

**В.Е. АНТРОПОВ, А.П. ВОЛКОВ, Ю.В. ЗУБКОВ**

**АСИНХРОННЫЕ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

**Учебное пособие**

**Самара  
Самарский государственный технический университет  
2024**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

Кафедра «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

В.Е. АНТРОПОВ, А.П. ВОЛКОВ, Ю.В. ЗУБКОВ

# АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*Учебное пособие*

Самара  
Самарский государственный технический университет  
2024

Печатается по решению методического совета электротехнического факультета СамГТУ (протокол № 6 от 05.02.2024 г.).

УДК 621.313.33(075.8)

ББК 31.261.63я73

А 902

**Антропов В.Е.**

**Асинхронные электромеханические источники электрической энергии:** учеб. пособие / *В.Е. Антропов, А.П. Волков, Ю.В. Зубков.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2024. – 55 с.

Содержатся сведения о режимах работы асинхронных машин в качестве источников электрической энергии: генераторов, работающих на сеть и на автономную нагрузку, электромашинного преобразователя частоты, индукционного и фазового регулятора. Приводятся методики проведения экспериментальных исследований асинхронного генератора, индукционного регулятора и асинхронного преобразователя частоты.

Предназначено для студентов бакалавриата направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», обучающихся на электротехническом факультете по дневной и заочной формам обучения.

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор *Ю.А. Макаричев,*  
д-р техн. наук, профессор *А.В. Стариков*

УДК 621.313.33(075.8)

ББК 31.261.63я73

А 902

© В.Е. Антропов, А.П. Волков,  
Ю.В. Зубков, 2024

© Самарский государственный  
технический университет, 2024

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АМ	–	асинхронная машина
АГ	–	асинхронный генератор
АКЗ	–	асинхронная машина с короткозамкнутым ротором
АФР	–	асинхронная машина с фазным ротором
АПЧ	–	асинхронный преобразователь частоты
ДПТ	–	двигатель постоянного тока
ИР	–	индукционный регулятор
ФР	–	фазорегулятор
ИРМ	–	источник реактивной мощности
КУ	–	конденсаторная установка
ПД	–	приводной двигатель

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие предназначено для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», изучающих дисциплины «Специальные электрические машины», «Исследования и испытания электрических машин», «Электромеханические преобразователи в современных технологиях».

В пособии рассмотрена работа асинхронных машин с короткозамкнутым и фазным ротором в качестве источников электрической энергии.

Основная цель пособия заключается в расширении знаний обучающихся в области асинхронных электромеханических преобразователей энергии, их ознакомлении с другими специальными режимами работы асинхронной машины (АМ) помимо основного двигательного.

В теоретической части пособия рассматриваются устройство, принцип работы и основные характеристики индукционного регулятора, фазорегулятора, асинхронного генератора, преобразователя частоты.

Второй раздел посвящен вопросам практического исследования специальных режимов работы асинхронных электромеханических преобразователей – лабораторным занятиям по изучению их эксплуатационных параметров и характеристик.

Авторы надеются, что освоение материала пособия поможет студентам узнать новые свойства и возможности асинхронных машин в качестве источников электрической энергии, расширит их представления о назначении и области применения этих машин.

## ВВЕДЕНИЕ

Традиционно асинхронная машина применяется в качестве электрического двигателя. Однако практический интерес представляют и другие приложения этих электрических машин. Так, в режиме генератора сохраняются все положительные свойства асинхронных машин с короткозамкнутым ротором, и в первую очередь их высокая надежность, а простота синхронизации АГ с сетью и значительно меньшая стоимость по сравнению с синхронными генераторами позволяет рассматривать АГ как альтернативный источник электрической энергии.

Асинхронная машина может работать в режиме автономного АГ, когда ее генерируемая мощность сопоставима с мощностью потребителей, получающих электропитание от АГ. При отсутствии электрической сети функцию намагничивания машины (источника реактивной мощности) обычно выполняют конденсаторные установки [1, 2, 4, 5] или вентильные источники реактивной мощности [3].

Асинхронная машина работает генератором, когда частота вращения ротора  $n_2$  больше частоты вращения магнитного поля  $n_1$ . Отдавая в сеть активную мощность, АГ потребляет из сети реактивную мощность на создание магнитного поля в машине. Намагничивающий ток асинхронных машин составляет от 25 % и выше от номинального тока, а потребляемая реактивная мощность может достигать до 45 % от номинальной мощности машины [6], что является существенным недостатком АГ.

Асинхронная машина с фазным ротором также может выполнять задачи генерации активной мощности. В то же время особенности конструкции АФР – наличие контактных колец и щеточного аппарата – позволяют использовать АФР в качестве источника переменного напряжения с плавным регулированием его величины и фазы и асинхронного преобразователя частоты.

# 1. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН

## 1.1. ИНДУКЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

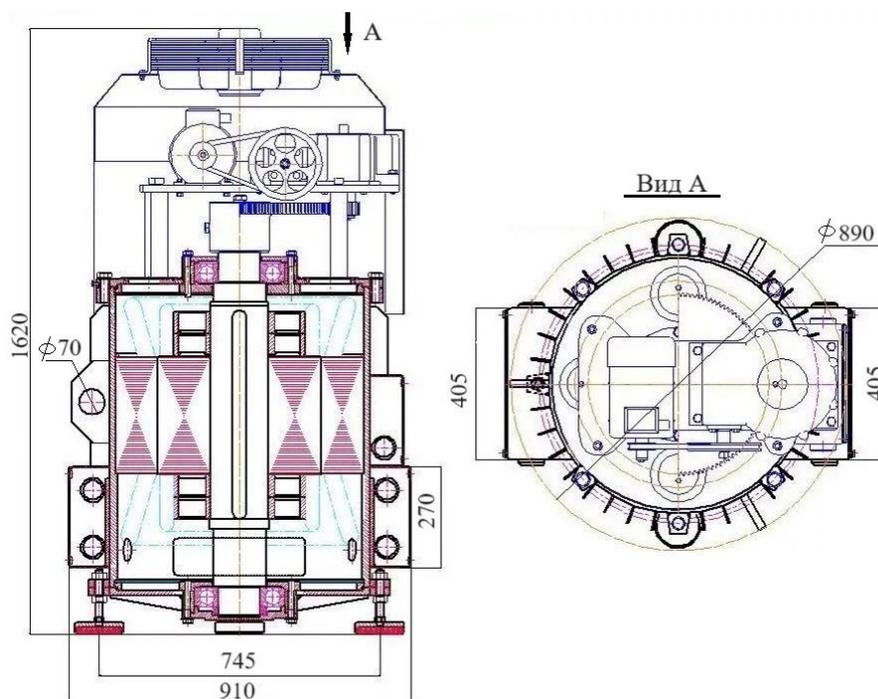


Рис. 1.1. Индукционный регулятор вертикального исполнения

ИР (индукционный регулятор напряжения) – асинхронная машина с заторможенным фазным ротором (рис. 1.1), в которой при помощи поворотного устройства (червячной самотормозящей передачи) изменяется угловое положение ротора относительно статора. Намагничивающий ток обмотки, соединенной с сетью, создает магнитный поток, который наводит ЭДС в первичной и во вторичной обмотках. Обычно первичной обмоткой является обмотка ротора, которая может включаться как в «звезду», так и в «треугольник».

Фаза ЭДС вторичной обмотки  $E_2$  изменяется относительно первичного напряжения  $U_1$  в зависимости от взаимного положения осей первичной и вторичной обмоток.

По назначению ИР подразделяются на две группы:

- для плавного регулирования напряжения на нагрузке при неизменном напряжении питающей сети;
- для стабилизации напряжения на нагрузке при изменяющемся напряжении питающей сети в пределах  $\pm 10\%$ .

На рис. 1.2 представлена схема индукционного регулятора, из которой видно, что обмотки статора и ротора имеют автотрансформаторную связь.

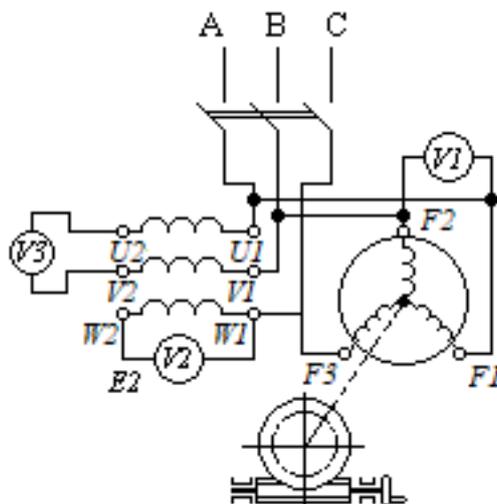


Рис. 1.2. Электрическая схема индукционного регулятора в режиме холостого хода

Ротор машины заторможен посредством червячной передачи, позволяющей вращением маховика, укрепленного на червяке, плавно поворачивать его на некоторый угол.

Первичной обмоткой ИР является обмотка ротора, соединенная в «звезду». Обмотка статора разомкнута.

При включении индукционного регулятора в сеть с напряжением  $U_1$  токи в обмотке ротора создают вращающееся магнитное поле, которое, сцепляясь с обмотками ротора и статора, наводит в них ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ :

$$E_2 = \frac{w_2 \cdot k_{обм2}}{w_1 \cdot k_{обм1}} \cdot E_1 \approx \frac{w_2 \cdot k_{обм2}}{w_1 \cdot k_{обм1}} \cdot U_1.$$

ЭДС ротора  $E_1$  находится в противофазе с напряжением сети  $U_1$  и уравнивает его:  $E_1 \approx -U_1$ .

Выходное напряжение  $U_2$  равно геометрической сумме ЭДС статора  $E_2$  и напряжения сети  $U_1$ :

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \dot{E}_2 \cdot \cos \alpha, \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  – угол поворота обмоток ротора относительно обмоток статора.

Уравнение (1.1) иллюстрируется векторной диаграммой напряжений индукционного регулятора, построенной для одной фазы в режиме холостого хода (рис. 1.3).

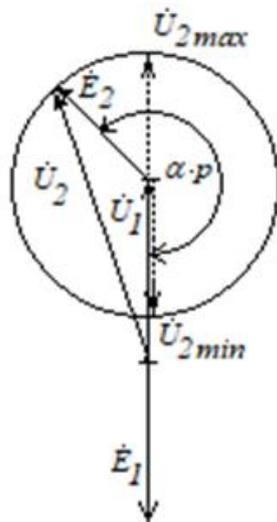


Рис. 1.3. Векторная диаграмма индукционного регулятора

Задаваясь значением угла поворота  $\alpha$ , можно по (1.1) определить напряжение на выходе индукционного регулятора для любого положения ротора. При повороте ротора на угол  $\alpha$  от нуля до  $180^\circ$  напряжение на выходе регулятора плавно изменяется от  $U_{2max}$  до  $U_{2min}$ . Ограниченный угол поворота позволяет упростить конструкцию регулятора, так как необходимость в контактных кольцах и щетках из-за небольшого углового перемещения отпадает. Электрическая связь обмотки ротора с питающей сетью осуществляются через шлейф из трех гибких изолированных шин, который перемещается за ротором при его угловом перемещении.

Если выполнить условие  $E_1 = E_2 \approx U_1$ , то  $U_{2min} = 0$ , а  $U_{2max} = 2 \cdot U_1$ .

Уравнение (1.1) справедливо для двухполюсного регулятора ( $p = 1$ ), в общем случае уравнение напряжений для индукционного регулятора имеет вид

$$U_2 = U_1 + E_2 \cdot \cos(\alpha \cdot p), \quad (1.2)$$

где  $p$  – число пар полюсов;  $\alpha \cdot p$  – электрический угол поворота обмоток ротора относительно обмоток статора.

При нагрузке ИР на его ротор действует электромагнитный момент, который необходимо преодолевать при повороте ротора.

Для рассмотренного ИР при изменении выходного напряжения  $U_2$  одновременно изменяется его фаза относительно первичного напряжения  $U_1$ , что в ряде случаев нежелательно. Существуют другие конструктивные схемы ИР, лишенные этого недостатка (например, сдвоенный регулятор, индукционный регулятор с соединением обмоток статора и ротора в общий треугольник и др.), но они отличаются более сложной и дорогостоящей конструкцией.

