

**И.Г. Стрижков, Е.Н. Чеснюк**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ  
ПРАКТИКУМ  
ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ  
МАШИНАМ**

Допущено Учебно-методическим объединением  
вузов по агроинженерному образованию в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных  
заведений, обучающихся по специальности 110302  
«Электрификация и автоматизация сельского  
хозяйства»

Краснодар  
2006

УДК 621.313  
ББК 31.26  
С 85

**Рецензенты:**

Засл. деятель науки и техники РФ, д-р техн. наук, проф. **Б.Х. Гайтов** (Кубанский государственный технологический университет); кафедра эксплуатации энергетического оборудования и электрических машин Азово-Черноморской государственной агроинженерной академии (зав. каф. Заслуженный работник высшей школы, д-р техн. наук, проф. **М.А. Таранов**).

**Стрижков И.Г., Чеснюк Е.Н.**

С85 Лабораторный практикум по электрическим машинам. Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений по специальности «Электрификация и автоматизация с.х.». - Краснодар: КубГАУ, 2006.- 296 с.

Книга содержит указания по организации и выполнению лабораторных работ по электрическим машинам по программе подготовки бакалавров и специалистов по агроинженерным специальностям высших учебных заведений. Приводятся сведения о методике выполнения испытаний электрических машин, оборудованию для проведения испытаний, даются методические рекомендации по проведению испытаний, анализу результатов и оформлению отчета. Наряду с традиционными лабораторными испытаниями электрических машин описаны виртуальные испытания электрических машин и трансформаторов с применением математических моделей стандартного пакета компьютерных программ «MatLab 6.0 – Simulink».

Для студентов высших учебных заведений по специальности «Электрификация и автоматизация с.х.».

Стрижков И.Г., Чеснюк Е.Н. 2006

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Испытания электрических машин являются важным и эффективным средством их изучения, поэтому в рамках университетской учебной программы дисциплины «Электрические машины» важная роль отводится лабораторным работам. Проведение испытаний электрических машин и трансформаторов позволяет глубже изучить и лучше освоить их устройство, принцип действия и основные свойства и являются необходимым дополнением теоретического курса названной учебной дисциплины.

Современный этап развития теоретической электромеханики как системы знаний характеризуется переходом от классической общей теории электрических машин, сложившейся в начале XX века, к обобщенной теории электромеханического преобразования энергии. Основное содержание первой составляют уравнения установившегося режима машины, векторные диаграммы и схемы замещения. Вторая основана на математических методах описания и анализа свойств электрических машин и отражает определенную общность свойств всех типов современных индуктивных машин, что находит отражение в общности уравнений их математического описания. Методика изучения электрических машин в вузе предполагает, что студент изучит как частные вопросы теории отдельных типов электрических машин и трансформаторов, так и систематизирует сведения об их свойствах, выявляя как общие свойства электрических машин разных типов, так и их отличия, реализуя, таким образом, принцип обучения от частного к общему.

Обобщенная теория электромеханического преобразования энергии хорошо адаптирована к использованию в обучении компьютерных технологий, поскольку основана на построении и анализе математических моделей электрических машин. Использование компьютерных технологий

значительно расширяет возможности исследования машины, особенно её сложных режимов, поскольку устраняет ограничения, накладываемые на испытания электрических машин соображениями безопасности и ограниченными возможностями испытательной техники. Кроме того, компьютерные технологии позволяют значительно расширить возможности самостоятельной работы студентов над учебной программой вследствие доступности математических моделей и отсутствия опасности при работе с ними.

Настоящее учебное пособие составлено в соответствии с учебной программой дисциплины «Электрические машины» для специальности 110302 - «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», предусматривающей общую трудоёмкость дисциплины 200 часов. Пособие дополняет учебники сопоставлением и обобщением свойств и характеристик электрических машин разных типов. Такое сопоставление помогает выявить выше упомянутую общность электромагнитных процессов и свойств всех электрических машин индуктивного типа и посредством такого обобщения лучше освоить теорию электромеханики.

