_6$ ) используется для контроля. При согласном соединении (рис. 2.2 – а) результирующая **н.с.** и наведенная в контрольной обмотке ЭДС значительно больше, чем при встречном (рис. 2.2 – б). Маркировка выводов  $C_3 - C_6$  производится аналогично, но для контроля берется одна из уже промаркированных обмоток.

Для ограничения тока опыт следует проводить по возможности быстро и при пониженном напряжении.



**Рисунок 2.2** – Определение правильности маркировки выводов обмоток методом трансформации: а) правильно; б) неправильно

### 3. Указания по выполнению работы

1. Изучить настоящие методические указания
2. Проверить методом трансформации маркировку выводов обмоток асинхронной машины
3. Получить у преподавателя индивидуальное задание, согласно которому: 1 - определить расчетные параметры и изобразить схему обмотки; 2 – изобразить диаграммы намагничивающих сил для заданных моментов времени
4. Составить и защитить отчет о работе

## Работа № 2

### Включение синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации

**Цель работы:** освоить включение трехфазного синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации.

#### 1. Общие теоретические сведения

Включение синхронных генераторов (СГ) на параллельную работу с сетью обеспечивает увеличение мощности энергосистемы, повышает надежность электроснабжения, позволяет уменьшить резервную мощность агрегатов, оптимизировать распределение электроэнергии, и потому является наиболее типичным режимом их работы.

Для успешного включения СГ на параллельную работу необходимо выполнить ряд условий, которые исключают броски тока в момент включения, и обеспечивают синхронизацию ЭДС генератора и напряжения сети. Сеть и обмотка якоря СГ образуют замкнутый контур, в котором в случае невыполнения условий синхронизации возникает уравнивающий ток, равный:

$$\bar{I}_{\text{ур}} = \frac{\bar{U}_c + \bar{U}_1}{z_c + z_1}, \quad (1.1)$$

где  $\bar{U}_c, \bar{U}_1$ ;  $z_c, z_1$  – комплексы напряжений и сопротивлений сети и генератора.

Сопротивление сети и генератора весьма малы, поэтому даже небольшая разница напряжений может привести к значительным броскам тока. Общее условие успешного включения на параллельную работу сводится к равенству мгновенных значений напряжений всех трех фаз генератора соответствующим сетевым напряжениям:

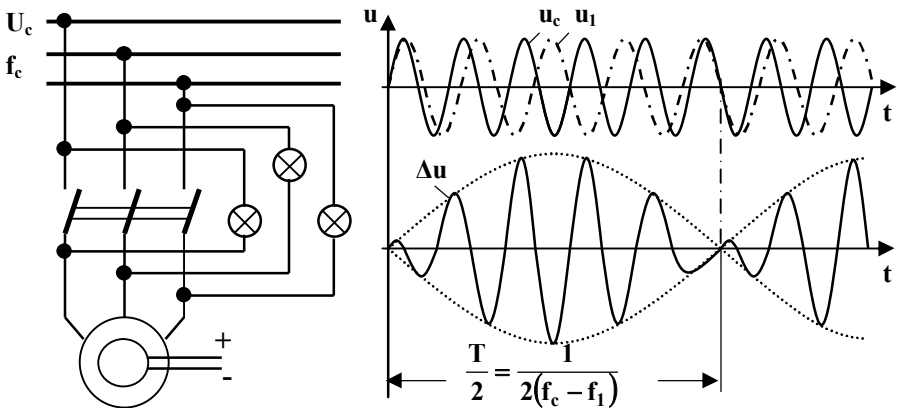
$$\sqrt{2}U_1 \sin(\omega_1 t - \alpha_1) = \sqrt{2}U_c \sin(\omega_c t - \alpha_c), \quad (1.2)$$

где  $U_1, U_c$  – действующие значения напряжений генератора и сети;  $\omega_1, \omega_c$  – их угловые частоты;  $\alpha_1, \alpha_c$  – начальная фаза напряжения генератора и соответствующая фаза сетевого напряжения.

Практически выполнение общего условия сводится к выполнению нескольких частных условий.

1. Равенство действующих значений фазных напряжений подключаемого генератора и сети  $U_1 = U_c$ .
2. Совпадение  $\bar{U}_1$  и  $\bar{U}_c$  по фазе по отношению к цепям нагрузки (противоположное направление в замкнутом контуре, образованном сетью и обмоткой якоря СГ).
3. Равенство частот ЭДС генератора и сети:  $\omega_1 = \omega_c$ ;  $f_1 = f_c$ .
4. Равенство начальных фаз  $\alpha_1 = \alpha_c$  и одинаковый порядок чередования фаз сети и генератора.

Совокупность операций по включению синхронного генератора на параллельную работу называется *синхронизацией*, а приборы, обеспечивающие ее выполнение – *синхроноскопами*. Принцип действия синхроноскопов основан на контроле мгновенных значений разности напряжений сети и генератора:  $\Delta u = u_c - u_1$  (рис. 1.1).



**Рисунок 1.1** – Синхронизация синхронного генератора при включении на параллельную работу с сетью

Синхронизация осуществляется следующим образом. Генератор включают автономно, и регулируют ток возбуждения и частоту вращения ротора таким образом, чтобы выполнялось условие  $U_1 \approx U_c$ . О выполнении других условий судят по разности мгновенных значений напряжения  $\Delta u = u_c - u_1$ , которая контролируется лампочками или вольтметрами, и в идеальном варианте должна равняться нулю.

Из рис. 1.1 – б следует, что при несовпадении частот сети и генератора  $\Delta u$  изменяется с частотой биений, равной:  $\Delta f = f_c - f_1$ , а максимальное значение  $\Delta u$  достигает удвоенной амплитуды напряжения сети, что может привести к большим толчкам тока. Частоте биений соответствует период  $T$ , равный:  $T = \frac{1}{f_c - f_1}$  (рис. 1.1 - б), ве-

личина которого в процессе синхронизации контролируется лампочками. При различии частот сети и генератора лампочки будут периодически разгораться, и погасать в момент времени, соответствующий равенству начальных фаз. Чем меньше различие частот, тем больше период  $T$ , поэтому частоту вращения ротора регулируют таким образом, чтобы период  $T$  был как можно больше, после чего обмотки якоря подключают к сети в момент погасания лампочек. Практически генератор втягивается в синхронизм при частоте биений  $\Delta f < (0,02 - 0,03)f_c$ , что при частоте сети 50 Гц примерно соответствует периоду, равному 1 с. После подключения генератора к сети синхронизация частоты вращения ротора происходит автоматически.

Генераторы большой мощности синхронизируют с помощью стрелочных приборов, принцип действия которых основан на взаимодействии вращающихся магнитных полей. Стрелка при этом вращается со скоростью, пропорциональной разности частот и останавливается при их совпадении.

Подключение синхронного генератора на параллельную работу с сетью по методу точной синхронизации производится в следующей последовательности.

1. Ротор генератора приводится во вращение с частотой вращения, максимально приближенной к синхронной.
2. Путем регулирования тока возбуждения устанавливается напряжение  $U_1$ , равное по величине напряжению сети.
3. Проверяется порядок чередования фаз.
4. Подключается синхроноскоп, частота вращения и ток возбуждения СГ регулируются таким образом, чтобы период разгорания и погасания лампочек был как можно больше.
5. Генератор подключается к сети в момент погасания лампочек.

## 2. Описание лабораторной установки

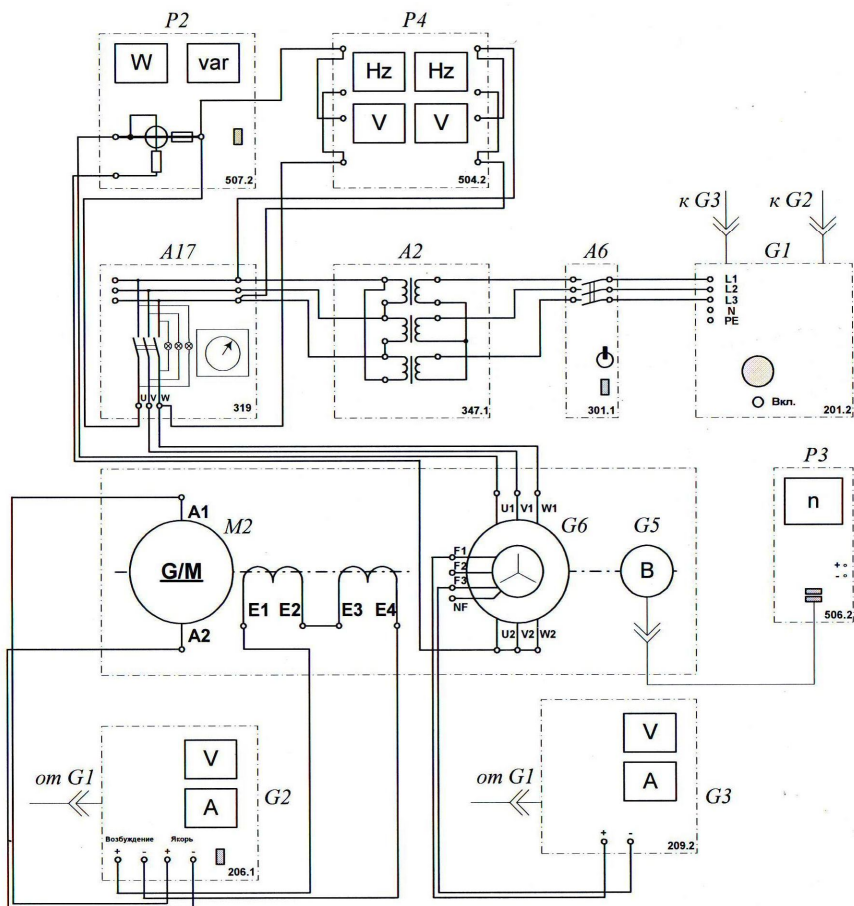
Работа выполняется на специализированном стенде из комплекта оборудования ООО «Учебная техника». Перечень используемых в экспериментальной установке модулей приведен в таблице 2.1.

**Таблица 2.1** – Перечень обозначений и параметров функциональных модулей экспериментальной установки

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трёхфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	– 0...250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G3	Возбудитель синхронной машины	209.2	– 0...40 В / 3,5 А
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
G6	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 мин <sup>-1</sup>
M2	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230 В/242,235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A6	Трёхполюсный выключатель	301.1	~ 400 В / 10 А
A17	Блок синхронизации	319	~ 400 В; 2 А; 3 индикаторные лампы; синхроскоп
P2	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В / 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А.
P3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000...0...2000 мин <sup>-1</sup>
P4	Измеритель напряжений и частот	504.1	~ 0...500 В; 45...55 Гц, ~ 220 В

Схема электрических соединений функциональных модулей приведена на рис. 2.1.