Сдвоенный индукционный регулятор состоит из двух машин с общим валом, обмотки статоров которых включены последовательно. Соответствующим включением обмоток статора и ротора (рис. 1.4) обеспечивается вращение их магнитных полей в противоположные стороны при повороте ротора. В обмотках статоров наводятся ЭДС  $E_2^I$  и  $E_2^{II}$ , векторы которых смещаются в противоположных направлениях от нулевого положения. Суммирование  $E_2^I$  и  $E_2^{II}$  дает ЭДС  $E_2$ , совпадающую по фазе с питающим напряжением  $U_1$ . Электромагнитный момент на валу сдвоенного регулятора равен нулю.

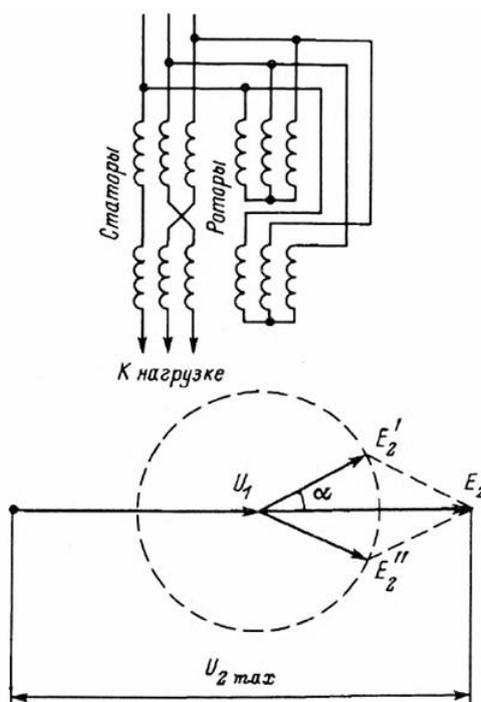


Рис. 1.4. Электрическая схема и векторная диаграмма сдвоенного индукционного регулятора

На рис. 1.5 приведена схема соединений обмоток статора и ротора в общий треугольник. При вращении ротора общие точки обмоток ротора и статора  $P1C4$ ,  $P2C5$  и  $P3C6$  перемещаются внутрь или наружу треугольника питающего напряжения, при этом выполняется условие  $\dot{U}_1 = -(\dot{E}_1 - \dot{E}_2)$ , где  $\dot{E}_1, \dot{E}_2$  – соответственно ЭДС статора и ЭДС ротора, при этом ЭДС статора  $E_1$  и ротора  $E_2$  одного плеча равны между собой, а  $E_1 = w_1 \cdot k_{обм1}$ ;  $E_2 = w_2 \cdot k_{обм2}$ .

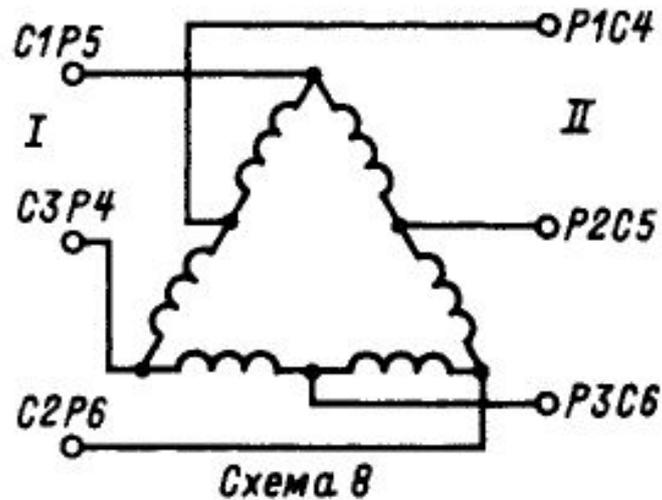


Рис. 1.5. Схема трехфазного индукционного регулятора с соединением обмоток статора и ротора в общий треугольник

Как следует из рис. 1.6, треугольник вторичных напряжений меняется по величине, а фаза вторичного напряжения не изменяется.

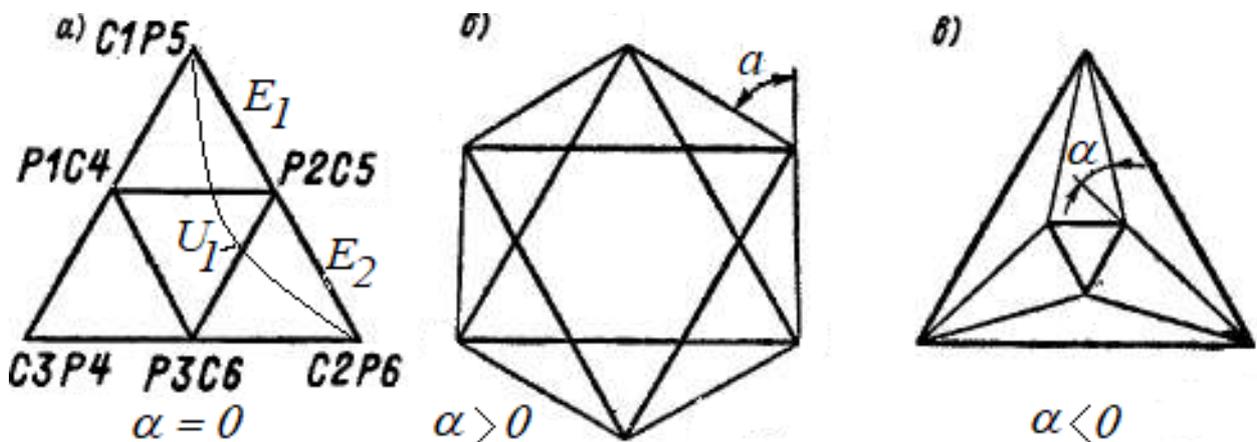


Рис. 1.6. Векторная диаграмма ЭДС индукционного регулятора при различных положениях ротора с соединением обмоток статора и ротора в общий треугольник

Как и в автотрансформаторах, в индукционных регуляторах различают проходную и габаритную мощности. При одинаковых схемах соединений и числах витков обмоток соотношения между проходной и габаритной мощностями у индукционных регуляторов такие же, как у автотрансформаторов.

В настоящее время промышленность выпускает индукционные регуляторы серии ИР2 (модифицированный) с воздушным охлаждением, ИРН, МА-195 и др. По своим техническим и эксплуатационным характеристикам индукционный регулятор серии ИР2 является полным аналогом устаревших регуляторов серии ИР, служит для плавного регулирования напряжения в диапазоне от 0 до 650 В при частоте питающей сети 50 Гц.

Маркировка регулятора серии ИР2:

ИР2-3-400-380 УЗ,

где ИР2 – индукционный регулятор серия 2 (модифицированный);

3 – трехфазный;

400 – мощность, кВа;

380 – номинальное напряжение, В;

УЗ – климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69.

## 1.2. ФАЗОРЕГУЛЯТОР

Фазорегуляторы применяют в устройствах автоматики (для фазового управления) и измерительной техники (для проверки ваттметров, счетчиков и др. аппаратов). Как было показано выше, при заторможенном роторе асинхронной машины сдвиг между ЭДС  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$ , индуцируемых в фазах обмоток статора и ротора, определяется величиной электрического угла между осями одноименных фаз этих обмоток, поскольку обе эти ЭДС индуцируются общим вращающимся магнитным полем. Изменение угла сдвига  $\alpha$  приводит к изменению фазы ЭДС  $\dot{E}_2$ . Эта возможность регулирования фазы используется в фазорегуляторе (рис. 1.7), представляющем собой трехфазную АФР в режиме трансформатора.

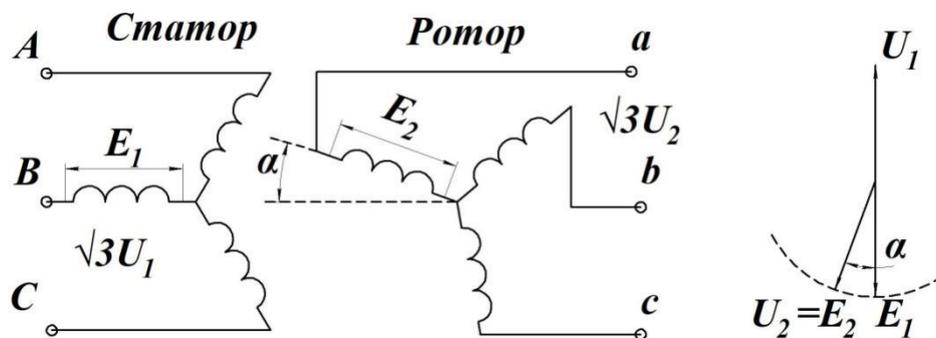


Рис. 1.7. Электрическая схема и векторная диаграмма фазорегулятора

Обмотка статора (или ротора) присоединяется к сети с напряжением  $U_C = \sqrt{3} \cdot U_1$ , к обмотке ротора через контактные кольца присоединяется нагрузка  $Z_H$  (рис. 1.8). Если пренебречь падением напряжения на активных и индуктивных сопротивлениях рассеяния статора и ротора, то  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$ ,  $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$ , и при равенстве чисел витков и обмоточных коэффициентов обмоток ( $w_1 = w_2$ ;  $k_{o61} = k_{o62}$ )  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$ .

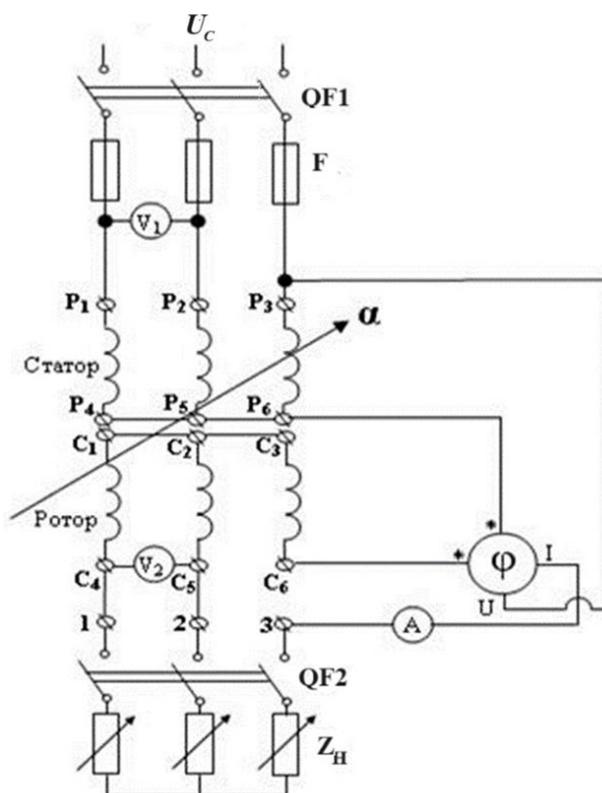


Рис. 1.8. Схема испытаний фазорегулятора

При повороте ротора вектор  $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$  также поворачивается относительно вектора  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$ .

Для определения вторичного напряжения на роторе при нагрузке с учетом сопротивления обмоток необходимо воспользоваться уравнениями АМ, приняв скольжение  $s = 1$ . При этом в уравнение напряжений ротора надо ввести дополнительный член, учитывающий падение напряжения в приведенном сопротивлении нагрузки  $z'_n$ :

$$E'_2 = z'_2 I'_2 + U'_2,$$

где  $U'_2 = z'_n I'_2$ .

На ротор фазорегулятора под нагрузкой действует тормозной электромагнитный момент. Как и в индукционном регуляторе, в конструкции фазорегулятора используется самотормозящая червячная передача. Параметры передачи должны обеспечивать ручное вращение ротора или дистанционное при помощи электродвигателя небольшой мощности.

На сегодняшний день выпускаются несколько серий фазорегуляторов с различными параметрами – ФР, ФРО. Исполнение фазорегуляторов – вертикальное.

В условном обозначении фазорегулятора:

- ФР – название серии;
- О – обдуваемый;
- первая цифра – габарит (по внешнему диаметру сердечника статора);
- вторая цифра (1 или 2) – условная длина сердечника;
- буква Р после цифр – ручной привод;
- далее следуют условные обозначения климатического исполнения и категории размещения.

Технические характеристики изделий фазорегуляторы ФР-52Р:

- число фаз – 3;
- мощность на нагрузке изделия – 2 кВ·А;
- номинальное первичное напряжение – 220 В / 380 В;
- номинальное вторичное напряжение – 220 В / 380 В;
- ток нагрузки – не более 5,2 А;
- частота – 50 Гц;
- ток сети – 10,5 А / 6,1 А.

Габариты изделия фазорегулятор ФР-52Р:

– диаметр – 410 мм;

– высота – 700 мм;

Масса изделия фазорегулятор ФР-52Р – 106 кг.