Наряду с традиционными испытаниями электрических машин в учебных лабораториях, в пособие включены виртуальные лабораторные работы, выполняемые на компьютерах с использованием системы «Матлаб 6.0 – Симулинк» (“MatLab 6.0 – Simulink”). Виртуальные испытания электрических машин позволяют значительно расширить возможности и повысить эффективность самостоятельного изучения студентами электрических машин, включая такие формы обучения как дистанционное и заочное обучение.

Пособие представляет в систематизированном виде теорию и практику испытаний электрических машин, раскрывает устройство и принцип работы оборудования, применяемого при испытаниях. Это способствует более глубо-

ким знаниям студентов в области электромеханики, электрооборудования и метрологии.

Авторы выражают признательность рецензентам за ценные замечания, учтенные авторами при подготовке пособия к изданию.

Свою признательность авторы выражают инженеру А.Н. Трубину за помощь в оформлении рукописи.

# ГЛАВА ПЕРВАЯ

## ОБЩАЯ ЧАСТЬ

### 1.1. Параметры и переменные величины электрической машины. Термины и определения

Чрезвычайно широкая область применения электрических машин потребовала стандартизации основных понятий, характеризующих режимы работы электрической машины, определение параметров или проведение испытаний. Российские стандарты (ГОСТы) содержат более 200 терминов и определений в этой области. Приведем определения терминов, наиболее часто употребляемых в лабораторном практикуме.

*Номинальными данными* электрических машин называют основные энергетические показатели, параметры и переменные величины, характеризующие ее работу в режиме работы, для которого она предназначена заводом-изготовителем. К ним относят мощность, напряжение, род, частоту и силу тока, частоту вращения машины, коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент мощности, режим работы и ряд других. Номинальные данные указывают на ограничения в использовании электрической машины по условиям термической, электрической и механической прочности.

Термин «номинальный» применяют как к переменным, указанным в табличке паспортных данных, так и к величинам, не приведенным в паспортной табличке, но относящимся к её номинальному режиму. Например, номинальный вращающий момент, номинальное скольжение и др. Кроме номинальных величин в табличке паспортных дан-

ных указывается завод-изготовитель, год выпуска электрической машины, класс изоляции и др.

*Режим работы* электрической машины – установленный порядок чередования и продолжительности нагрузки, холостого хода, отключения, пуска, торможения и реверса (изменения направления вращения), определяющий выделение тепла в машине и её нагрев. Большинство выпускаемых промышленностью электрических машин имеет длительный режим работы S1, при котором допускается сколь угодно длительная их работа с режимными переменными, не превышающими номинальные величины. Классификация выделяет всего восемь режимов работы, обозначаемых знаками S1...S8 (изучаются в курсе электропривода).

С другой стороны, под режимом работы понимают характер преобразования энергии в электрической машине. В этом случае говорят о генераторном, двигательном режиме работы, режиме электромагнитного тормоза, динамического торможения, холостого хода, короткого замыкания.

*Номинальная мощность* – мощность, для работы с которой в номинальном режиме предназначена электрическая машина. Под номинальной мощностью всегда понимается отдаваемая полезная мощность машины.

Для трансформаторов и генераторов номинальной является отдаваемая электрическая мощность (мощность на выводах вторичной или якорной обмотки). Для электродвигателей номинальной является механическая мощность на валу. Для синхронных генераторов и трансформаторов эта мощность выражается в вольт-амперах [ВА] или киловольт-амперах [кВА], а для генераторов и двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей – в ваттах [Вт] или киловаттах [кВт].

*Номинальное напряжение и номинальный ток* – напряжение и ток машины или трансформатора, на которые они рассчитаны заводом-изготовителем при работе в номинальном режиме. Для трехфазных электрических машин и

трансформаторов в паспорте указывается *линейное напряжение*.

*Коэффициент мощности* машин переменного тока характеризует отношение активной мощности к её полной электрической мощности.