Общее питание осуществляется от трёхфазного источника питания синусоидальным напряжением промышленной частоты G1. Источник питания двигателя постоянного тока G2 обеспечивает регулирование напряжения на обмотке якоря и питание обмотки возбуждения машины M2, которая работает в режиме двигателя с независимым возбуждением и приводит во вращение вал СГ. Возбудитель G3 предназначен для питания обмотки возбуждения СГ.



**Рисунок 2.1** - Схема электрических соединений функциональных модулей экспериментальной установки

Синхронный генератор G6 связан с сетью (источником питания G1) через блок синхронизации A17 и трансформаторную группу A2.

Преобразователь угловых перемещений G5 (тахогенератор), закрепленный на валу сварки электрических машин, генерирует импульсы, пропорциональные частоте его вращения, поступающие на вход указателя частоты вращения P3.

Измеритель P2 контролирует активную и реактивную мощность СГ, а измеритель P4 – напряжения и частоты сети и генератора.

Контроль выполнения условий синхронизации и рекомендации по их выполнению приведены в таблице 2.2.

**Таблица 2.2 – Контроль выполнения условий синхронизации**

Условие	Средство контроля	Критерий выполнения условия	Критерий невыполнения условия	Рекомендации по выполнению условия
Равенство напряжений синхронного генератора и сети	Вольтметры со стороны синхронного генератора и сети	Напряжения со стороны синхронного генератора и сети равны	Напряжения со стороны синхронного генератора и сети не равны	Регулировать напряжения возбуждения синхронного генератора до момента выравнивания напряжений со стороны синхронного генератора и сети
Одинаковое чередование фаз напряжений синхронного генератора и сети	Лампы в разрывах фаз	Лампы в фазах: периодически одновременно загораются и гаснут (частоты напряжений не равны); горят (напряжения в противофазе); не горят (напряжения синфазные)	Лампы в фазах периодически не одновременно загораются и гаснут, создавая эффект “кругового огня”	Переключить любые две фазы синхронного генератора
Равенство частот синхронного генератора и сети	Лампы в разрывах фаз или синхроскоп	Лампы в фазах горят постоянно без мерцания (напряжения в противофазе) или не горят (напряжения синфазные); стрелка синхроскопа неподвижна	Лампы в фазах загораются с частотой скольжения; стрелка синхроскопа вращается	Регулировать частоту вращения синхронного генератора
Синфазность напряжений синхронного генератора и сети	Лампы в разрывах фаз или синхроскоп	Лампы в фазах не горят; стрелка синхроскопа смотрит вверх	Лампы в фазах горят; стрелка синхроскопа не смотрит вверх	Регулировать частоту вращения синхронного генератора до погасания ламп

### 3. Указания по выполнению работы.

- 3.1. Убедитесь в том, что все используемые в эксперименте устройства отключены от сети.
- 3.2. Соедините гнезда защитного заземления используемых в эксперименте модулей с гнездом «РЕ» источника питания G1.
- 3.3. Соедините функциональные модули согласно схеме рис. 2.1.
- 3.4. Переведите в положение «РУЧН.» переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3, выключателя А6, и блока синхронизации А17.

- 3.5. Поверните против часовой стрелки до упора рукоятки регуляторов источника G2 и возбудителя G3.
- 3.6. Установите переключателем в трехфазной группе трансформаторов A2 номинальные напряжения вторичных обмоток 220 В.
- 3.7. Включите выключатели «СЕТЬ» следующих модулей: трехфазного выключателя A6, блока синхронизации A17 и указателя частоты вращения P3.
- 3.8. Включите источник питания двигателя постоянного тока G2 (о наличии напряжения на его выходе должны сигнализировать лампочки).
- 3.9. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» источника питания G2.
- 3.10. Плавно вращая рукоятку регулятора источника G2 установите частоту вращения электрических машин M2 и G6 1500 об/мин.
- 3.11. Нажатием кнопки «ВКЛ.» включите выключатель A6.
- 3.12. Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» возбудителя G3.
- 3.13. Плавно вращая рукоятку регулятора модуля возбуждения G3, установите междуфазные напряжения генератора равными междуфазным напряжениям сети.
- 3.14. Проверьте выполнение условий синхронизации (таблица 2.2), после чего нажатием кнопки «ВКЛ.» модуля A17 подключите генератор к сети.
- 3.15. Убедитесь в том, колебания режимных параметров отсутствуют, и СГ вошел в режим синхронной работы с сетью.
- 3.16. Вращая рукоятку регулятора источника питания машины постоянного тока G2, нагрузите СГ активной мощностью, например до 30 Вт, которую контролируйте ваттметром измерителя P2.
- 3.17. Вращая рукоятку регулятора возбудителя G3, нагрузите СГ реактивной мощностью с отстающим (опережающим) коэффициентом мощности, например до 30 ВАр, которую контролируйте варметром измерителя P2.

**Важно!** Строго соблюдать последовательность выполнения всех указанных в п.п. 3.1 – 3.17 операций.

3.18. Для выключения генератора выполнить следующие операции:

- разгрузить его по активной (реактивной) мощности;
- нажать кнопку «ОТКЛ.» блока синхронизации А17;
- повернуть рукоятку регулятора возбудителя G3 до упора против часовой стрелки;
- повернуть рукоятку регулятора источника питания машины постоянного тока G2 до упора против часовой стрелки;
- отключить выключатели «СЕТЬ» задействованных в эксперименте модулей;
- нажав кнопку-гриб и отключив ключ-выключатель отключить трехфазный источник питания G1.

**Важно!** Категорически запрещается отключение установки без последовательного выполнения всех указанных операций.

3.19. Сделать выводы. Оформить отчет о работе.

### Контрольные вопросы

1. Где применяется параллельная работа синхронных генераторов с сетью?
2. В чем заключаются условия включения СГ на параллельную работу с сетью?
3. Что такое частота и период биений?
4. Почему рассогласование частот сети и генератора опасно для энергосистемы?
5. В какой последовательности производится включение СГ на параллельную работу с сетью по методу точной синхронизации?
6. Перечислите основные функциональные блоки экспериментальной установки.
7. Почему не применяется прямое включение СГ в сеть?
8. В каком порядке осуществляется выключение СГ, работавшего параллельно с сетью?

## Работа № 3

### Определение параметров асинхронной машины по опытам холостого хода и короткого замыкания

**Цель работы:** изучить методы определения параметров асинхронных машин по опытам холостого хода и короткого замыкания

#### 1. Общие теоретические положения

При анализе различных характеристик асинхронных машин необходимо знать их основные параметры: ток и потери холостого хода; активное и индуктивное сопротивление ветви намагничивания; номинальные потери короткого замыкания и пусковой ток; активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания. Все эти параметры можно получить в результате проведения относительно простых опытов холостого хода и короткого замыкания.

**Опыт холостого хода.** Исследуемая машина работает в двигательном режиме без нагрузки на валу, при очень малом скольжении ( $s \Rightarrow 0$ ) и практически неизменной частоте вращения, близкой к синхронной:  $n_2 \approx n_1$ . Схема проведения опыта показана на рис. 1.1.

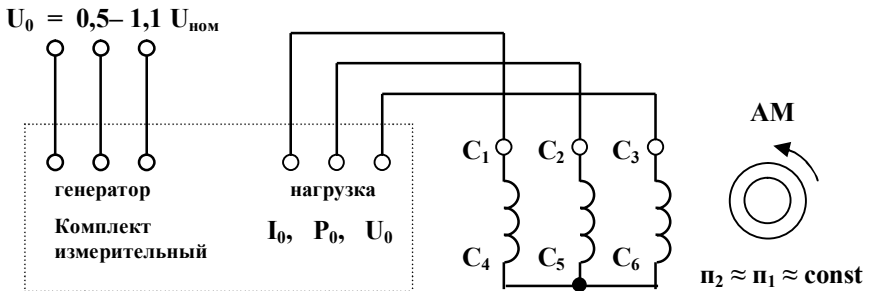


Рисунок 1.1 – Схема проведения опыта холостого хода

При выполнении опыта холостого хода напряжение  $U_0$  уменьшается от  $1,1U_{\text{ном}}$  до такого значения, при котором начинается заметное снижение частоты вращения (примерно  $U_0 = 0,5U_{\text{ном}}$ ), и снимаются зависимости  $I_0 = f(U_0)$ ,  $\Delta P_0 = f(U_0)$ , и  $\cos \varphi_0 = \frac{\Sigma \Delta P_0}{3U_0 I_0} = f(U_0)$ , примерный вид которых показан на рис. 1.2 – а.

Поскольку идеальной симметрии питающих напряжений при регулировании достигнуть практически невозможно, необходимо находить средние значения напряжений и токов в фазах:

$$U_0 = \frac{U_{A0} + U_{B0} + U_{C0}}{3}; \quad I_0 = \frac{I_{A0} + I_{B0} + I_{C0}}{3}.$$

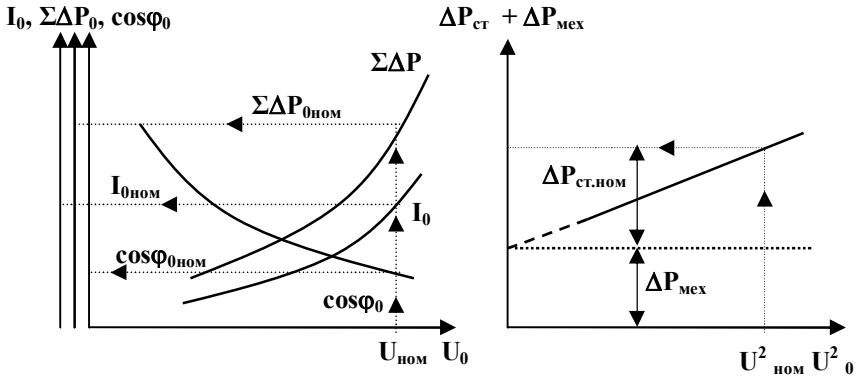


Рисунок 1.2 – Примерный вид характеристик холостого хода (а) и разделение потерь (б)

Суммарные потери при холостом ходе асинхронной машины представляют собой сумму трех основных составляющих: потерь в обмотке статора, потерь в стали, и механических потерь:

$$\Sigma\Delta P_0 \approx \Delta P_{эл.1} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} = 3I_0^2 r_1 + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех}. \quad (1.1)$$

Электрические потери в обмотке ротора пренебрежимо малы, поскольку при малых скольжениях:  $\frac{r'_2}{s} \Rightarrow \infty, I'_2 \Rightarrow 0$ .

Электрические потери в обмотке статора  $3I_0^2 r_1$  и потери в ветви намагничивания  $\Delta P_{ст}$  зависят от тока холостого хода, который определяется степенью насыщения магнитной системы, и в конечном итоге является функцией приложенного напряжения.