Температура окружающего воздуха – от +1 до +35 °С, от +1 до +45 °С.

Относительная влажность воздуха при температуре – 65 % при 20 °С, 80 % при 27 °С.

Фазорегулятор ФР-52Р предназначен для работы в помещениях в условиях умеренного (У), холодного (ХЛ) и тропического (Т) климата.

Фазорегуляторами комплектуют испытательные установки, например У1134М, которые служат для поверки на частоте 50 Гц однофазных и трехфазных счетчиков активной и реактивной энергии класса 2,0 и ниже по образцовым вольтметрам и секундомеру; амперметров, вольтметров, варметров и фазометров класса 2,5 и ниже по образцовым приборам класса 0,5, а при использовании образцовых приборов класса 0,2 – приборов класса 1,0 и ниже.

Схема фазорегулятора типа ФР4 представлена на рис. 1.9.

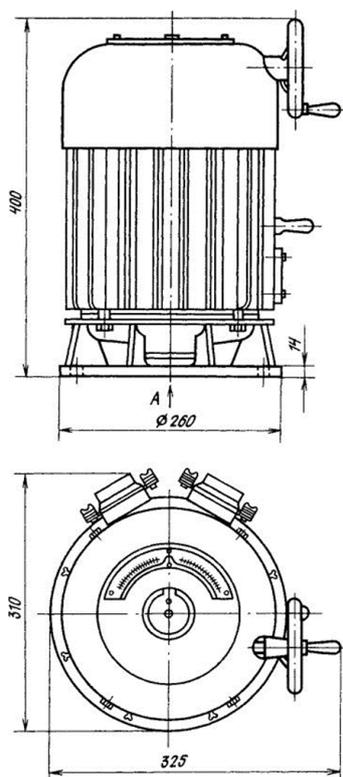


Рис. 1.9. Фазорегулятор типа ФР4

### 1.3. АСИНХРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

АПЧ представляет собой двухмашинный агрегат, состоящий из приводного двигателя и асинхронной машины с фазным ротором. В качестве приводного двигателя можно использовать машину переменного тока асинхронную или синхронную (рис. 1.10), а также машину постоянного тока (рис. 1.11). Возможность использования АФР в качестве преобразователя частоты связана известным соотношением частоты тока ротора  $f_2$  и статора  $f_1$ :

$$f_2 = f_1 \cdot s = f_1 \cdot \frac{n_1 \mp n_2}{n_1}, \quad (1.3)$$

где  $n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$  – частота вращения магнитного поля машины, об/мин;

$p$  – число пар полюсов;

$n_2$  – частота вращения ротора.

При использовании в качестве приводного двигателя машины переменного тока надо иметь в виду, что числа пар полюсов приводной машины ПД  $p = p_{\text{ПД}}$  и АПЧ  $p = p_{\text{АПЧ}}$  в общем случае могут быть разными, и выражение для  $f_2$  будет иметь вид

$$f_2 = f_1 \cdot s = f_1 \cdot \frac{p_{\text{ПД}} \mp p_{\text{АПЧ}}}{p_{\text{ПД}}}.$$

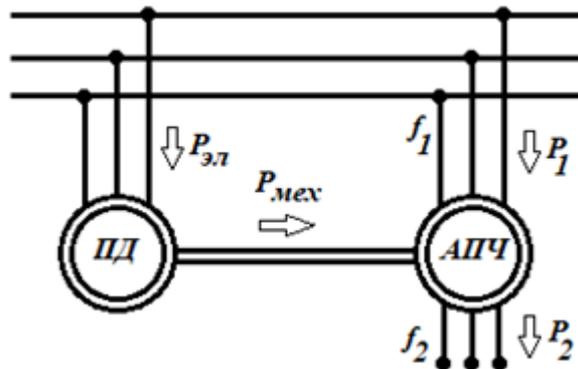


Рис. 1.10. Асинхронный преобразователь частоты с приводным двигателем переменного тока

Знак « $\leftrightarrow$ » соответствует согласному вращению магнитного поля и ротора, что соответствует двигательному режиму работы машины

и изменению скольжения в диапазоне  $0 < s \ll 1$ . Очевидно, что в этом случае частота тока ротора  $f_2 < f_1$ . Знак «+» соответствует встречному вращению магнитного поля и ротора, что отвечает режиму противовключения. Поскольку в этом случае  $s > 1$ , то  $f_2 > f_1$ . Таким образом, в зависимости от режима работы машины АФР способна преобразовывать первичную частоту тока  $f_1$  источника, к которому подключена обмотка статора машины, в частоту  $f_2$ , которая снимается с контактных колец ротора.

Статорная обмотка подключается к питающей сети с частотой тока  $f_1$ . Ток с частотой  $f_2$  снимают через контактные кольца и щетки с фазной обмотки ротора.

Электрическая мощность на выходе АПЧ  $P_{\text{АПЧ}}$  представляет собой сумму электромагнитной мощности, передаваемой от статора АПЧ, и механической мощности, передаваемую от приводного двигателя  $P_{\text{мех}}$ :

$$P_{\text{АПЧ}} = P_2 = P_{\text{эм}} + P_{\text{мех}}.$$

Первичная мощность АПЧ при пренебрежении потерями

$$P_1 = P_{\text{эм}},$$

где  $P_{\text{эм}}$  – электромагнитная мощность преобразователя.

Вторичная мощность преобразователя является мощностью скольжения:

$$P_2 = s \cdot P_{\text{эм}} = s \cdot P_1.$$

Механическая мощность, развиваемая приводным двигателем:

$$P_{\text{мех}} = P_2 - P_1 = s \cdot P_{\text{эм}} - P_{\text{эм}} = (s - 1) \cdot P_{\text{эм}}.$$

В режиме противовключения  $P_{\text{мех}} > 0$ ,  $f_2 > f_1$  поскольку  $s > 1$ .

Если АПЧ работает в режиме двигателя, то приводная машина переходит в режим генератора и  $P_{\text{мех}} < 0$ , а  $f_2 < f_1$  и, соответственно,  $s < 1$ . Направления мощностей  $P_{\text{мех}}$  и  $P_{\text{эл}}$ , указанные на рис. 1.8, изменятся на противоположные.

Соотношение между мощностями  $P_{\text{мех}}$  и  $P_{\text{эм}}$  зависит от скольжения  $s$ .

При  $s = 2$   $P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}}$  и, следовательно, они поровну вносят свой вклад в мощность преобразователя  $P_{\text{АПЧ}}$ .

Коэффициент полезного действия рассмотренной системы — небольшой, так как он является произведением КПД приводного двигателя и асинхронного преобразователя частоты:

$$\xi = \xi_{\text{ПД}} \cdot \xi_{\text{АПЧ}}.$$

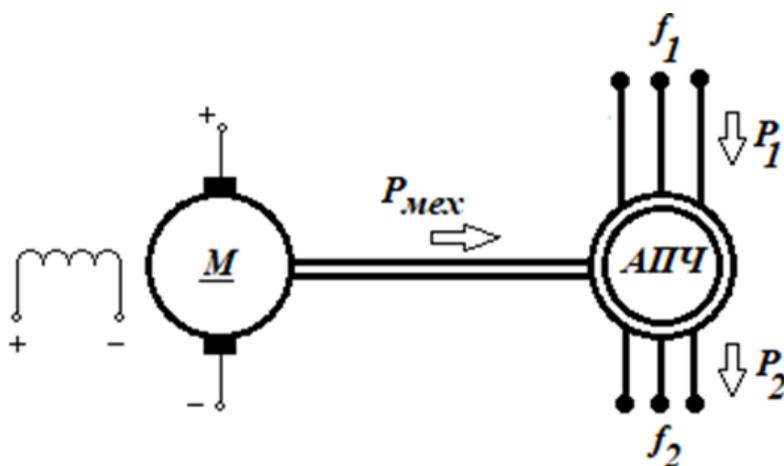


Рис. 1.11. Асинхронный преобразователь частоты с приводным двигателем постоянного тока

АПЧ применяются преимущественно для получения переменного напряжения с частотой 100–200 Гц, необходимого для питания асинхронного привода с частотами вращения выше 3000 об/мин (электропилы и другие ручные электрические машины). АПЧ и ПД двухмашинного агрегата можно совместить в общем магнитопроводе, получив одномашинный преобразователь частоты (ОПЧ). Трехфазный асинхронный ОПЧ выполняется в конструкции асинхронной машины с фазным ротором и содержит на статоре две отдельные трехфазные обмотки, подключаемые к первичной сети со встречным чередованием фаз; на роторе с контактными кольцами размещается фазная обмотка совмещенного типа, работающая одновременно в качестве многофазной короткозамкнутой для ПД и трехфазной для АПЧ. Одномашинное исполнение асинхронного преобразователя частоты

с совмещенной обмоткой на роторе позволяет упростить конструкцию и изготовление, значительно снизить расход конструктивных материалов и обмоточного провода, повысить надежность.

Для плавного регулирования выходной частоты преобразователя  $f_2$  существует несколько возможностей, например питание обмотки статора от источника регулируемой частоты  $f_1$  или использование в качестве ПД машины постоянного тока.

## 1.4. АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

Асинхронная машина может работать генератором как параллельно с сетью, к которой подключены другие генераторы, так и на автономную нагрузку.

### 1.4.1. Параллельная работа асинхронного генератора с сетью

Генераторный режим работы асинхронной машины, подключенной к сети «бесконечной» мощности, возникает при некоторых условиях. Во-первых, частота вращения ротора  $n_2$  должна быть больше частоты вращения магнитного поля машины  $n_1$ . Во-вторых, в электрической сети должны быть источники реактивной мощности для возбуждения в машине магнитного поля.

В режиме асинхронного двигателя частота вращения ротора  $n_2$  не может превышать частоту вращения магнитного поля  $n_1$ , поэтому для перехода в режим АГ необходим приводной двигатель, обеспечивающий достижение условия  $n_2 > n_1$ . В этом случае ЭДС ротора  $E_2$ , активные составляющие токов статора  $I_1$  и ротора  $I_2$  на векторной диаграмме изменяют направление по отношению к режиму двигателя.

Возбуждение магнитного поля в асинхронной машине возникает за счет реактивной мощности сети, которую генерируют главным образом синхронные машины – генераторы, компенсаторы, перевозбужденные двигатели. У всех асинхронных машин намагничивающий ток достигает 25 % и выше от номинального, что является главной причиной ограниченного применения генераторного режима работы.

В то же время АГ имеет ряд преимуществ, которые позволяют рассматривать его как конкурента синхронного генератора. АГ гораздо дешевле синхронного, надежнее и проще в обслуживании. АГ проще включать в сеть.

Область применения АГ – малые гидроэлектростанции, работающие без обслуживающего персонала, бортовые источники переменного тока, ветрогенераторные установки и др. В электроприводах генераторный режим АМ используется для рекуперативного торможения. Пример подобного применения – спуск груза подъемным краном, когда двигатель вращается согласно с направлением спуска. Под действием силы тяжести груза ротор разгоняется и его скорость становится выше синхронной, АМ переходит в генераторный режим. Тормозной момент, возникающий при этом, ограничивает скорость спуска груза, а кинетическая энергия опускающейся массы преобразуется в электрическую и возвращается в сеть.

В режиме АГ скольжение машины отрицательное  $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} < 0$ . Как правило, по абсолютным значениям оно не превышает величину скольжения асинхронных двигателей (3–5 %).

При включении асинхронной машины в сеть с  $U_1 = \text{const}$  и  $f_1 = \text{const}$  она работает в режиме двигателя. Величина тока вторичной обмотки  $I_2$  при вращающемся роторе составит

$$I_2 = \frac{s \cdot E_2}{Z_{2s}}, \quad (1.4)$$

где  $E_2$  – ЭДС вторичной обмотки при неподвижном роторе;

$Z_{2s}$  – полное сопротивление вторичной обмотки при вращающемся роторе:

$$Z_{2s} = r_2 + j \cdot s \cdot x_2;$$

$r_2$  – активное сопротивление вторичной обмотки;

$x_2$  – индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки при неподвижном роторе.

Избавившись от комплексного выражения в знаменателе уравнения (1.4), можно выразить активную  $I_{2a}$  и реактивную  $I_{2r}$  составляющую тока  $I_2$ :

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= I_{2a} - j \cdot I_{2r}; \\ I_{2a} &= \frac{s \cdot E_2 \cdot r_2}{r_2^2 + s^2 \cdot x_2^2}; \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$I_{2r} = \frac{s^2 \cdot E_2 \cdot x_2}{r_2^2 + s^2 \cdot x_2^2} \quad (1.6)$$

Из выражения (1.6) следует, что при любом значении скольжения реактивная составляющая тока ротора  $I_{2r} > 0$ .