*Нагрузка* – мощность, которую развивает электрическая машина в рассматриваемый момент времени, выраженная в единицах выходной мощности или в процентах или долях номинальной мощности. Для автономных генераторов и трансформаторов нагрузку составляют подключенные к ним электроприёмники; для электродвигателя это рабочая или нагрузочная испытательная машина, присоединенная к её валу. Нагрузка может характеризоваться током машины, выраженным в процентах или долях номинального тока. Номинальная нагрузка – нагрузка, равная номинальной мощности машины.

*Параметрами электрических машин* являются активные и индуктивные сопротивления, собственные и взаимные индуктивности, индуктивности рассеяния и полные индуктивности обмоток, момент инерции. Параметрами являются коэффициенты перед независимыми переменными в уравнениях равновесия напряжения и уравнении движения электрической машины.

Вследствие разнообразия конструкций электрических машин и сложности математического описания электромагнитных и электромеханических процессов в статических и динамических режимах работы, параметров у электрической машины весьма много. Причем часть из них используется для описания и статических, и динамических режимов работы, как, например, активное сопротивление обмотки. Другая часть характеризует только один из них, как переходное сопротивление по продольной оси синхронной машины. Измерение или опытное определение параметров является важной составной частью испытаний

электрической машины и предметом изучения в лабораторном практикуме.

*Переменными величинами*, характеризующими энергетическое состояние электрической машины, являются токи в обмотках, электрические напряжения на разных элементах её конструкции, ЭДС обмоток, магнитный поток, вращающий момент, частота вращения и другие величины, изменяющие своё значение при изменении условий работы электрической машины.

Часть параметров и переменных величин поддается прямому измерению, другие определяются расчетным путем по результатам испытания электрической машины.

## **1.2. Виды испытаний электрических машин**

Как и другие изделия промышленности, электрические машины подвергаются при изготовлении различным испытаниям. Целью промышленных испытаний электрических машин является проверка их пригодности к предназначенной работе и оценка соответствия качества изделия предъявляемым требованиям. Лабораторные испытания проводятся с целью изучения характеристик электрических машин, раскрывающих их свойства, и определения параметров машин.

Виды промышленных испытаний электрических машин регламентируются ГОСТами. Для серийных электрических машин проводят следующие виды испытаний: приемочные, приемо-сдаточные, периодические, типовые, специальные и исследовательские испытания. Каждый вид испытаний проводится по утвержденным программам. Определение основных характеристик машины повторяется в испытаниях разного вида.

Лабораторные исследовательские испытания во многих случаях повторяют промышленные испытания, од-

нако нередко в них включают особые опыты, выходящие за рамки стандартных программ промышленных испытаний и позволяющие установить определенные закономерности взаимного влияния переменных величин машины.

Свойства электрических машин выявляют их характеристики, представляющие в графической или табличной форме закономерности такого взаимного влияния переменных. При проведении испытания электрических машин, студенту следует анализировать как получаемые характеристики электрических машин, так и методику проведения испытаний.

По технике выполнения испытания электрических машин разделяют на *испытания неподвижных машин* и *испытания вращающихся машин*.

По способу приведения электрических машин во вращение различают *испытания в режиме генератора* или тормоза, когда электрическая машина приводится во вращение каким-либо первичным двигателем, как правило, электрическим, и *испытания в режиме двигателя*, при которых машина подключается к источнику электроэнергии, отвечающему требованиям данного вида испытания.

В качестве приводного двигателя при испытаниях генератора могут использоваться электродвигатели любого типа, однако наиболее часто используются двигатели постоянного тока и асинхронные короткозамкнутые двигатели. Асинхронные двигатели отличаются низкой стоимостью, простотой управления и высокой стабильностью частоты вращения при проведении испытаний. Простота управления асинхронным двигателем позволяет студенту сосредоточить внимание на работе исследуемого генератора и испытательного оборудования, что очень важно в учебных целях. Двигатели постоянного тока применяют при необходимости регулирования частоты вращения машины при ис-

пытании. Номинальные данные приводных двигателей должны соответствовать задачам данного испытания.

В качестве источника электроэнергии при испытании электрической машины в двигательном режиме чаще всего используют специальную электрическую сеть лаборатории, где предусмотрены специальные меры электробезопасности (см. раздел 1.10).