Механические потери зависят только от частоты вращения, которую в процессе проведения опыта необходимо оставлять практически неизменной. Для этого напряжение необходимо уменьшать только до такого значения, при котором частота вращения начнет уменьшаться (обычно –  $0,4 \dots 0,5 U_{ном}$ ).

Для определения параметров контура намагничивания необходимо из полных потерь холостого хода выделить потери в стали. Для этого с помощью омметра (или на основании опыта короткого замыкания) определяется активное сопротивление обмотки статора, а затем для каждого значения напряжения  $U_{0i}$  вычисляется величина:

$$(\Delta P_{ст} + \Delta P_{мех})_i = \Sigma \Delta P_{0i} - 3I_{0i}^2 r_1. \quad (1.2)$$

Для более точного разделения потерь в стали и механических потерь используется метод *Деттмара*, согласно которому строится зависимость:  $\Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} = f(U_0^2)$ , которая весьма близка к линейной. Продолжение полученной зависимости до оси ординат (показано пунктиром) дает значение механических потерь, которые при неизменной частоте вращения можно считать постоянными. Вычитая их из суммы  $(\Delta P_{ст} + \Delta P_{мех})_i$  получают потери в стали при определенных значениях напряжения. Потери  $\Delta P_{ст.ном}$  имеют место при номинальном напряжении (рис. 1.2 – б).

Полное, активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания с достаточной точностью вычисляются по формулам:

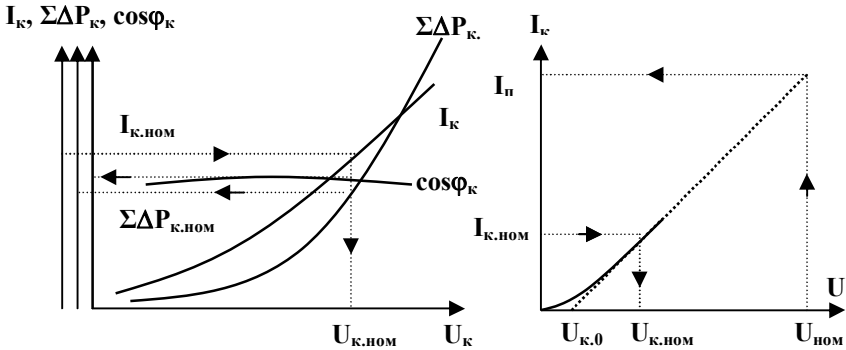
$$z_\mu \approx \frac{U_0}{I_0}; \quad r_\mu \approx \frac{\Delta P_{cm}}{3I_0^2}; \quad x_\mu = \sqrt{z_\mu^2 - r_\mu^2}. \quad (1.3)$$

Если специально не оговорено иное, все расчётные параметры относятся к номинальному напряжению, от которого на оси абсцисс восстанавливаются перпендикуляры до пересечения с соответствующими характеристиками. Проекции точек пересечения на оси ординат дадут искомые значения токов и мощностей.

Полученные числовые значения  $r_\mu$  и  $x_\mu$  необходимо нанести на Г-образную схему замещения асинхронной машины (рис. 1.4).

**Опыт короткого замыкания.** Для того, чтобы провести этот опыт, ротор машины необходимо заклинить и подвести к обмоткам статора пониженное напряжение  $U_k$ . Схема включения приборов и машины при этом остаётся такой же, как и в опыте холостого хода. Напряжение необходимо постепенно повышать от нуля до такого значения, при котором ток достигнет значения  $1,5 \dots 2,0 I_{ном}$ . При возрастании тока зависимость  $I_k = f(U_k)$  становится практически линей-

ной, что объясняется уменьшением индуктивных сопротивлений вследствие насыщения зубцовых слоёв. В процессе опыта снимаются те же самые параметры, что и в опыте холостого хода, но помечаются они индексом "к". Примерный вид зависимостей  $I_k = f(U_k)$ ,  $\Sigma\Delta P_k = f(U_k)$ , и  $\cos \varphi_k = \frac{\Sigma\Delta P_k}{3U_k I_k} = f(U_k)$  показан на рис. 1.3 - а.



**Рисунок 1.3** - Примерный вид характеристик короткого замыкания (а) и определение пускового тока АД (б)

Принципиальное отличие опыта короткого замыкания от опыта холостого хода заключается в том, что при неподвижном роторе механические потери тождественно равны нулю, а потери в стали пренебрежимо малы по сравнению с электрическими потерями. Это объясняется тем, что при скольжении  $s = 1$  ток в ветви намагничивания пренебрежимо мал по сравнению с приведенным током неподвижного короткозамкнутого ротора:  $I_\mu \ll I'_{2к}$ . В результате:

$$I_k = I_{1к} \approx I'_{2к}; \quad \Delta P_k = \Sigma\Delta P_{эл} = 3I_k^2 r'_{к}. \quad (1.4)$$

Разделения потерь в этом случае не требуется. Параметры короткого замыкания определяются при значении тока короткого замыкания, равном номинальному току АД. Для подсчёта приведённых сопротивлений короткого замыкания используются формулы, аналогичные формулам 1.3, в которые подставляются данные, полученные при выполнении опыта короткого замыкания:

$$z'_{к} \approx \frac{U_{к.ном}}{I_{к.ном}}; \quad r'_{к} \approx \frac{\Sigma\Delta P_{к.ном}}{3I_{к.ном}^2}; \quad x'_{к} = \sqrt{z_{к}^{\prime 2} - r_{к}^{\prime 2}}. \quad (1.5)$$

В первом приближении можно считать, что активные и индуктивные сопротивления короткого замыкания обмоток статора равны соответствующим приведённым сопротивлениям обмоток ротора:

$$r_1 \approx r'_2 \approx r'_{к/2} ; x_1 \approx x'_2 \approx x'_{к/2} .$$

Более точно активное сопротивление обмотки статора можно определить с помощью омметра или измерениями на постоянном токе. В этом случае:  $r'_2 = r'_{к} - r_1$ .

Полученные числовые значения сопротивлений  $r_{\mu}$ ;  $x_{\mu}$ ;  $r_1$ ;  $x_1$ ;  $r'_2$ ;  $x'_2$  наносятся на Г-образную схему замещения (рис. 1.4).

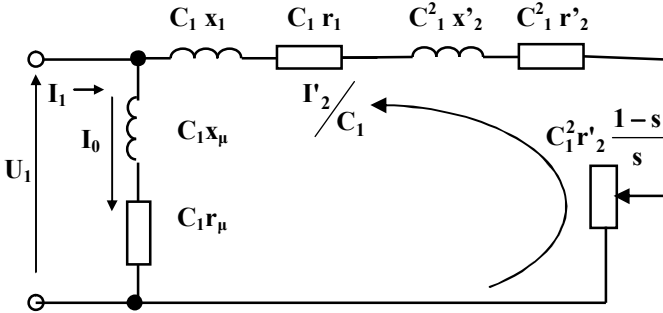


Рисунок 1.4 - Г-образная схема замещения асинхронной машины

Модуль коэффициента  $C_1$  определяется по формуле:

$$C_1 \approx 1 + \frac{z_1}{z_{\mu}} = 1 + \frac{\sqrt{r_1^2 + x_1^2}}{z_{\mu}} , \quad (1.6)$$

Данные опыта короткого замыкания используются также для определения пускового тока, который представляет собой ток короткого замыкания при номинальном напряжении. Для его вычисления необходимо графически определить напряжение  $U_{к0}$  (рис. 1.3 – б) и далее использовать формулу:

$$I_n = \frac{U_{ном} - U_{к.0}}{U_{к.ном} - U_{к.0}} I_{ном} = k_I I_{ном} . \quad (1.7)$$

Кратность пускового тока АД составляет  $k_I = 5-7$ , причем двигателям малой мощности соответствуют и меньшие значения  $k_I$ .

## 2. Указания по выполнению работы

- 2.1. Записать паспортные данные асинхронной машины. Определить с помощью омметра активное сопротивление обмотки статора  $r_1$ . Подготовить таблицу для записи показаний приборов и результатов расчета в опыте холостого хода.

$U_0, \text{В}$	$I_0, \text{А}$	$\Sigma \Delta P_0, \text{Вт}$	$\cos \varphi_0$	$U^2_0, \text{В}^2$	$\Delta P_{\text{cm}} + \Delta P_{\text{мех}}, \text{Вт}$

- 2.2. Установить с помощью фазорегулятора пониженное напряжение. Собрать и опробовать принципиальную схему для выполнения опыта холостого хода (рис. 1.1).
- 2.3. Плавно увеличивать напряжение до тех пор, пока ток не достигнет  $1,1 \dots 1,2 I_{\text{ном.}}$ , а затем снижать его до такого значения, при котором частота вращения машины начнёт заметно уменьшаться. Записывать показания приборов через каждые  $30 \dots 40 \text{ В}$ . По полученным данным построить зависимости, аналогичные приведённым на рис. 1.2. Определить составляющие потерь холостого хода,  $\cos \varphi_0$ , и сопротивления ветви намагничивания, соответствующие номинальному напряжению.
- **Важно!** В конце опыта х.х. снизить напряжение до минимально возможного значения!
- 2.4. Подготовить таблицу для записи показаний приборов и результатов расчета в опыте короткого замыкания.

$I_{\text{к}}, \text{А}$	$U_{\text{к}}, \text{В}$	$\Sigma \Delta P_{\text{к}}, \text{Вт}$	$\cos \varphi_{\text{к}}$	$z'_{\text{к}}, \text{Ом}$	$r'_{\text{к}}, \text{Ом}$	$x'_{\text{к}}, \text{Ом}$

- 2.5. Заклинить ротор асинхронной машины, включить установку и довести ток до  $1,5 I_{\text{ном.}}$ , затем снижать его до  $0,5 I_{\text{ном.}}$ , записывая показания приборов. По полученным данным построить зависимости, подобные показанным на рис. 1.3. Определить напряжения  $U_{\text{к.ном}}$  и  $U_{\text{к.0}}$ ,  $\cos \varphi_{\text{к}}$ , потери  $\Sigma \Delta P_{\text{к.ном}}$ , и рассчитать сопротивления короткого замыкания.
- **Важно!** Перед выполнением опыта короткого замыкания убедиться в том, что напряжение на выходе фазорегулятора близко к нулю!

- 2.6. Определить сопротивления  $r_1$ ;  $x_1$ ;  $r'_2$ ;  $x'_2$ , рассчитать коэффициент  $C_1$ , изобразить схему замещения и нанести на нее числовые значения всех полученных параметров.
- 2.7. Определить пусковой ток АД и его кратность по отношению к номинальному току.
- 2.8. Проанализировать полученные результаты. Сделать выводы. Оформить отчет.