Если при помощи ПД увеличивать частоту вращения ротора, скольжение будет уменьшаться и при достижении условия  $n_2 = n_1$  машина перейдет в режим идеального холостого хода:  $I_2 = 0$ ,  $s = 0$ . При дальнейшем увеличении частоты вращения и достижении условия  $n_2 > n_1$  согласно (1.5) активная составляющая тока ротора изменит направление на противоположное и станет отрицательной ( $I_{2a} < 0$ ), что означает переход машины в режим генератора. При этом электромагнитный момент, развиваемый машиной, становится тормозящим по отношению к вращающему моменту приводного двигателя. Изменение величины вырабатываемой активной мощности генератора достигается путем изменения подводимой к валу генератора механической мощности приводного двигателя.

Поскольку знак реактивной составляющей тока ротора  $I_{2r}$  не меняется при переходе из двигательного режима работы в генераторный режим, то это означает, что машина потребляет из сети реактивную мощность, как и в двигательном режиме.

#### **1.4.2. Асинхронный генератор при работе на автономную нагрузку**

Асинхронная машина может работать в режиме автономного генератора. В этом режиме АГ часто называют машинами с самовозбуждением. АГ с самовозбуждением обычно используют в установках специального назначения.

Функцию намагничивания машины (источника реактивной мощности) обычно выполняют конденсаторные установки (КУ) или другие источники реактивной мощности, например автономный инвертор напряжения [3]. Как правило, по характеру нагрузка генератора является активно-индуктивной, поэтому требуемая генерация реактивной мощности увеличивается, а масса и габариты КУ превосходят массу и габариты генератора. При коэффициенте мощности  $\cos \varphi = 1$  или при активно-емкостной нагрузке масса и габариты КУ соответственно снижаются. Скольжение асинхронного генератора в нормальном режиме  $s = (-2 \dots -10) \%$ . Невыполнение данного условия приведет к тому, что частота генерируемого напряжения может отличаться от промышленной частоты 50 Гц. Это вызывает неустойчивую работу частотно зависимых потребителей электроэнергии. Особенно опасно снижение генерируемой частоты, так как в этом случае понижается индуктивное сопротивление обмоток электродвигателей, трансформаторов, что может стать причиной их повышенного нагрева и преждевременного выхода из строя.

Асинхронные генераторы могут рассматриваться как альтернатива синхронным генераторам, например в качестве бортовых источников электроэнергии, причем они могут использоваться одновременно как стартеры для запуска авиадвигателя, а затем переходить в генераторный режим.

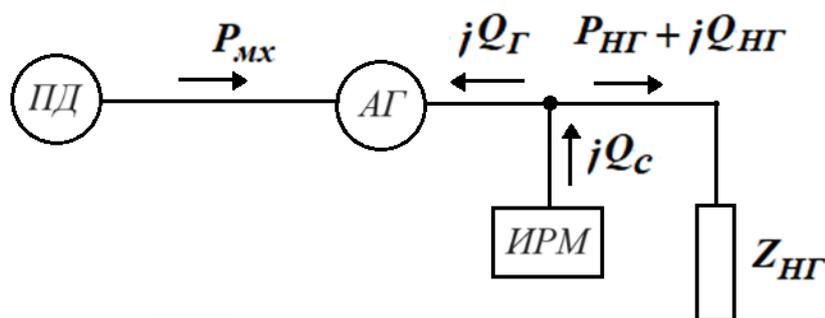


Рис. 1.12. Структурная схема асинхронного генератора с самовозбуждением

Перспективно применение асинхронных генераторов с самовозбуждением для питания мобильных электроприемников при отсутствии электрических сетей, например в труднодоступной горной мест-

ности. Первичным двигателем, создающим входную мощность генератора  $P_{\text{мех}}$ , часто являются небольшие гидро- или ветротурбины. На рис. 1.12 приведена структурная схема асинхронного генератора с самовозбуждением.

Потребляемая генератором реактивная мощность

$$Q_{\Gamma} = S_{\Gamma} \cdot \sin \varphi = P_{\Gamma} \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $S_{\Gamma}$  – полная мощность генератора;

$P_{\Gamma}$  – активная мощность генератора;

$\varphi$  – электрический угол сдвига фаз напряжения и тока.

Мощность источника реактивной мощности (ИРМ):

$$Q_{\text{с}} = m_1 \cdot U_{\text{с}} \cdot I_{\text{с}} = Q_{\Gamma} + Q_{\text{НГ}},$$

где  $U_{\text{с}}$ ,  $I_{\text{с}}$  – фазные напряжение и ток источника реактивной мощности;  $Q_{\text{НГ}} = P_{\text{НГ}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{НГ}}$  – реактивная мощность нагрузки.

Если  $P_{\Gamma} = P_{\text{НГ}} = P_{\text{НОМ}}$ , где  $P_{\text{НОМ}}$  – номинальная активная мощность генератора, то реактивная мощность ИРМ

$$Q_{\text{с}} = P_{\text{НОМ}} \cdot (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{\text{НГ}}).$$

Чаще всего в качестве ИРМ применяют конденсаторы. Используя известное соотношение  $X_{\text{с}} = \frac{1}{\omega_1 \cdot C} = \frac{U_{\text{с}}}{I_{\text{с}}} = \frac{m_1 \cdot U_{\text{с}}^2}{Q_{\text{с}}}$ , можно определить емкость КУ:

$$C = \frac{Q_{\text{с}}}{\omega_1 \cdot m_1 \cdot U_{\text{с}}^2} = \frac{P_{\text{НОМ}} \cdot (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{\text{НГ}})}{\omega_1 \cdot m_1 \cdot U_{\text{с}}^2}, \quad (1.7)$$

где  $\omega_1$  – угловая частота магнитного поля;

$m_1$  – число фаз статорной обмотки;

$C$  – емкость конденсаторов.

Из выражения (1.7) следует, что изменение нагрузки сети требует регулирования емкости ИРМ. Для уменьшения требуемой реактивной мощности выгодно использовать асинхронную машину с короткозамкнутым ротором, у которой коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) больше, чем

у машины с фазным ротором. Самовозбуждение генератора возможно как в режиме холостого хода, так и в режиме нагрузки, причем в режиме нагрузки, имеющей, как правило, активно-индуктивный характер, требуется большая емкость. Переходный процесс длится до тех пор, пока ЭДС, индуцируемая в обмотке статора намагничивающим током  $I_c$ , не станет равной напряжению на конденсаторе  $U_c$ .

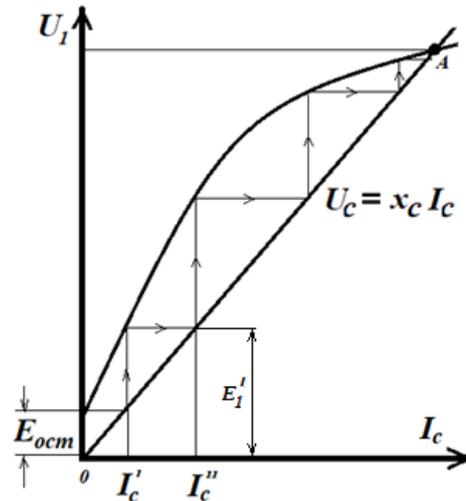


Рис. 1.13. Самовозбуждение асинхронного генератора в режиме холостого хода

Как и в машинах постоянного тока, для начала самовозбуждения требуется наличие остаточного намагничивания, а частота вращения ротора должна превосходить некоторое критическое значение. Процесс самовозбуждения показан на рис. 1.13.

Физический смысл самовозбуждения поясняет схема замещения АГ, приведенная на рис. 1.14.

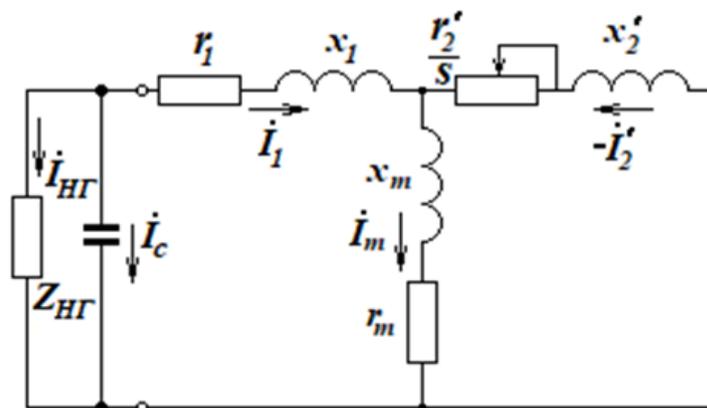


Рис. 1.14. Схема замещения асинхронного генератора

Схема замещения позволяет найти все величины и соотношения, характеризующие работу асинхронного генератора. Особенностью схемы замещения является наличие комплексной нагрузки  $Z_{НГ}$  и источника реактивной мощности.

Остаточная ЭДС  $E_{ост}$ , определяемая остаточным магнитным потоком, вызывает в КУ ток  $I_c^I$ :

$$I_c^I = \frac{E_{ост}}{x_c} = \omega_1 \cdot C \cdot E_{ост}.$$

Ток  $I_c^I$ , протекая по обмотке статора генератора, индуцирует в ней ЭДС  $E_1^I$ , которая, в свою очередь, вызывает в конденсаторе ток  $I_c^{II}$ , индуцирующий ЭДС  $E_1^{II}$ , и т. д. Процесс возбуждения продолжается, пока  $(x_1 + x_m) \cdot I_c > x_c \cdot I_c$ , и заканчивается, когда сопротивление  $x_m$  в результате насыщения уменьшается настолько, что в т. А (см. рис. 1.11) наступает равенство  $(x_1 + x_m) \cdot I_c = x_c \cdot I_c$ .

При работе под нагрузкой необходимо поддерживать неизменными частоту  $f_{Г}$  и напряжение генератора  $U_{Г}$ .

Напряжение уменьшается из-за внутреннего падения напряжения  $I_1 \cdot \underline{Z}_1$  и снижения ЭДС  $\dot{E}_1$ :

$$\dot{U}_{Г} = \dot{E}_1 - I_1 \cdot \underline{Z}_1.$$

Уменьшение ЭДС  $\dot{E}_1$  связано со снижением частоты  $f_{Г}$  при неизменной частоте вращения приводного двигателя.

Частота  $f_{Г}$  изменяется под нагрузкой, поскольку при увеличении потребляемой активной мощности баланс между генерируемой и потребляемой мощностями возникает при меньшей частоте  $f_{Г}$  генерации источника. Для восстановления частоты необходимо увеличить мощность ПД, что повысит мощность генерации и будет способствовать восстановлению частоты  $f_{Г}$ .

Для регулирования напряжения можно увеличивать магнитный поток за счет увеличения намагничивающего тока (мощности КУ).

При коротком замыкании самовозбуждающийся асинхронный генератор теряет возбуждение.

## **2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Целью экспериментальных исследований специальных асинхронных электрических машин является более глубокое изучение студентами вопросов теории электромеханического преобразования энергии, ознакомление с конструкцией электрических машин и их основными характеристиками, приобретение практических навыков экспериментальных исследований и обработки опытных данных.

Лабораторные работы рассчитаны на 4 часа аудиторных занятий по экспериментальному исследованию электрических машин и на 2–4 часа самостоятельной работы студентов по обработке и анализу полученных опытных данных.

### **2.1. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ**

Перед началом работ в лаборатории все студенты обязаны ознакомиться с правилами техники безопасности при работе с электротехническими установками и расписаться в соответствующем журнале, хранящемся у заведующего лабораторией.

При выполнении лабораторных работ по электрическим машинам следует помнить, что испытания проводятся при напряжениях до 250 В, а в некоторых случаях и выше. При неблагоприятных условиях опасные поражения электрическим током могут произойти даже при напряжении ниже 50 В, поэтому во время работы студенты должны быть внимательны, дисциплинированы и строго соблюдать следующие требования техники безопасности.

1. Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, все члены студенческой бригады должны обстоятельно ознакомиться с оборудованием лабораторной установки и устройством отдельных ее частей. Студенты обязаны знать номинальные данные исследуемых электрических машин и не допускать их превышения в ходе работы, за исключением случаев, оговоренных особо.