Для нагружения генератора в опыте могут использоваться различные электроприемники, но обычно эту роль выполняют реостаты с плавным или ступенчатым регулированием сопротивления (регуляторы активной мощности) и электромашинные (индукционные) регуляторы тока (регуляторы реактивной мощности). Номинальные ток и мощность таких регуляторов должны быть согласованы с соответствующими номинальными данными генератора и задачами эксперимента.

### **1.3. Способы и устройства нагружения электрических машин**

Многие испытания двигателей сопровождаются регулированием его нагрузки (мощности на валу). Этим целям служат так называемые *нагрузочные устройства*. Для машин малой и средней мощности наиболее часто используются нагрузочные устройства на базе генераторов постоянного тока параллельного или независимого возбуждения. Для микромашин используются специальные нагрузочные тормоза электромагнитного или механического типа.

Испытания электрической машины потребуют затрат электроэнергии энергии, которая может поглощаться самой испытываемой машиной или передаваться через нее внешним устройствам. К испытаниям без значительных затрат энергии относятся опыты холостого хода и короткого замыкания генераторов; к энергозатратным испытаниям с отда-

чей энергии внешним устройствам относятся опыты по определению внешних, регулировочных и рабочих характеристик. Промежуточное положение занимают испытания генераторов переменного тока и трансформаторов при реактивной нагрузке, когда машина нагружается реактивным током, сопоставимым с номинальным током машины, без больших затрат механической и активной электрической мощности.

Испытания с отдачей энергии подразделяют на испытания *с безвозвратным поглощением энергии*, когда вся отдаваемая машиной энергия поглощается в нагрузочных устройствах – реостатах (для генераторов) или тормозах (для двигателей), и испытания *с возвратом энергии*, когда потребляемая при испытании энергия за вычетом потерь возвращается источнику энергии (в питающую сеть). Испытания с возвратом энергии требуют применения сложного оборудования, что часто нежелательно в учебных лабораториях, поскольку затрудняет понимание электромагнитных и электромеханических процессов в испытываемой машине. С другой стороны, устройства с возвратом энергии потребляют меньше электроэнергии и потому экономичнее. Важное значение имеет воспитание студентов в духе бережного отношения к энергии.

### *Нагрузочные устройства без возврата энергии*

Наиболее простым способом нагружения генераторов является включение его на нагрузочный резистор с регулируемым или нерегулируемым сопротивлением. Для генераторов переменного тока широко применяются регулируемые индуктивные сопротивления, нагружающие генератор реактивным током.

Регулируемую нагрузку двигателей без возврата энергии создают тормозными устройствами различного принципа действия. Для микродвигателей применяют про-

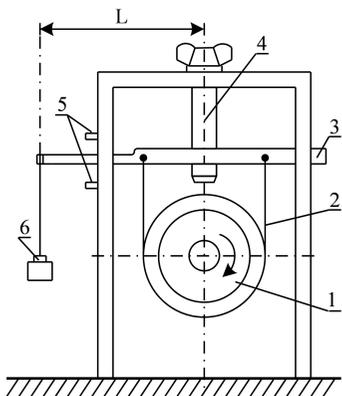


Рис.1.1. Ленточный тормоз: 1- полый шкив; 2- лента; 3- рычаг; 4- винт; 5- ограничитель; 6- груз

стые *колодочные* или *ленточные* (рис.1.1) тормоза, где регулирование нагрузки производится изменением силы трения с помощью прижимных или натягивающих устройств. Достоинством этих тормозных устройств является простота конструкции, а недостатком - низкая стабильность работы, т.е. сложность поддержания

постоянной нагрузки в процессе испытания даже в пределах времени, необходимого для записи показаний измерительных приборов.