### Контрольные вопросы

1. Пояснить назначение и порядок выполнения опыта холостого хода асинхронной машины.
2. Почему и как параметры холостого хода зависят от величины приложенного напряжения?
3. Почему при выполнении опыта необходимо оставлять неизменной частоту вращения?
4. С какой целью, и каким образом по результатам опыта холостого хода осуществляется разделение потерь?
5. Почему перед выполнением опыта короткого замыкания необходимо понижать напряжение?
6. Пояснить назначение и порядок выполнения опыта короткого замыкания асинхронной машины.
7. Почему при расчете параметров короткого замыкания не требуется разделения потерь?
8. Чем схема замещения асинхронной машины отличается от схемы замещения трансформатора?
9. Пояснить, какие элементы асинхронной машины представлены на схеме замещения в виде сопротивлений?
10. Почему асинхронные двигатели имеют большой пусковой ток? Как его определяют?

## Работа № 4

### Исследование механических и рабочих характеристик асинхронного электродвигателя

**Цель работы:** изучить методы расчета и экспериментального исследования механических и рабочих характеристик асинхронных электродвигателей

#### 1. Общие теоретические сведения

*Механические характеристики* представляют собой зависимость частоты вращения ротора АД от вращающего момента:  $n_2 = f(M)$  или зависимость вращающего момента от скольжения:  $M = f(s)$ . Поскольку между частотой вращения ротора и скольжением существует жёсткая зависимость, обе формы записи дают одну и ту же характеристику и от одной из них всегда можно перейти к другой.

Вследствие ряда причин: действия пространственных гармоник магнитного поля, изменения параметров асинхронной машины вследствие эффекта вытеснения тока и других, механические характеристики не имеют достаточно точного аналитического описания при пуске и больших скольжениях, превышающих критическое значение.

На практике они строятся по *каталожным данным*, которые приводятся в справочной литературе. К ним относятся.

- Номинальная мощность двигателя.
- Номинальная частота вращения (или синхронная частота вращения и номинальное скольжение). Частота вращения, выраженная в радианах ( $\omega$ ), и частота вращения, выраженная в оборотах в минуту ( $n$ ), связаны между собой отношением:

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \approx 0,105n .$$

- Относительные значения (кратности) максимального ( $\mu_{\max}$ ), минимального ( $\mu_{\min}$ ), и пускового ( $\mu_{\text{пуск}}$ ) моментов.
- Критическое скольжение. При отсутствии данных о критическом скольжении оно принимается равным:  $s_{\text{кр}} = (4 - 5)s_{\text{ном}}$ , или определяется по формуле:

$$s_{кр} = s_{ном} \left( \mu_{max} + \sqrt{\mu_{max}^2 - 1} \right). \quad (1.1)$$

Момент асинхронных двигателей пропорционален квадрату приложенного напряжения, поэтому при расчете механической характеристики по каталожным данным необходимо учитывать возможные отклонения напряжения от номинального значения. С учетом его относительно значения, которое равно  $\frac{U_1}{U_{ном}}$ , определяются следующие точки.

- Точка 1 – режим идеального холостого хода: частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора, машина не развивает вращающего момента:  $n_2 = n_1$ ;  $M = 0$ .
- Точка 2 – режим работы с номинальной нагрузкой при номинальной частоте вращения:

$$n_2 = n_{2ном} = n_1(1 - s_{ном}); \quad (1.2)$$

$$M = \left( \frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 M_{ном} = \left( \frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 \left( \frac{P_{2ном}}{0,105 n_{2ном}} \right). \quad (1.3)$$

- Точка 3 – режим, при котором электродвигатель развивает максимальный вращающий момент:

$$n_2 = n_1(1 - s_{кр}); \quad M = M_{max} = \left( \frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 \mu_{max} M_{ном}. \quad (1.4)$$

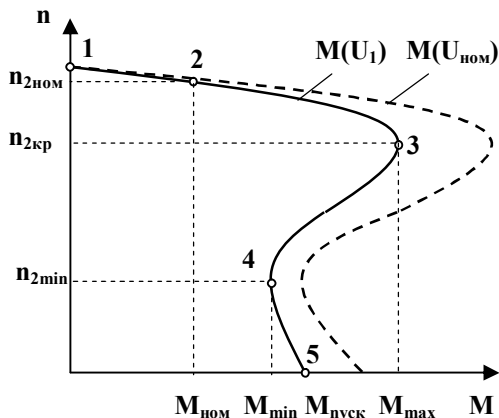
- Точка 4 – соответствует провалу в механической характеристике (минимальному моменту):

$$n_2 \approx 0,2n_1; \quad M = M_{min} = \left( \frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 \mu_{min} M_{ном}. \quad (1.5)$$

- Точка 5 – соответствует моменту пуска:

$$n_2 = 0; \quad M = M_{пуск} = \left( \frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 \mu_{пуск} M_{ном}. \quad (1.6)$$

Полученная таким образом механическая характеристика показана на рис. 1.1.



**Рисунок 1.1** – Построение механической характеристики асинхронного двигателя по каталожным данным

*Рабочими характеристиками* называются зависимости частоты вращения ротора, вращающего момента, тока статора, КПД и коэффициента мощности двигателя от мощности на валу:

$$n_2 = f(P_2); M = f(P_2); I_1 = f(P_2); \eta = f(P_2); \cos \varphi = f(P_2).$$

Механическая мощность определяется произведением вращающего момента на частоту вращения:

$$P_2 = M\omega_2 = 0,105Mn_2,$$

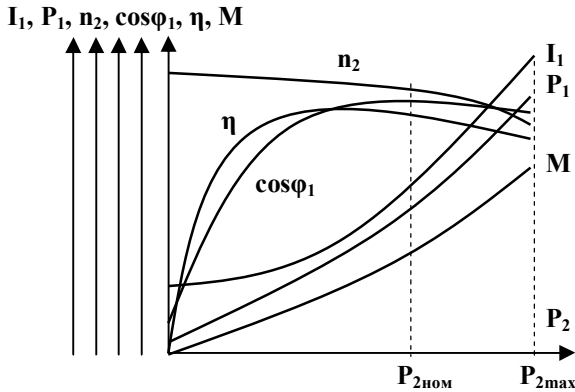
и при уменьшении частоты вращения изменяется быстрее момента, достигая максимума, равного:

$$P_{2\max} = \frac{3U_1^2}{2C_1 \left( r'_k + \sqrt{r_k'^2 + x_k'^2} \right)}, \quad (1.7)$$

где  $r'_k$ ,  $x'_k$  – активная и реактивная составляющие сопротивления короткого замыкания,  $C_1$  – комплексный множитель перехода от Т-образной к Г-образной схеме замещения, равный:

$$C_1 \approx 1 + \frac{z_1}{z_\mu} = 1 + \frac{\sqrt{r_1^2 + x_1^2}}{z_\mu}. \quad (1.8)$$

Рабочие характеристики имеют смысл только в том случае, если двигатель работает устойчиво, то есть при изменении механической мощности в пределах:  $P_2 = 0 - P_{2max} \approx 0 - (1,3 - 1,5)P_{2ном}$ . Их типичный вид показан на рис. 1.2.



**Рисунок 1.2** – Типичный вид рабочих характеристик асинхронных электродвигателей

*Частота вращения ротора* при переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки незначительно уменьшается практически по линейной зависимости и только при перегрузках начинает снижаться более заметно (на 20 ...30%).

*Вращающий момент* связан с полезной мощностью и частотой вращения известным соотношением:

$$P_2 = \omega M; \quad M = \frac{P_2}{0,105n_2} \quad (1.9)$$

и вследствие уменьшения частоты вращения возрастает в слабо выраженной нелинейной зависимости.

*Ток статора* имеет довольно большое начальное значение вследствие наличия воздушного зазора между статором и ротором и определенного насыщения магнитной системы. При экспериментальных исследованиях следует вычислять его среднее значение:

$$I_1 = \frac{I_{1A} + I_{1B} + I_{1C}}{3}.$$

КПД, равный  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ , связан с полезной мощностью типовой

для всех электрических машин зависимостью, его максимальное значение обычно соответствует нагрузке  $0,5 \dots 0,7 P_{2ном}$

Коэффициент мощности определяется отношением активной мощности, потребляемой двигателем из сети к полной мощности:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_{1A} + P_{1B} + P_{1C}}{3U_1 I_1} \quad (1.10)$$

и вначале плавно возрастает, достигая максимума примерно при номинальной нагрузке, а затем медленно уменьшается.

## 2. Методика экспериментальных исследований

Нагрузка на асинхронный двигатель создаётся с помощью нагрузочной машины постоянного тока МПТ-1, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением (рисунок 1.3).

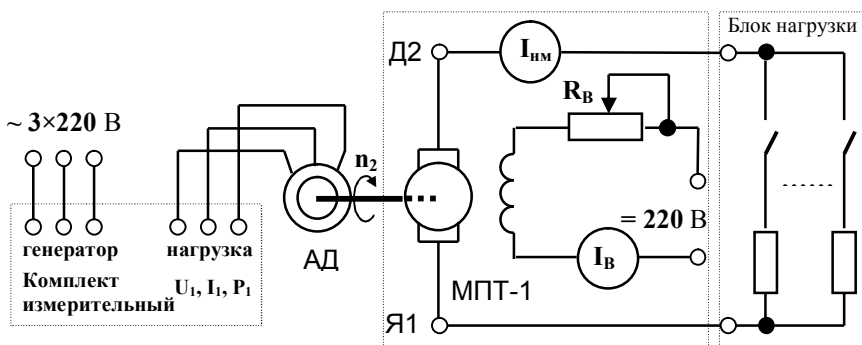


Рисунок 1.3 – Схема экспериментальной установки для исследования механических и рабочих характеристик АД

Вращающий момент на общем валу АД и МПТ-1 при неизменном токе возбуждения  $I_B$  определяется по формуле:

$$M = C_M (I_0 + I_{нм}) = \frac{U_{ном} - I_{ном} R_a}{0,105 n_{ном}} \times (I_0 + I_{нм}), \quad (1.11)$$

где  $U_{ном}$ ,  $I_{ном}$ ,  $n_{ном}$  - номинальные значения напряжения, тока и частота вращения МПТ-1.

Ток холостого хода  $I_0$  определяется по тарировочной кривой, которую снимают при проведении опыта холостого хода нагрузочной машины. Эти данные следует получить у преподавателя. Сопротивление якоря замеряется непосредственно или определяется по формуле:

$$R_a \approx 0,5(1 - \eta) \frac{U_{ном}}{I_{ном}}. \quad (1.12)$$

Ток якоря нагрузочной машины  $I_{нм}$  измеряется непосредственно амперметром. Частота вращения контролируется тахометром.