2. К сборке электрической схемы необходимо приступать только после разрешения преподавателя, убедившись, что ни одна из частей установки не находится под напряжением.

3. При выполнении каждой работы необходимо подключить тепловую защиту машины переменного тока (рис. 2.1) и соединить гнезда защитного заземления  $\oplus$  устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания *G1*.

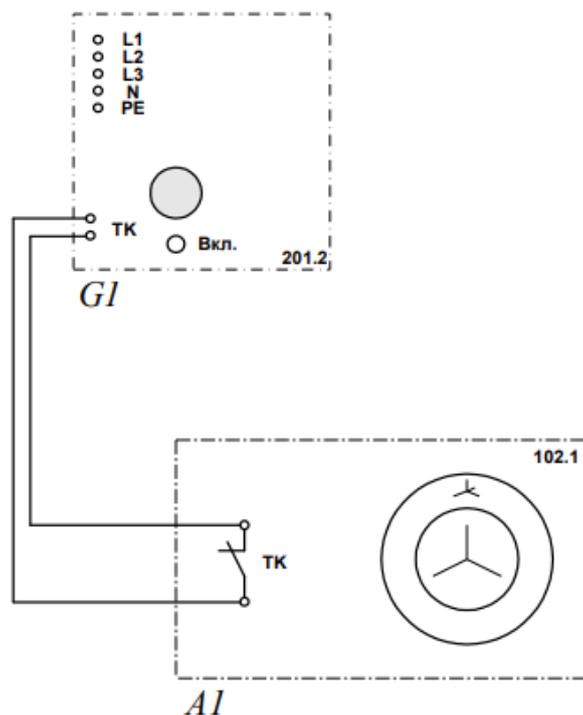


Рис. 2.1. Электрическая схема тепловой защиты машины переменного тока

4. При обнаружении на лабораторном стенде неисправностей следует обратиться к дежурному лаборанту. Работа на неисправном стенде категорически запрещается.

5. Включение установки под напряжение разрешается только после проверки схемы и всей установки преподавателем.

6. В процессе выполнения лабораторной работы категорически запрещается прикасаться к находящимся под напряжением оголенным токоведущим участкам схемы и вращающимся частям электрических машин.

7. Все необходимые переключения в схемах разрешается производить лишь при полном отключении напряжения.

8. Студентам запрещается делать какие-либо переключения на главном распределительном щите и заходить за лабораторные стенды.

9. Если в ходе работы требуется сделать перерыв (для выполнения контрольных расчетов, консультации с преподавателем, отдыха и т. д.), то напряжение со стенда должно быть полностью снято.

10. Категорически запрещается оставлять без присмотра даже на короткое время лабораторную установку, находящуюся под напряжением.

11. По окончании работы в первую очередь со стенда должно быть снято напряжение. После утверждения преподавателем полученных экспериментальных данных схема разбирается и рабочее место приводится в порядок.

12. Нарушение правил техники безопасности и поведения в лаборатории рассматривается как серьезное нарушение дисциплины.

## **2.2. ТРЕБОВАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА**

Перед каждой лабораторной работой студент должен самостоятельно, используя рекомендованную литературу и соответствующее руководство, подготовиться к занятию и знать следующие основные вопросы:

– устройство и принцип действия исследуемой электрической машины;

– ее основные характеристики;

– назначение всех элементов испытуемой установки, их взаимодействие и обозначение на электрической схеме.

Перед началом занятий преподаватель проверяет устно, письменно или при помощи контролирующих устройств знания студентов и их готовность к выполнению предстоящей работы.

К каждому следующему занятию студент представляет отчет о предыдущей работе и защищает его.

Студент, не представивший отчет о предыдущей работе, к лабораторным занятиям не допускается.

Отчет выполняется каждым студентом индивидуально на стандартных листах формата А4 (287×210 мм).

Отчет должен содержать:

– титульный лист с названием работы, фамилией студента, указанием его факультета, курса и группы, фамилией проверяющего преподавателя и т. д.;

– программу работы;

– номинальные данные исследуемых машин;

– электрическую схему (схемы) установки, выполненную в соответствии с действующими стандартами;

– таблицы экспериментальных и расчетных данных; каждая таблица должна иметь название и порядковый номер, в таблице обязательно должны быть указаны единицы измерения приведенных величин;

– пример расчета данных, необходимых для построения графиков и диаграмм;

– рисунки опытных и расчетных характеристик, выполненные на листах формата А4 с помощью графических редакторов или вручную. Рисунки должны сопровождаться названием, порядковым номером и необходимыми поясняющими надписями. На графиках должны быть четко проставлены все экспериментальные точки, имеющиеся в соответствующей таблице. Характеристики проводятся в виде плавных кривых таким образом, чтобы число «выпавших» экспериментальных точек по обе стороны кривой было примерно равным;

– выводы по работе. В выводах должно быть в краткой форме сделано заключение по каждому из проделанных опытов и по каждой опытной и расчетной характеристике.

Перечень аппаратуры приведен в табл. 2.1.

*Таблица 2.1*

### Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
<i>G1</i>	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
<i>G5</i>	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
<i>M1</i>	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 об/мин <sup>-</sup>
<i>M2</i>	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В 0,56 А (якорь) 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
<i>M3</i>	Машина переменного тока		120 Вт; 220 / 380 В; 1350 об/мин; 0,73 / 0,42 А
<i>A3, A4</i>	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230 В / 242,235, 230, 226, 220, 133, 127 В
<i>A5, A6</i>	Трехполюсный выключатель	301.1	~ 400 В / 10 А
<i>A7</i>	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	401,1	3 транс. напряжения 600 / 3 В 3 транс. тока 0,3 А / 3 В
<i>A8</i>	Коннектор	330	8 аналог. диф. входов, 2 аналог. выхода, 8 цифр. входов / выходов
<i>A9</i>	Персональный компьютер	550	IBM совмест.
<i>A16</i>	Емкостная нагрузка	317.2	220 В / 3×0...40 ВАр
<i>P1, P2</i>	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ≈0...1000 В ≈0...10 А 0...20 МОм
<i>P3</i>	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А
<i>P4</i>	Указатель частоты вращения	506.2	-2000...0...2000 об/мин

# Лабораторная работа № 1

## ИНДУКЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

*Цель работы:* изучить конструкцию, принцип действия и особенности работы асинхронной машины с фазным заторможенным ротором в качестве источника регулируемого трехфазного напряжения.

### Порядок работы

1. Ознакомиться с конструкцией ИР, записать его паспортные данные, а также данные измерительных приборов.
2. Выполнить опыт холостого хода ИР.
3. Построить график зависимости напряжения на выходе ИР от угла поворота ротора.
4. По данным опыта начертить в масштабе векторную диаграмму напряжений и график зависимости  $U_{20} = f(\alpha \cdot p)$ .

### Методические указания

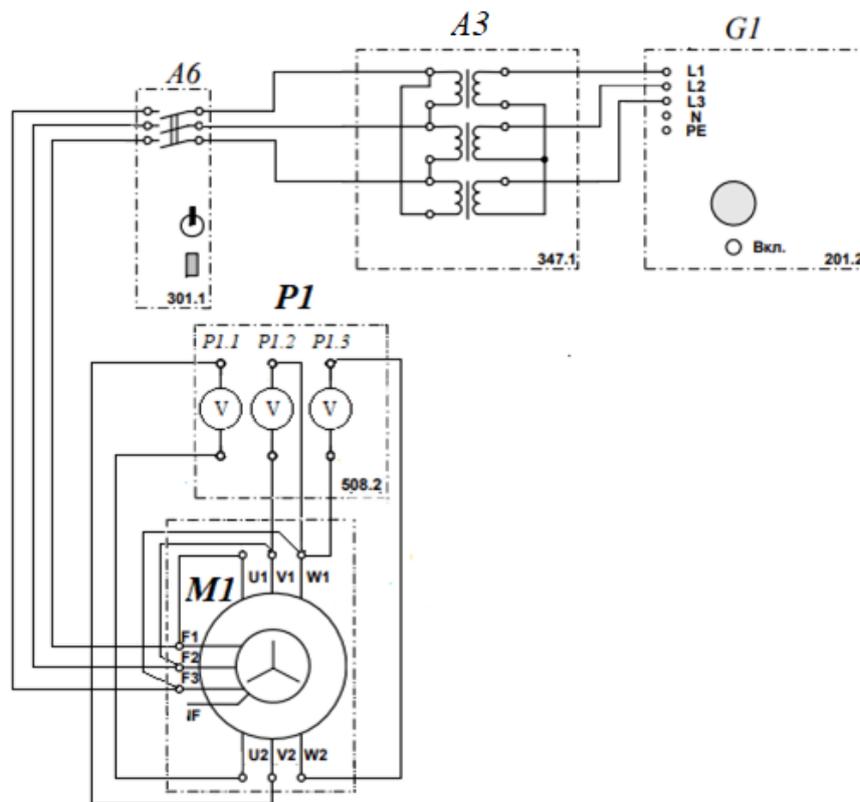


Рис. 2.2. Схема исследования работы индукционного регулятора в режиме холостого хода

## Опыт холостого хода

В качестве ИР используют асинхронную машину с фазным ротором  $M1$ . Для выполнения опыта необходимо снять защитный кожух. При выполнении экспериментов необходимо следить за показаниями измерительных приборов, чтобы значения токов и напряжения не превышали номинальных.

Перед началом работ необходимо убедиться, что все используемые в работе устройства отключены от сети.

Собрать электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (см. рис. 2.1).

Соединить гнезда защитного заземления  $\oplus$  устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания  $G1$ .

Собрать схему испытаний ИР по рис. 2.2.

Включить выключатель «СЕТЬ» блоков, задействованных в экспериментальных исследованиях.

Переключатели устройств (выключатели, источники) перевести в положение «РУЧН.».

Положение ротора при включении регулятора в сеть должно соответствовать отметке « $90^\circ$ », нанесенной на измерительной шкале, расположенной с торца регулятора. Включить источник питания  $G1$ . Выставить максимальный коэффициент трансформации трансформатора  $A2$ . Подключить индукционный регулятор в сеть на напряжение  $U_1$ , контролируемое вольтметром  $P1.2$ .

Поворачивая ротор, через 10 геометрических градусов измерить напряжение на входе регулятора  $U_1$  (вольтметр  $P1.2$ ), ЭДС статора  $E_2$  (вольтметр  $P1.3$ ) и напряжение на выходе регулятора  $U_2$  (вольтметр  $P1.1$ ).

Полученные данные занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

### Экспериментальные данные исследования индукционного регулятора

$\alpha$ , геометр. градусы								
$\alpha_p$ , электр. градусы								

$U_2, B$								
$E_2, B$								
$U_1, B$								

### Обработка опытных данных

По полученным данным построить графики  $U_2 = f(\alpha)$ ,  $U_2 = f(\alpha \cdot p)$  для режима х. х. регулятора. В этой же координатной сетке построить график  $U_2 = f(\alpha \cdot p)$ , где  $U_2$  – напряжение на выходе регулятора, полученное в результате расчета по формуле

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \dot{E}_2 \cdot \cos(\alpha \cdot p).$$

В отчете привести опытную и расчетную зависимости напряжения на выходе индукционного регулятора от угла поворота ротора  $U_2 = f(\alpha \cdot p)$ .

Сделать выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Поясните устройство индукционного регулятора.
2. Почему поворот ротора вызывает изменение напряжения на выходе индукционного регулятора?
3. На какой угол необходимо повернуть ротор шестипольсного индукционного регулятора, чтобы выходное напряжение изменилось от минимального до максимального значения?
4. Какой вид имеют внешние характеристики индукционного регулятора при различном характере нагрузки?
5. В чем заключаются недостатки индукционного регулятора как источника регулируемого напряжения?
6. Укажите на рис. 2.2 вольтметр, показывающий изменяющееся в функции угла поворота напряжение.
7. Чем конструктивно ограничен угол поворота ротора индукционного регулятора без контактных колец и щеток?
8. Какая обмотка регулятора создает основной магнитный поток?
9. Каким образом можно сохранить неизменной фазу вторичного напряжения относительно первичного?
10. Укажите область применения индукционного регулятора.

## Лабораторная работа № 2

### АСИНХРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

*Цель работы:* изучить принцип действия и особенности режима работы асинхронной машины с фазным ротором в качестве преобразователя частоты.