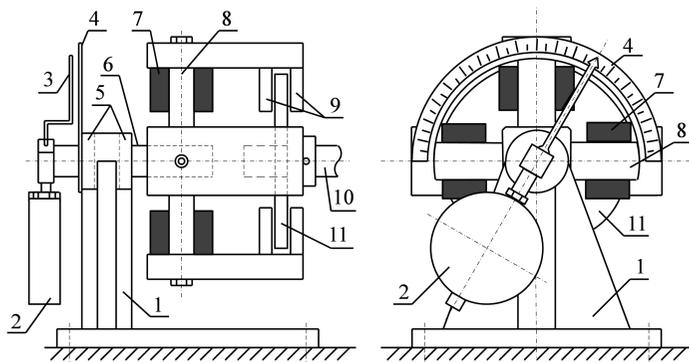
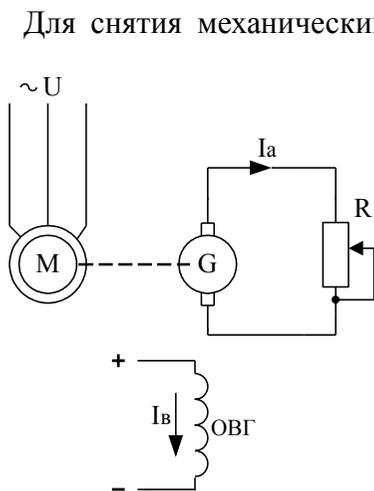


Рис.1.2. Электромагнитный тормоз: 1-стойка; 2-груз; 3-стрелка; 4-шкала; 5-шариковые подшипники; 6-ось электромагнита; 7-обмотка электромагнита; 8-электромагнит; 9-полюсные наконечники электромагнита; 10-вал испытуемого двигателя; 11-металлический диск

Значительно более удобными в работе являются *электромагнитные* тормоза (рис.1.2). Принцип действия их основан на тормозящем действии вихревых токов, наводимых при вращении в магнитном поле электромагнита в металлическом (стальном, медном или алюминиевом) диске, закрепленном на валу испытуемого электродвигателя. Вихревые токи при взаимодействии с магнитным полем электромагнита создают тормозной момент, передаваемый на вал двигателя. Равный ему крутящий момент прикладывается к конструкции электромагнита, благодаря чему последний отклоняется на угол, при котором крутящий момент уравновешивается моментом массивного маятника, жестко соединенного с электромагнитом. О величине момента судят по углу отклонения маятника. Регулирование момента на валу испытываемого двигателя производится изменением тока электромагнита. Для измерения начального пускового момента двигателя предусматривается возможность прямого механического (жесткого) соединения валов диска и конструкции электромагнита с маятником.



Для снятия механических характеристик двигателей постоянного тока и асинхронных машин средней мощности в двигательном режиме в качестве нагрузочной машины чаще всего используются генераторы постоянного тока независимого или параллельного возбуждения (рис.1.3). Номинальная мощность генератора должна быть несколько большей, чем у испытываемого двигателя, по-

Рис.1.3. Схема нагрузки двигателя или генератора без возврата энергии 14

скольку нагружать вал необходимо в большом диапазоне при большом диапазоне изменения частоты вращения. Электромагнитный момент  $M$ , развиваемый генератором постоянного тока, пропорционален току якоря  $I_a$  и магнитному потоку  $\Phi$  ( $M = kI_a\Phi$ ).

Магнитный поток ненасыщенной машины в первом приближении можно считать зависящим только от тока возбуждения (пренебрегаем влиянием реакции якоря). При этом момент будет прямо пропорциональным току якоря и, регулируя последний реостатом  $R$ , можно соответствующим образом регулировать момент генератора. При жестком соединении валов испытываемого двигателя и нагрузочного генератора, согласно закону сохранения энергии, в установившемся режиме имеет место равновесие моментов, при котором момент двигателя численно равен моменту нагрузочного генератора. Измеряя момент генератора, определяют тем самым величину момента двигателя.

### Нагрузочные стенды с возвратом энергии

Возврат источнику части энергии, передаваемой через испытываемую машину, позволяет эффективно решить ряд задач, главными из которых являются сокращение затрат электроэнергии на испытание (энергосбережение) и улучшение микроклимата в испытательной лаборатории за счет исключения нагрузочных устройств нагревательного типа.