### 3. Указания по выполнению работы

- 3.1. Записать паспортные данные исследуемой асинхронной машины и нагрузочной машины постоянного тока МПТ-1. По паспортным данным нагрузочной машины определить коэффициент пропорциональности между током и моментом  $C_M$ .
- 3.2. По формулам 1.1 – 1.6 рассчитать контрольные точки механической характеристики исследуемой машины, и по формуле 1.7 определить ее максимальную мощность (необходимые для расчета данные взять из предыдущей работы).
- 3.3. Подготовить таблицу для записи показаний приборов и расчётных параметров по следующей форме:

$n_2$ , об/мин					
$I_0$ , А					
$I_{нм}$ , А					
$M = C_M(I_0 + I_{нм})$ , Нм					
$P_2 = 0,105n_2 M$ , Вт					
$I_1$ , А					
$P_1 = P_{1A} + P_{1B} + P_{1C}$ , Вт					
$S_1 = 3U_1 I_1$					
$\eta = \frac{P_2}{P_1}$					
$\cos\phi_1$					

- 3.4. Собрать и представить на проверку схему экспериментальной установки (рис. 1.3.) Включить стенд. Установить номинальный ток возбуждения машины постоянного тока, проверить работу всех элементов схемы.
- 3.5. Последовательно увеличивая нагрузку, записывать показания приборов ( $n_2$ ,  $I_{нм}$ ,  $U_1$ ,  $I_{1A}$ ,  $I_{1B}$ ,  $I_{1C}$ ,  $P_{1A}$ ,  $P_{1B}$ ,  $P_{1C}$ ,  $U_1$ ). Ток холостого хода нагрузочной машины для соответствующих частот вращения определить по тарировочной кривой.
- 3.6. Рассчитать и внести в таблицу значения момента, мощности  $P_2$ ,  $S_1$ , КПД и коэффициента мощности  $\cos\phi_1$ . Построить механические и рабочие характеристики исследуемого двигателя. Проверить их соответствие контрольным точкам.
- 3.7. Сделать выводы. Оформить отчёт о работе.

### Контрольные вопросы

1. Что такое механические характеристики асинхронного двигателя? Дать их общий анализ.
2. Каким образом можно рассчитать механическую характеристику по каталожным данным? Привести пример.
3. Что такое рабочие характеристики асинхронного двигателя? Дать их общий анализ.
4. Почему рабочие характеристики имеют смысл только в пределах максимальной мощности АД?
5. Какие данные, необходимые для расчета механических и рабочих характеристиках приводятся на щитке электродвигателя и в каталожных данных?
6. Для чего в экспериментальной установке нужна машина постоянного тока? Пояснить методику проведения экспериментальных исследований.
7. Каким образом при экспериментальных исследованиях определяются развиваемый АД момент и мощность на валу?
8. Почему рабочие характеристики имеют смысл только в пределах максимальной мощности АД?

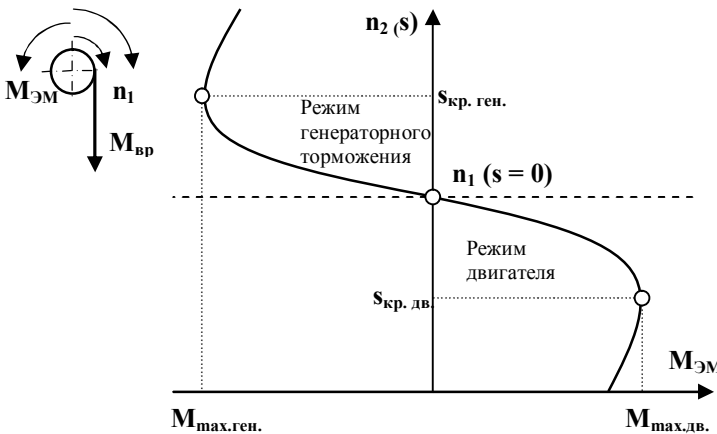
## Работа № 5

### Исследование генераторных режимов работы асинхронной машины с короткозамкнутым ротором

**Цель работы:** исследовать характеристики асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в генераторных режимах работы

#### 1. Основные теоретические сведения

*Режим генераторного (рекуперативного) торможения.* Чтобы перевести включенную в сеть асинхронную машину в режим генераторного торможения, ее ротор необходимо привести во вращение с частотой вращения, превышающей синхронную частоту вращения  $n_1$ . При этом:  $n_2 > n_1$ ;  $0 > s > -\infty$ , а направление развиваемого ею момента противоположно направлению вращения ротора (рис. 1.1).



**Рисунок 1.1** – Механическая характеристика и перевод асинхронной машины в режим генераторного торможения

Асинхронные генераторы вырабатывают только активную мощность, а необходимую для создания магнитного потока реактивную мощность потребляют из сети. Практическое значение этого режима, который находит применение в грузоподъемных механизмах, электрической тяге, при обкатке автотракторных двигателей, и других случаях, заключается в рекуперации (возврате) энергии вращающегося под воздействием внешнего момента ротора в сеть.

В общем уравнении электромагнитного момента скольжение в генераторном режиме необходимо брать со знаком «минус»:

$$M_{\text{ЭМ}} = - \frac{3U_1^2 r'_2}{\omega_1 s \left( \left( r_1 - C_1 \frac{r'_2}{s} \right)^2 + x'_{\text{к}}{}^2 \right)}. \quad (1.1)$$

Из неравенства:  $\left| r_1 + C_1 \frac{r'_2}{s} \right| > \left| r_1 - C_1 \frac{r'_2}{s} \right|$  следует, что при:  $|s_{\text{дв}}| = |s_{\text{ген}}|$  в генераторном режиме работы момент всегда больше, чем в двигательном:  $|M_{\text{ген}}| > |M_{\text{дв}}|$ .

Зоне устойчивой работы соответствуют следующие пределы изменения скольжения и момента:

$$|s_{\text{кр}}| > |s| > 0; |M_{\text{max.ген}}| > |M_{\text{ЭМ}}| > 0.$$

В режиме генераторного торможения АМ потребляет механическую мощность, равную произведению момента на частоту вращения:

$$P_2 = M_{\text{ЭМ}} \omega_2 = 0,105 n_2 M_{\text{ЭМ}} \quad (1.2)$$

*Электромеханические* (скоростные) характеристики, представляют собой зависимость приведенного тока ротора от скольжения:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left( r_1 - C_1 \frac{r'_2}{s} \right)^2 + x'_{\text{к}}{}^2}}. \quad (1.3)$$

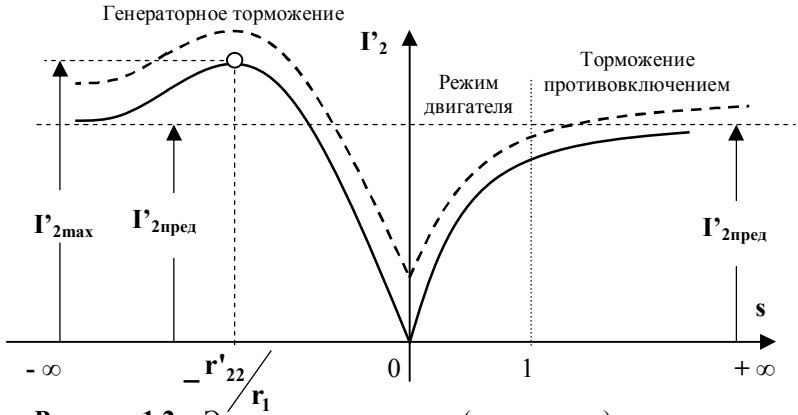
При:  $\left( r_1 - \frac{r'_2}{s} \right) = 0$ ,  $s = -r'_2 / r_1$  ток ротора достигает максимума:

$$I'_{2\text{max}} = \frac{U_1}{x'_{\text{к}}}, \quad (1.4)$$

а при  $s \Rightarrow \pm\infty$  стремится к пределу:

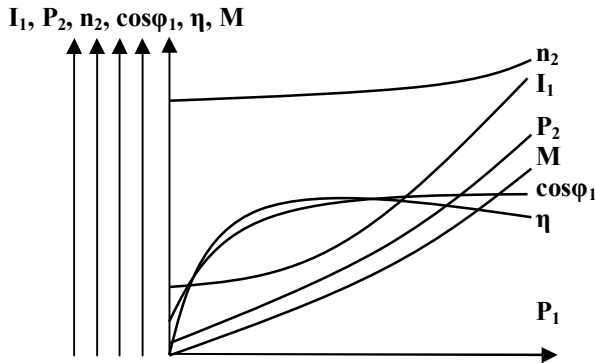
$$I'_{2\text{пред}} = \frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + x'_{\text{к}}{}^2}}. \quad (1.5)$$

Общий вид зависимостей  $I'_2 = f(s)$  в различных режимах работы приведен на рис. 1.2. Пунктиром показан ток в обмотке статора, равный геометрической сумме приведенного тока ротора и тока холостого хода. Сопротивления  $x'_k$  и  $\sqrt{r_1'^2 + x_k'^2}$  очень малы, поэтому токи  $I'_{2пред}$  и  $I'_{2max}$  превышают пусковой ток АД.



**Рисунок 1.2** – Электромеханические (скоростные) характеристики асинхронной машины в различных режимах работы

Рабочие характеристики  $n_2 = f(P_1)$ ;  $M = f(P_1)$ ;  $I_1 = f(P_1)$ ;  $\eta = f(P_1)$ ;  $\cos \phi = f(P_1)$  в генераторном режиме работы АМ, примерный вид которых дан на рис. 1.3, строятся в функции сообщаемой в сеть мощности  $P_1$ .

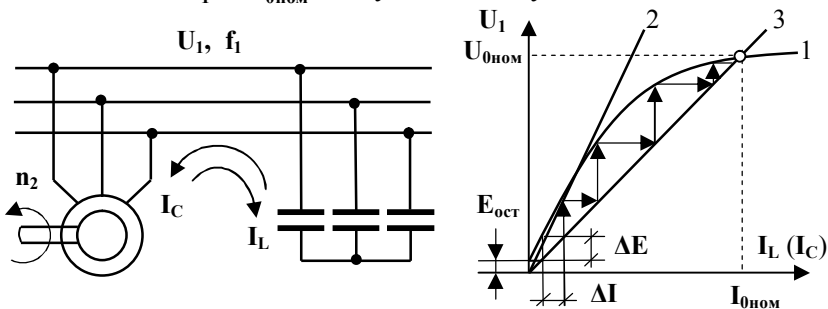


**Рисунок 1.3** – Типичный вид рабочих характеристик асинхронной машины в режиме генераторного торможения

Принцип действия асинхронных генераторов с самовозбуждением основан на явлении остаточного магнетизма.

При вращении ротора внешним приводом остаточный магнитный поток  $\Phi_{ост}$  наводит в обмотках статора небольшую остаточную ЭДС  $E_{ост}$ . Для получения тока намагничивания, обеспечивающего увеличение ЭДС до требуемого уровня, к выводам обмотки статора подключаются конденсаторы (рис. 1.4 – а).