#### *Порядок работы*

1. Ознакомиться с конструкцией и паспортными данными АФР  $M1$ , АКЗ  $M3$  и ДПТ  $M2$ .
2. Собрать схему испытаний асинхронного преобразователя частоты (АПЧ) по рис. 2.3 и 2.4.
3. Определить направление вращения машин  $M1$  и  $M2$ , добившись режима противовключения машины  $M1$ .
4. Выполнить экспериментальные исследования АПЧ.
5. Оформить отчет по работе.

#### *Методические указания*

На рис. 2.3 приведена электрическая схема исследования асинхронного преобразователя частоты, построенная на двухмашинном агрегате, состоящем из приводного двигателя постоянного тока (ДПТ)  $M2$  и асинхронной машины с фазным ротором  $M1$ . Нагрузкой преобразователя является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором  $M3$ .

Входная частота АПЧ  $f_1$  контролируется по каналу  $O1$  многоканального виртуального осциллографа, частота  $f_2$  на выходе преобразователя – по каналу  $O2$ . Напряжение с частотой  $f_1$  и  $f_2$  с выводов статорных обмоток  $U1$  и  $V1$  машин  $M1$  и  $M3$  (см. рис. 2.3) поступает в блок измерительных трансформаторов  $A7$ , где преобразуется трансформатором напряжения 600 / 3 В. Через аналоговые входы АСНО-АСН8 коннектора  $A8$  (см. рис. 2.4) измеряемое напряжение с частотой  $f_1$  и  $f_2$  вводится в компьютер  $A9$  и обрабатывается специальной компьютерной программой.

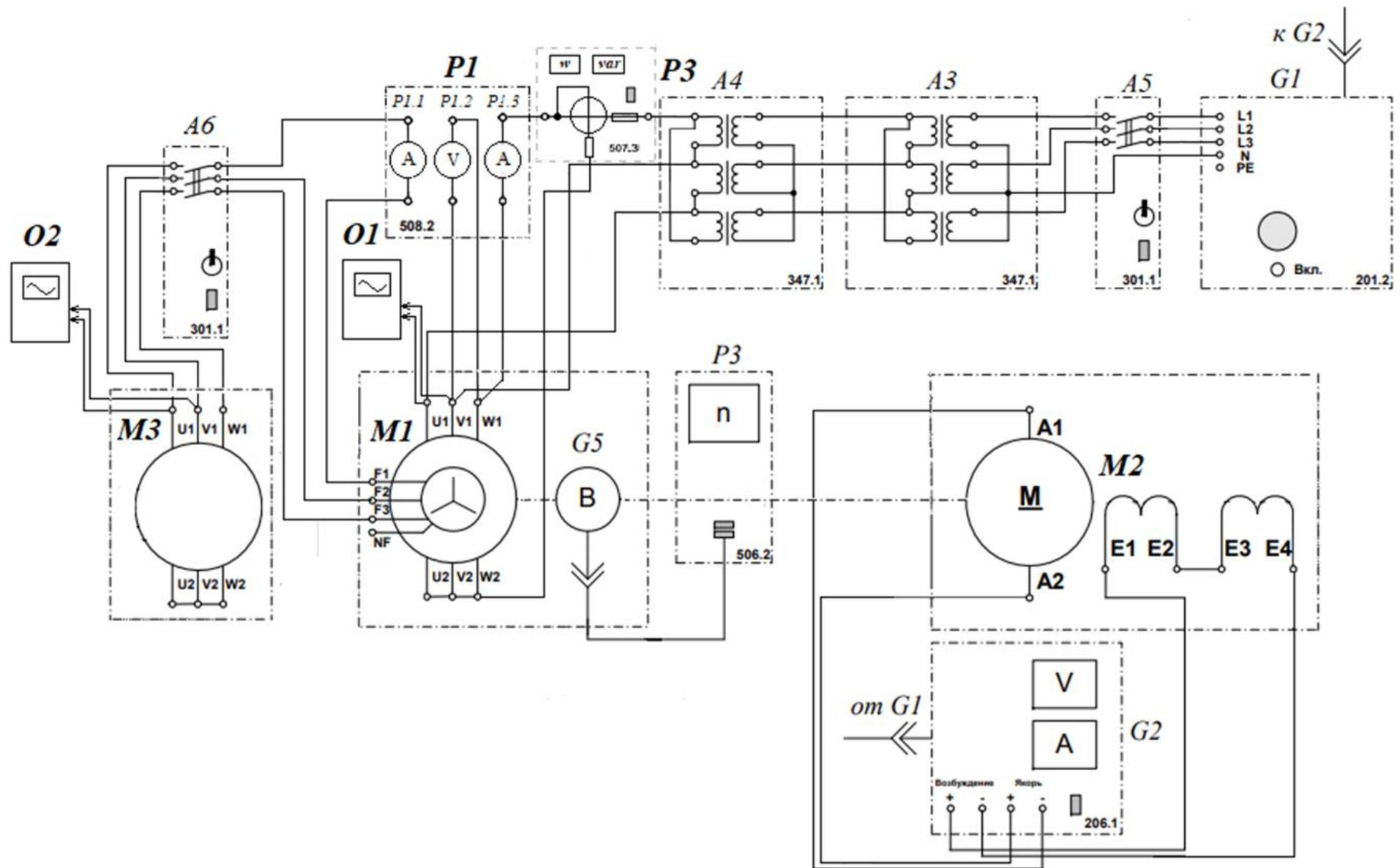


Рис. 2.3. Электрическая схема асинхронного преобразователя частоты

Для определения направления частоты вращения агрегата машин  $M1$  и  $M2$  используется датчик  $G5$ .

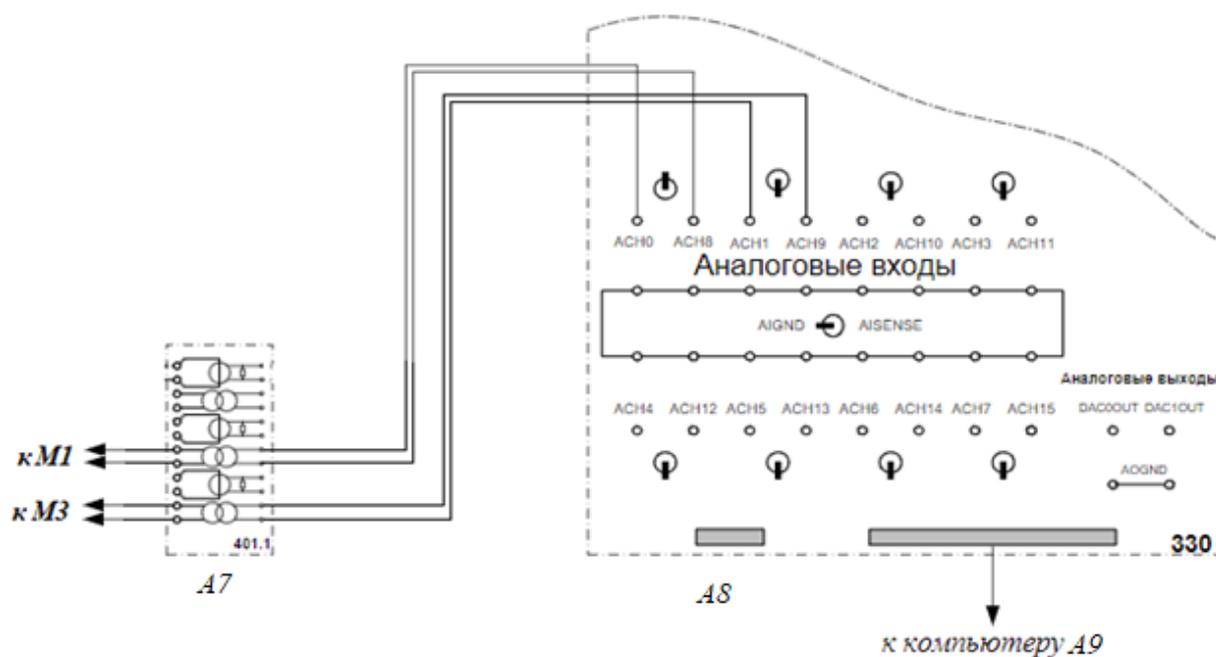


Рис. 2.4. Электрическая схема подключения к многоканальному осциллографу

Фазный ток АПЧ  $I_1$  контролируется по амперметру  $P1.3$ , ток нагрузки  $I_2$  – по амперметру  $P1.1$ .

Межфазное напряжение статорной обмотки измеряют вольтметром  $P1.2$ . Для включения-отключения нагрузки  $M3$  используется выключатель  $A6 301.1$ .

Величина тока  $I_1$  и напряжения  $U_1$  АПЧ регулируется при помощи изменения коэффициентов трансформации двух последовательно соединенных трехфазных групп однофазных трансформаторов  $A3, A4$ .

Мощность трех фаз АПЧ, потребляемую из сети с  $f_1 = 50$  Гц, определяют по показаниям ваттметра  $P_{1\phi}$ :

$$P_1 = 3 \cdot P_{1\phi}.$$

Перед началом работ необходимо убедиться, что все используемые в работе устройства отключены от сети.

Собрать электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (см. рис. 2.1).

Соединить гнезда защитного заземления  $\oplus$  устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания  $G1$ .  
Собрать схему испытаний АПЧ по рис. 2.3 и 2.4.

Включить выключатель «СЕТЬ» блоков, задействованных в экспериментальных исследованиях.

Переключатели устройств (выключатели, источники) перевести в положение «РУЧН.».

При выполнении экспериментов необходимо следить за показаниями измерительных приборов, чтобы значения токов и напряжений не превышали номинальных значений.

В режиме противовключения ротор подключенной к сети асинхронной машины вращается против направления поля за счет механической энергии ПД.

Для определения направления вращения машин  $M1$  и  $M2$  необходимо:

1. Соединить выводы фазного ротора  $F1$ ,  $F2$  и  $F3$  и подключить машину  $M1$  к сети при помощи сетевого выключателя  $A5$  по схеме короткозамкнутого ротора. Направление вращения определить по датчику  $G5$ .

2. Отключить машину  $M1$  при помощи сетевого выключателя  $A5$ .

3. Включить источник  $G2$  и, плавно увеличивая напряжение якоря, развернуть ротор машины  $M2$ . Определить направление вращения по датчику  $G5$ .

4. Если направления вращения машин  $M2$  и  $M1$ , определенные в пунктах 1 и 3, совпадают, отключить машину  $M2$  и поменять полярность якоря  $A1-A2$ .

Определив, что направления вращения ротора и магнитного поля соответствуют режиму противовключения, переходят к исследованию режима работы машины в качестве АПЧ.

### ***Экспериментальные исследования АПЧ***

1. Включить в работу машину  $M2$  и установить номинальную частоту вращения 1500 об/мин.

2. Подключить статорную обмотку  $M1$  к источнику  $G1$  при помощи сетевого выключателя  $A5$ , при этом плавно повышать напряжение на статорной обмотке АПЧ  $U_1$  (прибор  $P1.2$ ), изменяя коэффициенты трансформации, начиная с максимального значения, в трансформаторных группах  $A3, A4$ .

3. Подключить нагрузку АПЧ – асинхронную машину  $M3$  при помощи выключателя  $A6$ .

4. При частоте вращения 1500 об/мин установить напряжение  $U_1$ , при котором ток статора АПЧ приблизительно равен номинальному значению:  $I_1 \approx I_{1H}$ .

5. Частоту токов статора  $f_1$  и ротора  $f_2$  машины  $M1$  (частота тока фазного ротора  $f_2$  машины  $M1$  одновременно является частотой тока статора машины  $M3$ ) определяют по многоканальному осциллографу.

6. Записать измеренные значения  $I_1, U_1, P_{1\phi}, I_2, f_2, n_{АПЧ}$  в табл. 2.3.

7. Регулируя частоту вращения машины  $M2$ , по указанию преподавателя установить частоту вращения меньше 1500 об/мин, например 1250 об/мин, 1000 об/мин и т. д. Экспериментальные данные занести в табл. 2.3.

8. После завершения экспериментов увеличить коэффициенты трансформации в трансформаторных группах  $A3, A4$ , уменьшить момент вращения машины  $M2$  и отключить питание стенда.

### ***Обработка результатов экспериментальных исследований***

По результатам экспериментальных исследований вычислить значения первичной мощности АПЧ  $P_1$ , выходной мощности АПЧ  $P_2$ , скольжения АПЧ  $s$  и механической мощности приводного двигателя  $P_{\text{мех}}$ :

1.  $P_1 = 3 \cdot P_{1\phi}$ .

2.  $n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$  – частота вращения магнитного поля машины, об/мин.