Принцип действия большинства устройств с возвратом электроэнергии источнику основан на многократном преобразовании энергии из электрической в механическую и обратно, и параллельной работе нагрузочного генератора с источником. Состав и схемы устройств возвратной работы отличаются большим многообразием. Выбор схемы определяется требованиями к регулированию частоты вращения испытываемой машины.

Разновидностью схем возвратной работы являются схемы *взаимной нагрузки* электрических машин, где одна

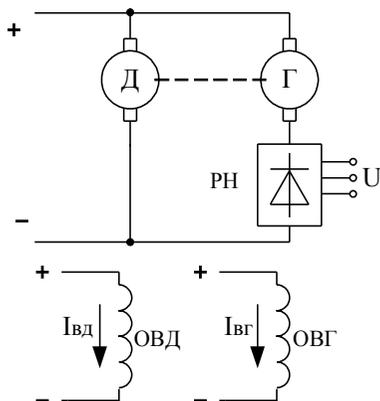


Рис.1.4. Схема взаимного нагружения электрических машин (модернизированная схема Хетчинсона)

машина, работая в режиме двигателя, отдает энергию нагрузочному генератору, который, в свою очередь, вырабатываемую электрическую энергию передает указанному двигателю.

Приток энергии извне требуется только на покрытие потерь энергии в обеих машинах. Наиболее удобной для учебных лабораторий является модернизированная схема Хетчинсона (рис.1.4), разработанная на кафедре электрических машин и электропривода Кубанского госагроуниверситета и широко применяемая в учебных лабораториях кафедры.

В нее входят, кроме испытуемого двигателя постоянного тока Д, нагрузочный генератор постоянного тока Г, регулятор напряжения (РН) с полупроводниковым выпрямителем и трансформатором гальванической развязки выпрямителя и питающей сети трехфазного тока (U), включенный последовательно в цепь якоря генератора, а также общий для всей учебной лаборатории источник постоянного тока (сеть постоянного тока). Регулирование нагрузки двигателя осуществляется изменением напряжения на регулируемом выпрямителе РН, а электрическая мощность генератора передается испытываемому двигателю.

Подобная схема может применяться для испытаний двигателей переменного тока (синхронных и асинхронных), которые подключаются к источнику трех-

фазного напряжения. В этом случае электроэнергия нагрузочного генератора передается в питающую сеть постоянного тока лаборатории. При этом последняя должна иметь электроприемники, использующие эту энергию, или инверторы, передающие электрическую энергию из сети постоянного тока в трехфазную сеть.

#### **1.4. Регулирование напряжения при испытаниях**

При проведении испытаний электрических машин часто требуются источники регулируемого трехфазного напряжения. В качестве таких источников наиболее часто используются *трехфазные регулируемые автотрансформаторы, индукционные регуляторы* напряжения или полупроводниковые регуляторы напряжения. Последние применяются при малом диапазоне регулирования напряжения, поскольку при глубоком регулировании напряжения они не обеспечивают приемлемого качества электроэнергии (синусоидальности напряжения), что отражается на результатах испытаний.

Принцип действия однофазных регулируемых автотрансформаторов реализован в широко известном лабораторном автотрансформаторе (ЛАТР). В трехфазном регулируемом автотрансформаторе скользящие контакты (щетки) параллельно перемещаются по трем обмоткам трехфазного стержневого трансформатора. Такие регуляторы напряжения снабжаются ручным приводом с поворотной рукояткой и червячным редуктором.

Индукционный регулятор мощностью до 10 кВА изготавливают на базе серийного фазорегулятора ФРО (фазорегулятор обдуваемый). Конструктивно индукционный регулятор представляет собой асинхронную машину с фазным ротором, снабженную устройством регулирования положения ротора относительно статора и удержания ротора

в этом положении (затормаживания). Как разновидность асинхронной машины с заторможенным ротором индукционный регулятор изучается в лабораторном практикуме курса «Электрические машины».