На рис. 1.4 – б изображены: характеристика холостого хода асинхронной машины **1** и вольт-амперные характеристики конденсаторов **2** и **3**. Характеристика **2** совпадает с линейной частью характеристики холостого хода, и соответствует критическому значению емкости, при котором процесс самовозбуждения будет неустойчив. С увеличением емкости наклон характеристики увеличивается, и приращение ЭДС идет быстрее, чем приращение напряжения на конденсаторах. Процесс самовозбуждения заключается в следующем. Под действием  $E_{ост}$  в контуре, образованном обмоткой статора и конденсаторами, возникает ток, величина которого зависит от емкости конденсаторов. Этот ток, протекая по обмотке статора, индуцирует приращение ЭДС  $\Delta E$ , которое в свою очередь вызывает приращение тока  $\Delta I$ . Процесс идет до тех пор, пока ЭДС и напряжение на конденсаторах не сравняются, чему соответствует точка пересечения характеристик. В этой точке ЭДС должна равняться желаемому напряжению холостого хода  $E_1 = U_{0ном}$ , чему соответствует ток  $I_{0ном}$ .



**Рисунок 1.4** – Схема (а) и вольт-амперные характеристики (б) автономного асинхронного генератора с самовозбуждением

Емкость, необходимая для нормального самовозбуждения, определяется исходя из условий:

$$I_{0ном} = I_L = I_C; U_{0ном} = I_L x_L = I_L (x_1 + x_\mu) = I_C x_C = I_C \frac{1}{\omega_1 C};$$

$$C = \frac{1}{\omega_1(x_1 + x_\mu)} = \frac{1}{\omega_1^2 L_1} = \frac{1}{(2\pi f_1)^2 L_1}, \quad (1.6)$$

где  $(x_1 + x_\mu)$ ,  $L_1$  – полное индуктивное сопротивление и полная индуктивность асинхронной машины в режиме холостого хода;  $f_1$  – частота генерируемой ЭДС.

Увеличение ёмкости сверх этого значения приводит к насыщению магнитной системы, резкому возрастанию тока и потерь холостого хода. Частота вращения ротора связана с частотой  $f_1$ , числом пар полюсов  $p$ , и скольжением зависимостью:

$$\omega_2 = \omega_1(1 - s) = \frac{2\pi f_1}{p}(1 - s), \quad (1.7)$$

откуда следует, что постоянство частоты  $f_1 = \text{const}$  обеспечивается только если:  $\omega_2 / (1 - s) = \text{const}$ . Однако, если скольжение изменяется в малых пределах, практически:  $\omega_2 \approx \omega_1$ , и при достаточной мощности первичного привода изменения частоты  $f_1$  будут незначительны.

Асинхронные генераторы с самовозбуждением находят применение в качестве автономных источников питания, сварочных генераторов и некоторых других случаях.

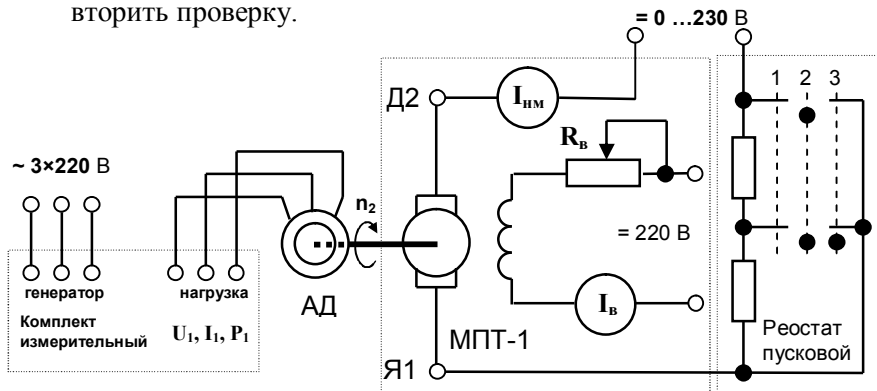
## 2. Исследование асинхронной машины в режиме генераторного торможения

В качестве первичного привода исследуемой асинхронной машины используется машина постоянного тока МПТ-1, которая позволяет регулировать частоту вращения вала АМ путем изменения подводимого к обмотке якоря постоянного напряжения.

Для подготовки стенда к работе необходимо.

- Установить переключатель пускового реостата в крайнее левое положение (максимальное сопротивление).
- Установить рукоятку регулятора тока возбуждения МПТ-1 в крайнее правое положение (максимальный ток возбуждения).
- Установить с помощью фазорегулятора минимальное значение регулируемого постоянного напряжения.

- Включив источник постоянного тока проверить наличие тока в цепи возбуждения нагрузочной машины.
- Собрать схему, показанную на рис. 5.
- **Важно!** Не подключая АМ к источнику питания, произвести пробный пуск МПТ-1 и определить направление её вращения.
- Подключить к сети АМ и произвести её пробный пуск.
- **Важно!** Не подключая питание МПТ-1 определить направление вращения ротора АМ. Направление вращения обеих машин должно быть одинаковым. В противном случае необходимо изменить порядок чередования фаз при подключении АМ и повторить проверку.



**Рисунок 1. 5** – Схема экспериментальной установки для исследования асинхронной машины в режиме генераторного торможения

### Порядок выполнения исследований

- 2.1. Рассчитать, используя данные предыдущих работ и формулы (1.4), (1.5) значения максимального и предельного токов ротора.
- 2.2. По паспортным данным МПТ-1 определить коэффициент пропорциональности между током и моментом  $C_M$  (можно воспользоваться его значением, рассчитанным в предыдущей работе). В режиме двигателя МПТ-1 не отдает, а потребляет мощность из сети постоянного тока, ток в цепи якоря изменяет знак, и момент на общем валу рассчитывается по формуле:

$$M_{ЭМ} = C_M (I_0 - I_{нм}). \quad (2.1)$$

2.3. Подготовить таблицу для записи показаний приборов и расчётных параметров.

$n_2, \text{ об/мин}$					
$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$					
$I_0, \text{ А}$					
$I_{\text{HM}}, \text{ А}$					
$M = C_M (I_0 - I_{\text{HM}}), \text{ Нм}$					
$P_2 = 0,105n_2 M, \text{ Вт}$					
$I_1 = \frac{1}{3}(I_{1A} + I_{1B} + I_{1C}), \text{ А}$					
$P_1 = P_{1A} + P_{1B} + P_{1C}, \text{ Вт}$					
$S_1 = 3U_{1\phi} I_1, \text{ ВА}$					
$\eta = \frac{P_1}{P_2}$					

2.4. Включить установку, и постепенно увеличивая частоту вращения вала АМ, произвести необходимые замеры.

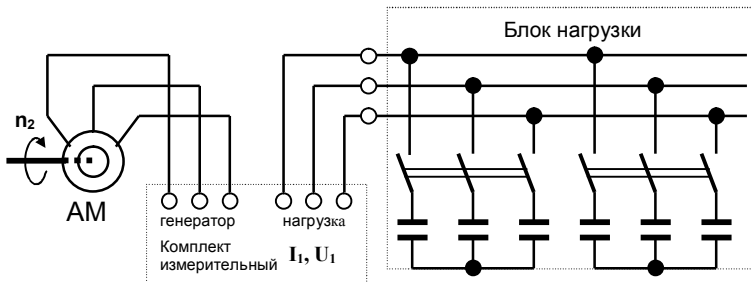
- При минимальном напряжении в цепи питания МПТ-1 асинхронная машина работает в режиме двигателя, и потребляет из сети активную мощность (мощность положительна, частота вращения меньше синхронной частоты вращения)
- В режиме идеального холостого хода частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора, ток имеет минимальное значение, момент равен нулю, но мощность имеет положительное значение (потери в обмотке статора).
- В генераторном режиме частота вращения превышает синхронную частоту, активная мощность изменяет знак, ток возрастает. Замеры производить до тех пор, пока генерируемая в сеть активная мощность не достигнет номинальной мощности АМ.

2.5. Произвести необходимые расчеты. По полученным данным построить характеристики  $n_2 = f(P_1)$ ;  $M = f(P_1)$ ;  $I_1 = f(P_1)$ ;  $\eta = f(P_1)$ ;  $\cos \varphi = f(P_1)$ . Сделать выводы.

### 3. Исследования асинхронного генератора с самовозбуждением

Привод исследуемой асинхронной машины, как и при исследовании в режиме генераторного торможения, осуществляется с помощью МПТ-1, схема подключения которой остается неизменной.

Асинхронную машину необходимо отключить от сети, и подключить к выводам обмотки статора конденсаторы (рис.1.6).



**Рисунок 1.6** – Схема установки для исследования асинхронного генератора с самовозбуждением

Подготовку МПТ-1 к включению осуществлять таким же образом, как при исследовании режима генераторного торможения АМ.

#### Порядок выполнения исследований

- 3.1 Используя данные из предыдущих работ и формулу (1.6), определить требуемое значение ёмкости.
- 3.2 Подготовить таблицу для записи показаний приборов.

Ёмкость, мкФ					
$I_1$ , А					
$U_1$ , В					

- 3.3. Не подключая вначале конденсаторов, произвести пуск установки и регулируя подводимое к якору напряжение установить синхронную частоту вращения ротора АМ.
- 3.3. Постепенно подключая конденсаторы и поддерживая неизменной частоту вращения ротора, убедиться в том, что асинхронный генератор нормально возбуждается.
- 3.4. Замерить токи и напряжения при различных значениях ёмкости (начинать следует с максимальных величин). Определить оптимальное и критическое значения ёмкости.
- 3.4. По полученным данным построить кривую намагничивания, подобную показанной на рис. 1.4.
- 3.5. Сделать выводы. Оформить отчет.

### Контрольные вопросы

1. При каких условиях асинхронная машина переходит в режим генераторного торможения?
2. Какую мощность АМ генерирует в сеть? Какую потребляет из сети?
3. Как найти максимальное и предельное значения тока ротора? Чем они опасны?
4. Что представляют собой рабочие характеристики асинхронного генератора в режиме рекуперативного торможения?
5. Пояснить методику экспериментальных исследований АМ в режиме генераторного торможения.
6. Пояснить процесс самовозбуждения асинхронного генератора. При каком условии он неустойчив?
7. Как определяется значение ёмкости, необходимое для нормального самовозбуждения?
8. От чего зависит частота ЭДС, генерируемой асинхронным генератором с самовозбуждением?
9. Пояснить методику экспериментальных исследований АМ в режиме генератора с самовозбуждением.