3.  $s = \frac{n_1 + n_{\text{АПЧ}}}{n_1}$  – скольжение АПЧ.

4.  $P_2 = s \cdot P_1$ .

5.  $P_{\text{мех}} = (s - 1) \cdot P_1$ .

## Экспериментальные и расчетные данные исследования АПЧ

№	Эксперимент						Расчет			
	$I_1$ , А	$U_1$ , В	$P_{1ф}$ , Вт	$I_2$ , А	$f_2$ , Гц	$n_{АПЧ}$ , об/мин	$P_1$ , Вт	$s$	$P_2$ , Вт	$P_{мех}$ , Вт

6. По полученным экспериментальным и расчетным данным построить в одной координатной сетке графики зависимостей  $P_1, P_{мех} = f(s)$ .

7. По результатам исследования АПЧ сделать выводы.

## Контрольные вопросы

1. Где применяют АПЧ?
2. Укажите, напряжения какой частоты обычно генерируют АПЧ.
3. Напряжение какой частоты будет генерировать АПЧ, если приводной двигатель – 4-полюсный АКЗ, а число пар полюсов АМФР  $p = 1$ ? Частота сети 50 Гц.
4. Каким образом регулируют выходную частоту АПЧ?
5. Почему в качестве АПЧ используют машину с фазным ротором?
6. Как меняется соотношение между потребляемой из сети мощностью АПЧ и механической мощностью приводного двигателя при изменении частоты вращения АПЧ?
7. При какой частоте АПЧ будет выполняться равенство потребляемой мощности из сети и механической мощности ПД?
8. Поясните, почему выходная мощность АПЧ больше входной мощности.
9. Изменится ли режим работы преобразователя частоты, если реверсировать приводной двигатель?
10. В каком режиме будет работать АПЧ, если соотношение между выходной и входной частотами  $f_2 < f_1$ ?

## Лабораторная работа № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ

*Цель работы:* изучить физические основы работы асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в качестве генератора активной мощности при работе на сеть с бесконечной мощностью и приобрести практические навыки перевода машины в генераторный режим работы.

#### *Порядок работы*

1. Ознакомиться с паспортными данными исследуемой машины.
2. Собрать схему испытаний по рис. 2.5.
3. Определить направление вращения ДПТ ( $M2$ ) и АКЗ ( $M1$ ), добившись их согласного вращения.
4. Развернуть машину  $M2$  до частоты вращения, переводящей работу асинхронной машины в генераторный режим.
5. Выполнить опыт регулирования активной мощности АГ ( $M1$ ) при его параллельной работе с сетью.
6. Оформить отчет по работе.

#### *Методические указания*

Электрическая схема исследования работы асинхронного генератора приведена на рис. 2.5.

Перед началом работ необходимо убедиться, что все используемые в работе устройства отключены от сети.

Собрать электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (см. рис. 2.1).

Соединить гнезда защитного заземления  $\oplus$  устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания  $G1$ .

Включить выключатель «СЕТЬ» блоков, задействованных в экспериментальных исследованиях.

Переключатели устройств (выключатели, источники) перевести в положение «РУЧН.».

При выполнении экспериментов необходимо следить за показаниями измерительных приборов, чтобы значения токов и напряжений не превышали номинальных значений.

Приводной двигатель постоянного тока  $M2$  включить по схеме независимого возбуждения, для регулирования частоты вращения в цепь возбуждения включить реостат (308.1).

Машину  $M1$  включить по схеме асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (для этого соединяют выводы фазного ротора  $F1$ ,  $F2$  и  $F3$ ).

При переводе машины  $M1$  в режим генератора необходимо проверить направления вращения ПД  $M2$  и асинхронной машины  $M1$ . Они должны совпадать.

Для проверки согласного вращения ПД  $M2$  и асинхронной машины  $M1$  необходимо:

1. При отключенном выключателе  $A6$  включить источники  $G1$  и  $G2$ .

2. В цепи возбуждения двигателя  $M2$  установить максимальное сопротивление.

3. Плавно увеличивая напряжение источника  $G2$ , развернуть якорь ПД  $M2$  и по датчику частоты вращения  $G5$  определить направление его вращения.

4. Остановить машину  $M2$ , отключить источник  $G2$ .

5. Установить максимальный коэффициент трансформации в трехфазной трансформаторной группе  $A3$ , включить выключатель  $A6$ , запустить АМ  $M1$ .

6. После пуска асинхронной машины по датчику  $G5$  определить направление вращения ротора.

7. При согласном направлении вращения машин  $M1$  и  $M2$  перейти к проведению экспериментальной части работы.

8. Если направления вращения машин  $M1$  и  $M2$  не совпадают, отключить источник  $G1$  и реверсировать любую из указанных машин, например поменять полярность на якоре машины  $M2$  или порядок подключения фаз машины  $M1$  к источнику  $G1$ .



## ***Порядок проведения экспериментов***

1. Включить источники  $G1$  и  $G2$ .
2. Плавнo увеличивая напряжение якоря машины  $M2$ , развернуть ротор до номинальной частоты вращения 1500 об/мин.
3. Включить выключатель  $A6$ .
4. Записать результаты измерений частоты вращения ротора  $n_2$ , тока статора  $I_1$ , фазных величин активной и реактивной мощности  $P_\phi$ ,  $Q_\phi$ , тока якоря  $I_a$  ДПТ в табл. 2.4.
5. Уменьшая сопротивление в цепи возбуждения, увеличить частоту вращения якоря ДПТ.
6. По показаниям ваттметра определить переход машины  $M2$  в генераторный режим работы.

## ***Опыт регулирования активной мощности АГ***

Изменяя момент на валу ПД, определить 3–4 экспериментальные точки с различными величинами генерируемой мощности в генераторном режиме работы, следя за тем, чтобы ток якоря машины  $M2$  (амперметр  $P1.1$ ) не превышал номинального значения.

## ***Обработка результатов экспериментальных исследований***

1. По приведенным ниже соотношениям определить:
  - частоту вращения магнитного поля АГ

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p},$$

где  $f_1$  – частота сети,  $p$  – число пар полюсов;

– скольжение

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1};$$

– активную мощность генератора

$$P = 3 \cdot P_\phi;$$

– реактивную мощность генератора

$$Q = 3 \cdot Q_{\phi};$$

– полную мощность генератора

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2};$$

– коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

2. Построить в одной координатной сетке графики  $P$ ,  $Q$ ,  $S$ ,  $I_1$ ,  $\cos \varphi = f(n_2)$ .

3. Сделать выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Где применяют асинхронные генераторы?
2. Укажите рабочую область скольжения асинхронных генераторов.
3. Каким образом увеличить отдаваемую в сеть активную мощность асинхронного генератора?
4. Как включить асинхронный генератор в сеть?
5. Какой вариант конструкции асинхронного генератора предпочтительнее – с короткозамкнутым или фазным ротором?
6. Укажите преимущества и недостатки асинхронного генератора по сравнению с синхронным.
7. Объясните характер изменения коэффициента мощности асинхронного генератора при изменении скольжения.
8. Почему асинхронный генератор потребляет из сети большой намагничивающий ток?
9. Как на практике определить переход асинхронной машины из двигательного режима работы в генераторный и наоборот?
10. Как величина скольжения влияет на энергетические характеристики машины?

## Характеристики асинхронного генератора

	Эксперимент					Расчет				
№	$n_2$ , об/мин	$I_a$ , А	$I_1$ , А	$P_\phi$ , Вт	$Q_\phi$ , ВАр	$s$	$P$ , Вт	$Q$ , ВАр	$S$ , ВА	$\cos \varphi$

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО НА АВТОНОМНУЮ НАГРУЗКУ

*Цель работы:* изучить физические основы работы асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в качестве генератора активной мощности при работе на автономную нагрузку.

#### *Порядок работы*

1. Ознакомиться с паспортными данными исследуемой машины.
2. Осуществить возбуждение генератора в режиме холостого хода.
3. Выполнить опыт нагрузки.
4. Оформить отчет по работе.

#### *Методические указания*

Перед началом работ необходимо убедиться, что все используемые в работе устройства отключены от сети.

При выполнении экспериментов необходимо следить за показаниями измерительных приборов, чтобы значения токов и напряжения не превышали номинальных.

Собрать электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (см. рис. 2.1).

Соединить гнезда защитного заземления  $\oplus$  устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания  $G$ .

Собрать схему испытаний генератора по рис. 2.6 и 2.7.

Включить выключатель «СЕТЬ» блоков, задействованных в экспериментальных исследованиях.

Переключатели устройств (выключатели, источники) перевести в положение «РУЧН.».

Приводной двигатель  $M2$  – ДПТ с независимым возбуждением. Асинхронный генератор  $M1$  – АКЗ.

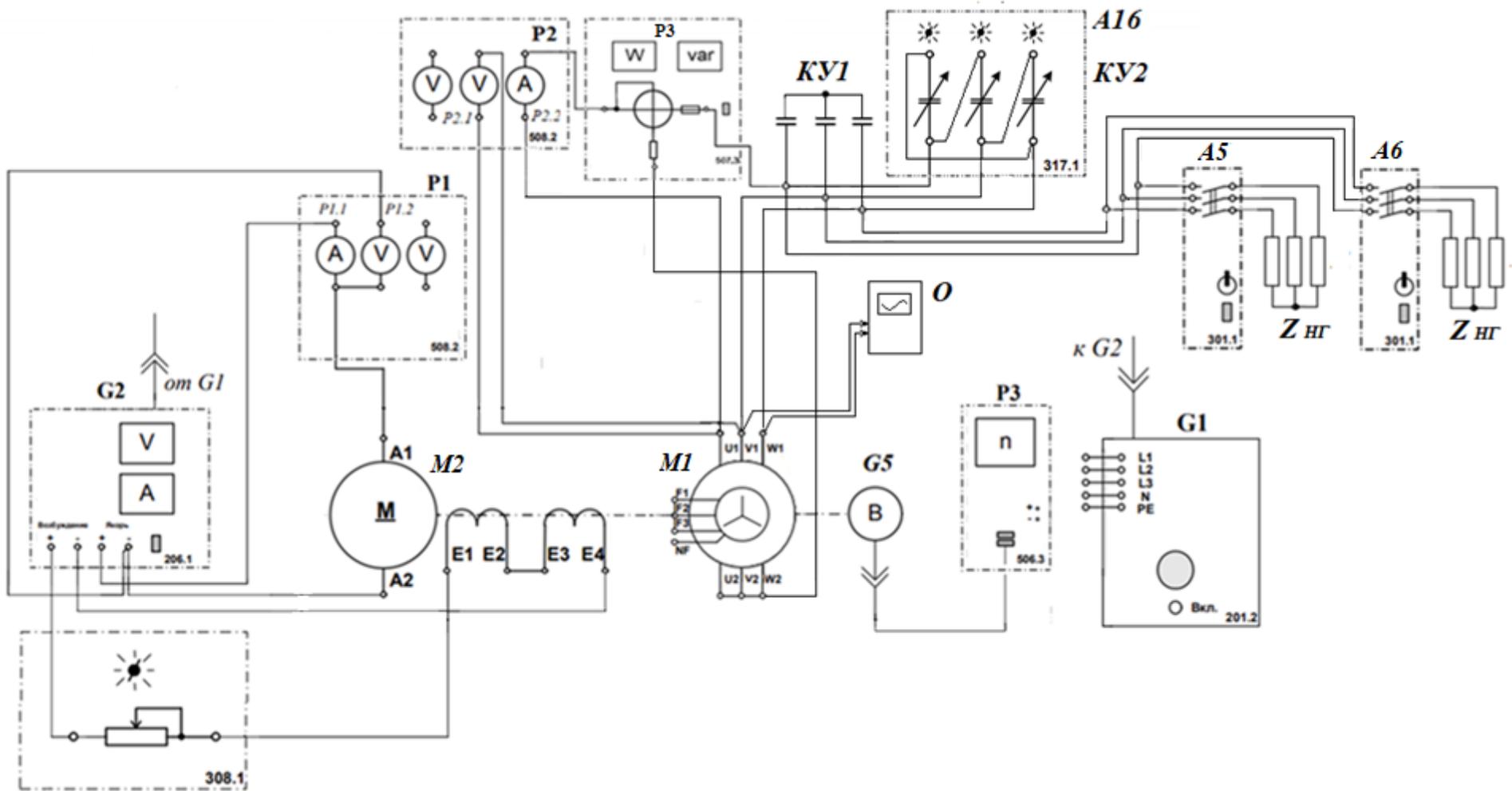


Рис. 2.6. Электрическая схема исследований асинхронного генератора с самовозбуждением