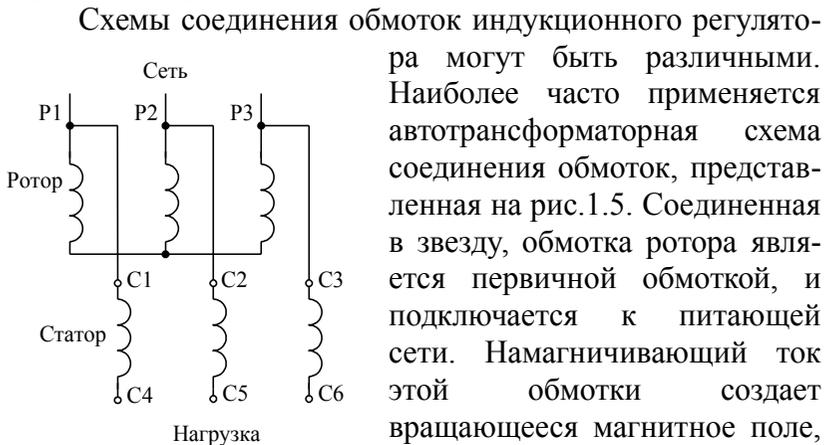


Рис.1.5. Схема соединения обмоток индукционного регулятора напряжения

При изменении углового положения ротора изменяется начальная фаза ЭДС обмотки статора, вследствие чего изменяется выходное напряжение регулятора (на зажимах С4, С5, С6), являющееся векторная сумма напряжения сети и ЭДС обмотки статора.

Диапазон регулирования выходного напряжения регулятора зависит от коэффициента трансформации машины. Обычно он близок к единице и напряжение регулируется от нуля до двойного напряжения сети.

Если характеристики индукционного регулятора неизвестны, перед его применением целесообразно провести предварительное пробное включение регулятора при холостом ходе, во время которого определить диапазон регулирования напряжения и отметить на шкале углового положе-

ния ротора позиции, соответствующие минимальному и максимальному значению выходного напряжения.

Индукционный регулятор легко трансформируется в *регулируемое индуктивное сопротивление*, используемое для нагружения синхронного генератора или трансформатора реактивным током.

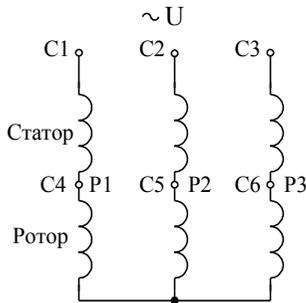


Рис.1.6. Схема соединения обмоток регулируемого индуктивного сопротивления

Для этого обмотки машины включаются, как показано на рис.1.6. Общее реактивное сопротивление обмоток определяется сопротивлениями самоиндукции и взаимоиндукции обмоток статора и ротора. Изменение величины результирующего индуктивного сопротивления достигается изменением взаимного положения магнитных осей фазных обмоток статора и ротора и

происходит за счет изменения коэффициента взаимоиндукции.

## 1.5. Измерение электрических величин

Подробно вопросы измерения электрических и неэлектрических величин электроизмерительными приборами на электротехнических факультетах изучаются дисциплиной «Метрология». Здесь приводятся лишь общие рекомендации по использованию измерительных приборов при проведении испытаний электрических машин.

Измерение *силы тока и напряжения* производится амперметрами и вольтметрами. Для испытаний электрических машин в учебных лабораториях достаточно точными считаются измерительные приборы класса точности 1,5.

При выборе измерительных приборов по номинальному значению измеряемой величины необходима исходная информация о пределах ее изменения при испытании. Это предполагает предварительный анализ особенностей электрических машин или проводимого испытания. Так, для машин постоянного тока общепромышленных серий номинальное значение тока возбуждения может не указываться в паспортных данных машины. При этом следует иметь в виду, что ток возбуждения параллельной (шунтовой) обмотки составляет 2-5 % от номинального тока машины при напряжении равном ее номинальному напряжению, а ток последовательной (серийной) обмотки равен току якоря при напряжении 2-5 % от номинального. Источником информации могут быть паспортные данные испытываемой машины или трансформатора, а также методические рекомендации по проведению испытания.