## Работа № 6

### Исследование трехфазного асинхронного электродвигателя в режимах однофазного питания

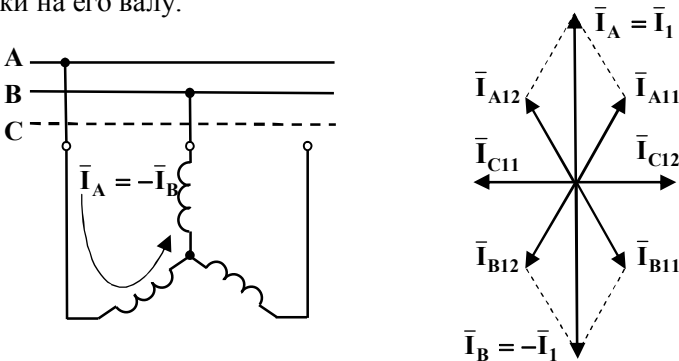
**Цель работы:** изучить характеристики трехфазных асинхронных электродвигателей при потере фазы питающего напряжения и при включении их в однофазную сеть

#### 1. Общие теоретические положения

*Режимы однофазного питания* трехфазных асинхронных двигателей (АД) разделяются на два вида: режимы, возникающие при непреднамеренной потере одной из фаз питающего напряжения, и режимы включения трехфазных двигателей в однофазную сеть при отсутствии трехфазной сети.

*Режимы неполнофазного питания.* Такие режимы являются аварийными, но в некоторых случаях рассматриваются как рабочие. Так, если остановка привода приводит к недопустимому нарушению технологического процесса и порче продукции, необходимо, чтобы двигатель продолжал какое-то время устойчиво работать и после потери фазы, хотя бы и с ухудшенными показателями.

Происходящие при этом процессы зависят от того, когда произошла потеря фазы: до или после подключения двигателя, а также от нагрузки на его валу.



**Рисунок 1.1** – Исходная расчетная схема (а) и векторная диаграмма токов (б) трехфазного двигателя при потере фазы питающего напряжения

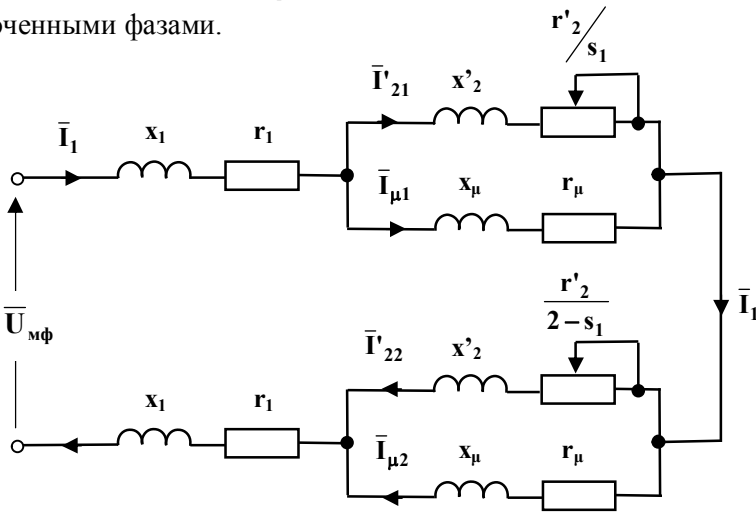
На рис. 1.1 – а приведена расчетная схема, в соответствии с которой полные токи в обмотке статора после потери фазы равны:

$$\bar{I}_A = -\bar{I}_B = \bar{I}_1; \quad \bar{I}_C = 0, \quad (1.1)$$

Симметричные составляющие прямой и обратной последовательностей равны между собой по модулю, меньше модулей полных токов в  $\sqrt{3}$  раз, и сдвинуты от них по фазе на  $\pm 30^\circ$  (векторная диаграмма на рис. 1.1 - б):

$$\begin{cases} \bar{I}_{A11} = \frac{1}{3} \left( \frac{3}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \bar{I}_1 = \frac{\bar{I}_1}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ} \\ \bar{I}_{A12} = \frac{1}{3} \left( \frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \bar{I}_1 = \frac{\bar{I}_1}{\sqrt{3}} e^{j30^\circ} \end{cases} \quad (1.2)$$

Схема замещения АД при потере фазы показана на рис. 1.2. Верхняя ее часть относится к прямой последовательности, а нижняя – к обратной. Напряжение  $\bar{U}_{мф}$  представляет собой напряжение между подключенными фазами.



**Рисунок 1.2** – Схема замещения трехфазного двигателя при потере фазы питающего напряжения

С помощью этой схемы определяются ток в подключенных обмотках статора при неподвижном роторе и ток при холостом ходе.

При неподвижном роторе ( $s_1 = 1$ ) полные сопротивления прямой и обратной последовательностей равны между собой:

$\bar{z}'_{21} = \bar{z}'_{22} = \bar{z}'_{\kappa}$ , и по включенным обмоткам статора протекает ток, равный  $\frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,866$  пускового тока в симметричном режиме:

$$\bar{I}_{1\kappa} = \frac{\bar{U}_{\text{мф}}}{2 \left( \bar{z}_1 + \frac{\bar{z}_{\mu} \bar{z}'_{\kappa}}{\bar{z}_{\mu} + \bar{z}_{\kappa}} \right)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\bar{U}_1}{\bar{z}_1 + \frac{\bar{z}_{\mu} \bar{z}'_{\kappa}}{\bar{z}_{\mu} + \bar{z}_{\kappa}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{I}_{1\kappa(s)}, \quad (1.3)$$

где  $\bar{U}_1$  и  $\bar{I}_{\kappa(s)}$  – фазное напряжение и пусковой ток в симметричном трехфазном режиме.

Такой режим приводит к интенсивному нагреву и недопустим, поэтому двигатель должен быть отключен от сети.

Если до потери фазы двигатель работал в режиме холостого хода ( $s_1 \Rightarrow 0$ ):  $\frac{r'_2}{s_1} \Rightarrow \infty$ ;  $z'_{21} \gg z_{\mu}$ ;  $z_{\mu} \gg \bar{z}'_{22} \approx \frac{r'_2}{2} + jx'_2$ , полное входное сопротивление схемы замещения и ток в подключенных обмотках статора определяются по формулам:

$$\bar{z}_{1\text{вх}} + \bar{z}_{2\text{вх}} \approx 2\bar{z}_1 + \bar{z}_{\mu} + \bar{z}'_{22}; \quad \bar{I}_{1\text{хх}} \approx \frac{\sqrt{3}\bar{U}_1}{\bar{z}_1 + \bar{z}_{\mu} + (\bar{z}_1 + \bar{z}'_{22})}, \quad (1.4)$$

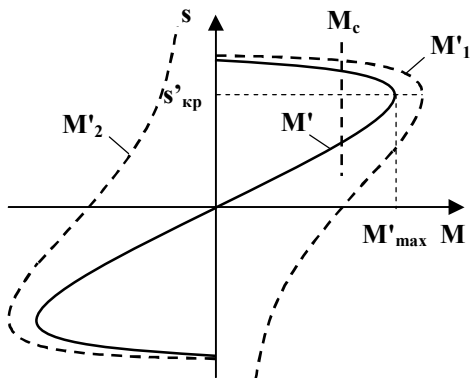
Поскольку  $z_{\mu} \gg z_1 + z'_{22}$ , модуль тока  $\bar{I}_{1\text{хх}}$  примерно в  $\sqrt{3}$  раз больше тока холостого хода в симметричном режиме:

$$\bar{I}_{1\text{хх}(s)} \approx \frac{\bar{U}_1}{\bar{z}_1 + \bar{z}_{\mu}}.$$

Механические характеристики, образованные системами прямой и обратной последовательностей, являются зеркальным отражением друг друга, а результирующая характеристика определяется их алгебраической суммой (рис. 1.3). Ее особенностью является отсутствие пускового момента.

Из этого следует, что в том случае, когда фаза была потеряна до включения двигателя, он не запустится, и будет потреблять из сети пусковой ток, что недопустимо.

**Рисунок 1.3** – Зависимости, прямого, обратного и результирующего моментов от скольжения в неполнофазном режиме



При вращающемся роторе скольжения прямой и обратной последовательностей различны:

$$s_1 \neq s_2; s_2 = 2 - s_1,$$

в результате чего различаются частоты прямой и обратной последовательностей, индуктивные сопротивления, токи ротора, и амплитуды намагничивающих сил:

$$f_{22} = s_2 f_1 \neq f_{21} = s_1 f_1; x_{21} = 2\pi f_{21} L \neq x_{22} = 2\pi f_{22} L; I_{21} \neq I_{22}.$$

При вращении ротора в прямом направлении:  $F_{m1} > F_{m2}$ .

Наибольшее значение имеет рабочий участок характеристик при скольжениях  $s_1$ , находящихся в пределах  $s'_{кр} > s_1 > 0$  и моментах, не превышающих максимального значения:  $M' < M'_{max}$  (штрихи указывают на то, что эти параметры отнесены к неполнофазному режиму).

Для анализа основных характеристик АД при потере фазы питающего напряжения сопоставляем получаемые при этом основные параметры с параметрами, имевшими место до потери фазы.

Критическое скольжение и максимальный момент в неполнофазных режимах определяются по формулам:

$$s'_{кр} \approx \frac{C'_1 r'_2}{2\sqrt{r_1^2 + x'^2_{к}}}, \quad (1.5)$$

$$M'_{1max} = \frac{3U_1^2}{4\omega_1 C'_1 \left( r_1 + \sqrt{r_1^2 + x'^2_{к}} \right)}, \quad (1.6)$$

где коэффициент  $C'_1$  для неполнофазных режимов:

$$\bar{C}'_1 = 1 + \frac{2r_1 + j(2x_1 + x'_2)}{r_\mu + jx_\mu} = \bar{C}_1 + \frac{r_1 + j(x_1 + x'_2)}{r_\mu + jx_\mu}. \quad (1.7)$$

Отношения критического скольжения и максимального момента прямой последовательности в неполнофазном режиме к критическому скольжению и максимальному моменту в симметричном трехфазном режиме составляют:

$$\mathbf{M}'_{1\max} / \mathbf{M}_{\max} = s'_{\text{кр}} / s_{\text{кр}} = C'_1 / 2C_1. \quad (1.8)$$

Максимальный момент  $\mathbf{M}_{\max}$  в симметричном режиме определяется любым известным методом, например по каталожным данным.

Отношение обратного момента к прямому моменту в неполнофазном режиме равно:

$$\frac{\mathbf{M}'_2}{\mathbf{M}'_1} \approx \frac{s_1}{2-s_1} - \frac{1}{2s_1} \left( \frac{r'_2}{x_\mu + x'_2} \right)^2, \quad (1.9)$$

Поскольку  $x_\mu + x'_2 \gg r'_2$ , величина  $\left( \frac{r'_2}{x_\mu + x'_2} \right)^2 \Rightarrow 0$ , и вторую часть выражения (1.9) на рабочем участке механической характеристики можно не учитывать.