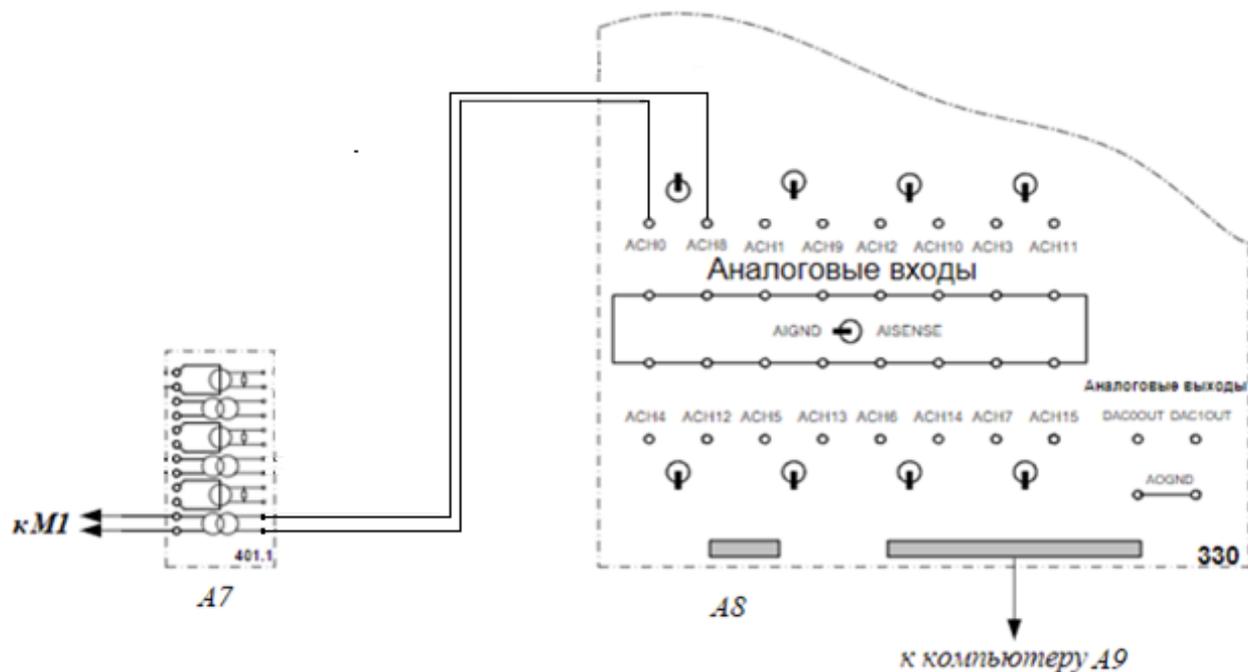


Рис. 2.7. Электрическая схема подключения к многоканальному осциллографу

В цепь возбуждения ДПТ включен реостат для регулирования частоты вращения машины. Для контроля тока якоря ДПТ служит амперметр  $P1.1$ . Напряжение на зажимах якорной цепи контролирует вольтметр  $P1.2$ .  $M1$  собирается по схеме машины с КЗ ротором (соединяют вместе выводы  $F1, F2, F3$ ). В цепи статорной обмотки контролируют ток (амперметр  $P2.2$ ), линейное напряжение (вольтметр  $P2.1$ ). Активную  $P_{\phi}$  и реактивную мощность  $Q_{\phi}$  определяют при помощи блока измерителя мощности (507.2).

Для возбуждения генератора используют две конденсаторные установки  $KY1$  и  $KY2$ .  $KY1$  с постоянной емкостью ( $3 \times 30 \mu\text{F}$ ) используют для возбуждения генератора в режиме холостого хода.  $KY2$  с переменной емкостью используют для регулирования напряжения в опыте нагрузки.

Два блока нагрузки  $Z_{\text{НГ}}$  ( $3 \times 1,2 \text{ к}\Omega$ ) подключаются к генератору через выключатели  $A5$  и  $A6$ . Частота тока  $f_{\Gamma}$  машины  $M1$  определяется по каналу  $O1$  многоканального виртуального осциллографа. Напряжение частоты  $f_{\Gamma}$  с выводов статорной обмотки машины  $M1$

поступает в блок измерительных трансформаторов А7, где преобразуется трансформатором напряжения 600 / 3 В. Через аналоговые входы АСНО-АСН8 коннектора А8 (см. рис. 2.7) измеряемое напряжение частоты  $f_T$  вводится в компьютер А9 и обрабатывается специальной компьютерной программой.

Частота вращения ротора  $n_{ПД}$  контролируется при помощи датчика G5, информация с которого поступает на прибор 504.3.

*Опыт самовозбуждения выполняется в следующей последовательности:*

1. Отключить выключатели А5 и А6.
2. Установить максимальное значение сопротивления реостата в цепи возбуждения ПД.
3. Включить источники G1 и G2.
4. Развернуть ПД, плавно увеличивая напряжение якоря  $U_a$  до значения  $\approx 150$  В.
5. Уменьшая сопротивление в цепи возбуждения ПД, добиться возбуждения АГ, т. е. появления напряжения на зажимах генератора.
6. При возбуждении АГ ток якоря  $I_a$  ПД может превысить номинальное значение, в этом случае необходимо уменьшить напряжение якоря  $U_a$ , добиваясь, чтобы ток якоря  $I_a$  находился в допустимых пределах.

Экспериментальные данные занести в табл. 2.5.

*Выполнить опыт нагрузки в следующей последовательности:*

1. Включить выключатель А5.
2. Результаты измерений занести в табл. 2.5.
3. Включить выключатель А6.
4. Результаты измерений занести в табл. 2.5.
5. Плавно уменьшая напряжение на якоре машины М2, остановить агрегат.
6. Отключить источники G1 и G2.

## *Обработка результатов экспериментальных исследований*

1. Частота вращения магнитного поля АГ

$$n_{\Gamma} = \frac{60 \cdot f_{\Gamma}}{p},$$

где  $f_{\Gamma}$  – частота выходного напряжения генератора;

$p$  – число пар полюсов.

2. Скольжение

$$s = \frac{n_{\Gamma} - n_{\text{ПД}}}{n_{\Gamma}}.$$

3. Активная мощность генератора

$$P_2 = 3 \cdot P_{\phi}.$$

4. Реактивная мощность генератора

$$Q_2 = 3 \cdot Q_{\phi}.$$

5. Полная мощность генератора

$$S = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2}.$$

6. Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P_2}{S}.$$

7. Ток генератора

$$I_{\Gamma} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\Gamma}}.$$

8. Построить графики рабочих характеристик  $U_{\Gamma}$ ,  $I_{\Gamma}$ ,  $f_{\Gamma}$ ,  $s$ ,  $\cos \varphi = f(P_2)$ .

9. Построить графики внешних характеристик  $f_{\Gamma}$ ,  $U_{\Gamma} = f(I_{\Gamma})$ .

## Экспериментальные и расчетные данные

№	Эксперимент								Расчеты							Положение выключателей	
	$U_a, В$	$I_a, А$	$U_{Г}, В$	$I_{Г}, А$	$n_{пд},$ об/мин	$f_{Г}, Гц$	$Q_{\phi}, ВАр$	$P_{\phi}, Вт$	$n_{Г},$ об/мин	$s$	$P_2,$ Вт	$Q_2,$ ВАр	$S,$ ВА	$I_{Г},$ А	$\cos \varphi$	А5	А6
1																Откл.	Откл.
2																Откл.	Вкл.
3																Вкл.	Вкл.

Примечание: опыт № 1 – опыт самовозбуждения (опыт холостого хода); опыты № 2, № 3 – опыты нагрузки.

## Контрольные вопросы

1. Где применяют асинхронные генераторы с самовозбуждением?
2. В чем состоит преимущество применения асинхронной машины с КЗ-ротором в качестве автономного генератора?
3. Укажите необходимые условия самовозбуждения асинхронных генераторов.
4. Почему знак реактивной мощности асинхронной машины не зависит от направления активной мощности при электромеханическом преобразовании энергии?
5. Почему мощности  $P_{\Gamma}$  и  $Q_{\Gamma}$  имеют противоположное направление в режиме автономного генератора?
6. Укажите причину потребления значительного реактивного тока для возбуждения асинхронных генераторов.
7. При каком характере нагрузки АГ с самовозбуждением требуется большая мощность конденсаторной батареи (КУ)?
8. Поясните причину уменьшения главного индуктивного сопротивления  $x_m$  при увеличении намагничивающего тока  $I_c$ .
9. Назовите причины уменьшения напряжения на зажимах автономного генератора при увеличении нагрузки.
10. Укажите способы стабилизации выходного напряжения автономного генератора.
11. Поясните причины изменения частоты выходного напряжения автономного АГ при изменении нагрузки. Укажите пределы изменения частоты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии приведены теоретические сведения о работе асинхронных машин в специальных режимах. Простота конструкции, надежность в эксплуатации, низкая стоимость делают асинхронные машины незаменимыми при работе в различных приложениях, в том числе в качестве источников электрической энергии.

В практической части рассматриваются вопросы применения асинхронных машин в качестве источников электрической энергии:

– индукционного регулятора, предназначенного для плавного регулирования напряжения при неизменном напряжении питающей сети и для стабилизации напряжения на нагрузке при изменяющемся напряжении питающей сети в пределах  $\pm 10\%$ ;

– асинхронного преобразователя частоты, который используют для получения переменного напряжения с частотой 100–200 Гц, необходимого для питания асинхронных приводов с частотами вращения выше 3000 об/мин;

– асинхронного генератора при работе на автономную нагрузку и при параллельной работе с сетью.

Эффективность применения асинхронных генераторов в каждом отдельном случае желательно подтверждать экономическим расчетом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вольдек А.И., Попов В.В.* Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2010. – 350 с.
2. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. В 2-х т. Том 1: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 656 с.
3. Асинхронные вентильные генераторы и стартер-генераторы для автономных энергоустановок: монография / М.Л. Костырев, П.Ю. Грачёв. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 199 с.
4. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии): учеб. пособие для вузов / А.И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин [и др.]; под ред. А.И. Бертинова. – М.: Энергоиздат, 1993. – 552 с.
5. *Вольдек А.И.* Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
6. *Костенко М.П., Пиотровский Л.М.* Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 2. Машины переменного тока: учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1973. – 648 с.
7. *Савилов О.Н., Савилова Э.Е., Шевченко А.Ф.* Исследование асинхронных машин. Сборник лабораторных работ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007.
8. *Галишиников Ю.П., Сенигов П.Н., Карпеш М.А.* Электрические машины. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭМ.01(904). – Челябинск: Учебная техника, 2005. – 210 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Список используемых сокращений и условных обозначений .....	3
Предисловие.....	4
Введение.....	5
1. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН.....	6
1.1. Индукционный регулятор .....	6
1.2. Фазорегулятор .....	11
1.3. Асинхронный преобразователь частоты.....	15
1.4. Асинхронный генератор.....	18
1.4.1. Параллельная работа асинхронного генератора с сетью .....	18
1.4.2. Асинхронный генератор при работе на автономную нагрузку.....	20
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ .....	25
2.1. Правила техники безопасности при работе в учебной лаборатории .....	25
2.2. Требования и рекомендации по подготовке к лабораторной работе и оформлению отчета.....	27
Лабораторная работа № 1. Индукционный регулятор .....	30
Лабораторная работа № 2. Асинхронный преобразователь частоты .....	33
Лабораторная работа № 3. Исследование асинхронного генератора, работающего параллельно с сетью.....	39
Лабораторная работа № 4. Исследование асинхронного генератора, работающего на автономную нагрузку.....	45
Заключение.....	52
Список литературы.....	53

*Учебное издание*

*АНТРОПОВ Владимир Евгеньевич  
ВОЛКОВ Андрей Петрович  
ЗУБКОВ Юрий Валентинович*

**Асинхронные электромеханические источники электрической энергии**

Редактор *Г.В. Загребина*  
Компьютерная верстка *М.В. Марченко*  
Выпускающий редактор *Ю.А. Петропольская*

Подп. в печать 04.04.24  
Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная  
Усл. п. л. 3,19. Уч.-изд. л. 3,16  
Тираж 30 экз. Рег. № 21/24

---

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский государственный технический университет»  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии  
Самарского государственного технического университета  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8