Обратный момент по своей физической природе является тормозным, и результирующий момент определяется разностью прямого и обратного моментов:

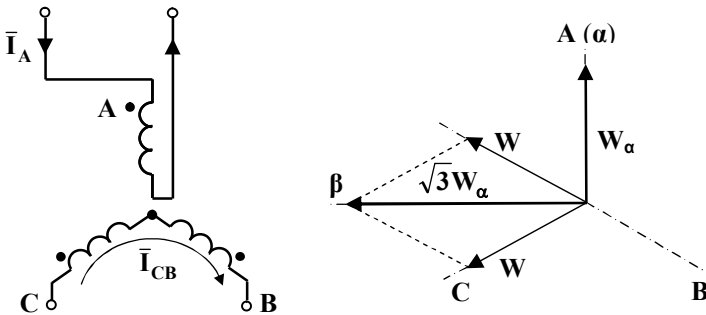
$$\mathbf{M}'_{\text{рез.}} = \mathbf{M}'_1 - \mathbf{M}'_2. \quad (1.10)$$

При любом значении момента сопротивления скольжение в неполнофазных режимах будет больше, чем в симметричном режиме при напряжении  $U_1$ , что приводит к уменьшению полезной мощности и КПД. Устойчивая работа сохраняется только в том случае, если после потери фазы момент сопротивления будет меньше максимального результирующего момента с учетом возможного отклонения междуфазного напряжения от номинального значения. Практически это означает, что нормированная кратность максимального момента должна быть не менее  $\mu_{\max} \leq 2,2 - 2,3$ .

*Трехфазные двигатели при включении в однофазную сеть.* При отсутствии трехфазной сети трехфазные двигатели могут использоваться в однофазном режиме. Для улучшения их характеристик используются различные схемы подключения конденсаторов, которые обеспечивают пуск, позволяют получить вращающееся поле, близкое к круговому, и хорошие рабочие характеристики.

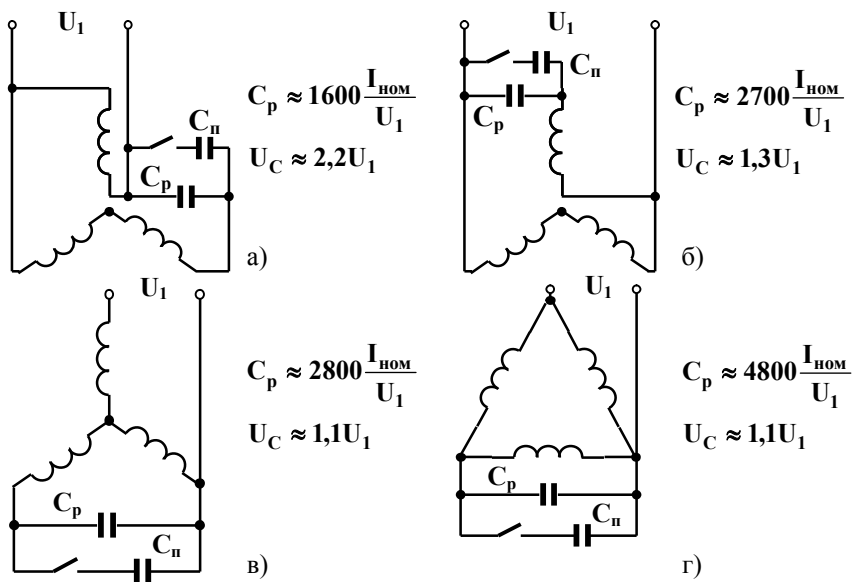
Для этого оси обмоток, создающих МДС, должны быть сдвинуты в пространстве на 90 электрических градусов, а МДС должны быть равны по модулю, и различаться по фазе на 90°.

В трехфазных двигателях оси обмоток смещены между собой в пространстве на ±120 электрических градусов, поэтому две последовательно-встречно соединенные обмотки при протекании по ним тока можно рассматривать, как одну распределенную обмотку с числом витков  $\sqrt{3}W$ , ось которой  $\beta$  смещена в пространстве по отношению к оси  $A$  ( $\alpha$ ) на 90 электрических градусов (рис. 1.4 - а). Если принять обмотку фазы  $A$  за рабочую, а две других – за конденсаторную фазу, коэффициент трансформации будет равен:  $k = 1/\sqrt{3}$  (рис. 1.4 - б), в противоположном случае:  $k = \sqrt{3}$ .



**Рисунок 1.4** – Электромагнитная схема (а) и векторная диаграмма (б) трехфазной машины в системе двухфазных координат  $\alpha; \beta$

Таким образом, пространственный сдвиг осей обмоток рабочей и конденсаторной фаз в 90 электрических градусов обеспечивается в любой трехфазной машине, а коэффициент трансформации, значения напряжения на конденсаторе и рабочей емкости зависят от схем соединения обмоток и конденсаторов, наиболее распространенные из которых приведены на рис. 1.5.



**Рисунок 1.5** – Схемы включения трехфазных электродвигателей в однофазную сеть и основные расчетные соотношения

Значения рабочих емкостей приведены в микрофарадах, Минимально допустимые значения рабочих напряжений указаны с учетом расчетных значений и необходимого запаса.

Все схемы обеспечивают получение трехфазной системы токов, в которой токи прямой последовательности значительно больше токов обратной последовательности по сравнению с простым однофазным режимом. Расчетные значения емкости и рабочего напряжения конденсаторов в различных схемах неодинаковы. Наибольшую мощность (до 70 – 80%  $P_{\text{ном}}$ ) можно получить при соединении обмоток в треугольник, однако, при этом требуется и наибольшая емкость. Для улучшения пуска, как и в однофазных двигателях, подключаются дополнительные конденсаторы, емкость которых в 2 – 3 раза больше емкости рабочих конденсаторов.

## 2. Методика выполнения работы

2.1. Используя данные, полученные в предыдущих работах рассчитать по формулам 1.3 – 1.8 следующие параметры асинхронного двигателя в неполнофазном режиме при потере фазы:

- ток короткого замыкания в симметричном трехфазном режиме и при потере фазы до пуска АД при неподвижном роторе;
- ток холостого хода в симметричном трехфазном режиме и при потере фазы у работающего АД;
- критическое скольжение и максимальный момент прямой последовательности в неполнофазном режиме.

2.2. Собрать схему для исследования неполнофазных режимов работы АД (рис. 1.6). Установить выключатель в замкнутое положение (включены все три фазы).

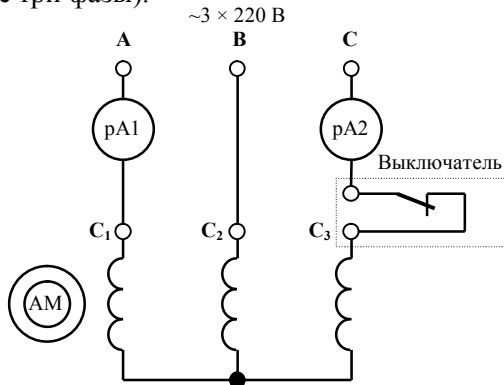
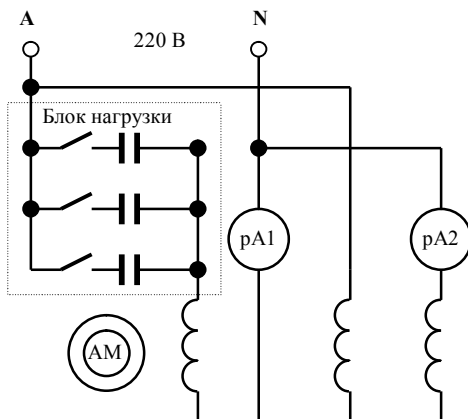


Рисунок 1.6 – Схема установки для исследования неполнофазных режимов работы АД

2.3. Произвести пуск АД в симметричном трехфазном режиме, измерить пусковой ток и ток холостого хода, затем, не отключая АД, осуществить с помощью выключателя обрыв фазы «С», и измерить ток холостого хода в неполнофазном режиме.

2.4. Осуществить кратковременную попытку пуска при обрыве фазы (переключатель в крайнем левом положении) и измерить ток в подключенных обмотках. **Опыт проводить очень быстро!**

2.6. Собрать схему для исследования конденсаторного двигателя (рис. 1.7), рассчитать параметры рабочего и пускового конденсаторов.



**Рисунок 1.7** – Схема установки для исследования конденсаторного АД при включении в однофазную сеть

2.7. Произвести пуск при максимальной емкости, измерить пусковой и установившийся токи в рабочей и конденсаторной фазах.

2.8. Измерить токи в установившемся режиме работы при различных значениях емкости. Сделать выводы.

2.9. Оформит отчет. Ответить на контрольные вопросы.

### Контрольные вопросы

1. Чем принципиально отличаются процессы, происходящие при потере фазы напряжения работающего трехфазного АД и при потере фазы до его включения в сеть?
2. Дать характеристику изменения механической характеристики и основных параметров трехфазного АД при потере фазы питающего напряжения.
3. Чем и почему схема замещения при потере фазы отличается от схемы замещения трехфазного АД?
4. Назвать условия, необходимые для получения кругового вращающегося поля при включении трехфазного АД в однофазную сеть. Для чего в них применяются конденсаторы?
5. Пояснить методику исследования трехфазных АД в режимах однофазного питания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Галишников Ю.П., Сенигов П.Н., Карпеш М.А, Электрические машины. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭМ.001 РБЭ (904). – Челябинск: ООО «Учебная техника», 2005. – 210 с.
2. ГОСТ ИЕС 60034-26-2015. Машины электрические вращающиеся. Часть 26. Влияние несбалансированных напряжений на рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей. М.: Стандартиформ, 2016
3. Кобозев В.А. Электрические машины. Часть 2. Электрические машины переменного тока: учебное пособие / В.А. Кобозев. – Ставрополь: Сервисшкола, 2015. – 200 с.
4. Расчет характеристик трансформаторов и электрических машин. Контрольные вопросы, расчетные задания и методические указания по дисциплине «Электрические машины» для студентов электроэнергетического факультета / составители В.В. Шевченко, Е.Ю. Юрьева, Д.В. Потоцкий / Под ред. проф. В.И. Милых – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015.
5. Торопцев Н.Д. Трехфазные асинхронные двигатели в однофазных сетях. - М.: Энергоатомиздат. 2003. - 128 с.
6. Электронный учебник «Электрические машины» / Кафедра электромеханики Московского энергетического института (технического университета). – 452 с. // [elmech.mpei.ac.ru > em/EM/EM\\_cont\\_ohtm](http://elmech.mpei.ac.ru/em/EM/EM_cont_ohtm)

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Введение .....		3
Общие методические указания .....		4
Работа №1.	Исследование вращающегося магнитного поля и маркировка выводов обмоток электрических машин переменного тока .....	9
Работа № 2.	Включение синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации .....	21
Работа № 3.	Определение параметров асинхронной машины по опытам холостого хода и короткого замыкания .....	29
Работа № 4.	Исследование механических и рабочих характеристик асинхронного электродвигателя .....	36
Работа № 5.	Исследование генераторных режимов работы асинхронной машины с короткозамкнутым ротором .....	43
Работа № 6.	Исследование трехфазного асинхронного электродвигателя в режимах однофазного питания .....	52
Литература .....		61