При выборе амперметров и вольтметров нужно быть внимательным к определению рода тока измеряемой величины и диапазона допустимых частот для приборов переменного тока.

Измерение *мощности постоянного тока* производят методом амперметра и вольтметра путем умножения измеренных значений тока и напряжения. Для повышения точности измерения напряжения, оно должно производиться непосредственно на клеммах машины, чтобы на погрешность измерения не влияли коммутационные аппараты, проводники и другие измерительные приборы.

Измерение *активной мощности* в цепях переменного тока производят ваттметрами прямого включения или с использованием измерительных трансформаторов и добавочных резисторов. Наличие измерительных трансформаторов и добавочных сопротивлений в цепи вольтметра или обмотки напряжения ваттметра также должно учитываться при определении значения измеряемой мощности.

Наиболее удобными для производства измерений являются так называемые измерительные комплекты – переносные комбинированные измерительные приборы К-50, К-51, К-505 и К-506, объединяющие в своей конструкции амперметр, вольтметр и ваттметр, а приборы К-51 и К-506 еще и варметр, позволяющие производить измерения соответствующих величин в каждой фазе. Подключение этих комплектов в цепь очень просто, а вероятность ошибки при сборке схем значительно ниже, чем при включении группы отдельных измерительных приборов. Приборы имеют широкий диапазон измерений.

Прибор К-505 имеет три многопредельных прибора: амперметр, вольтметр и ваттметр. Он позволяет измерять при прямом включении (без измерительных трансформаторов) ток до 10 А, напряжение до 600 В и активную мощность до 6 кВт. Прибор имеет переключатель фаз, позволяющий производить последовательные измерения величин во всех трех фазах без разрыва электрической цепи и, соответственно, без отключения электроустановки. Амперметр регистрирует *линейный* ток в фазе включения прибора, вольтметр – *фазное* напряжение, ваттметр – *фазную* мощность в фазе. При подключении к прибору обмоток электрической машины или трансформатора, соединенных звездой, показания приборов будут соответствовать фазным величинам; при соединении треугольником для определения фазного тока (в плече треугольника) при симметричной нагрузке показания амперметра необходимо разделить на  $\sqrt{3} = 1,73$ , а фазного напряжения – показания вольтметра умножить на 1,73.

Переключатели пределов измерения приборов сопровождаются таблицами пределов измерения и цены деления приборов. Пределы измерения выбирают так, чтобы сами измерения производились в правой половине шкалы прибора.

Для защиты прибора от больших пусковых токов и возможных перенапряжений, при включении и выключении электроустановки приборы переключают в положение измерения максимальных величин и переключатель фаз в положение отключения приборов.

Измерение реактивной мощности  $Q$  производят варметрами в составе измерительных комплектов (К-51, К-506). При использовании других приборов измерение реактивной мощности производят расчетом после измерения активной  $P$  и определения полной мощности  $S$ :

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} .$$

Полная и активная мощности определяют также значение коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ )

$$\cos\varphi = P/S.$$

## **1.6. Измерение омических сопротивлений обмоток**

Омические сопротивления обмоток электрических машин и трансформаторов могут быть измерены омметрами, измерительными мостами или измерены методом амперметра и вольтметра на постоянном токе.

При выборе омметров следует обратить внимание на диапазон их измерений сопротивления, имея ввиду, что основные обмотки электрических машин и трансформаторов, такие как якорная, обмотка последовательного возбуждения, трехфазная статорная, обмотки трансформатора и др. имеют сопротивления, измеряемые долями или единицами Ом, а обмотки параллельного возбуждения машин постоянного тока – сотнями Ом.

При измерении сопротивления методом амперметра и вольтметра на постоянном токе рекомендуются две схемы

включения измерительных приборов (рис. 1.7), предназначенные для измерений сопротивлений в разном диапазоне. Для сопротивлений измеряемых долями или единицами Ом применяется схема на рис. 1.7.а. Для измерений больших сопротивлений применяют схему 1.7.б. В обоих случаях для определения сопротивлений используют закон Ома

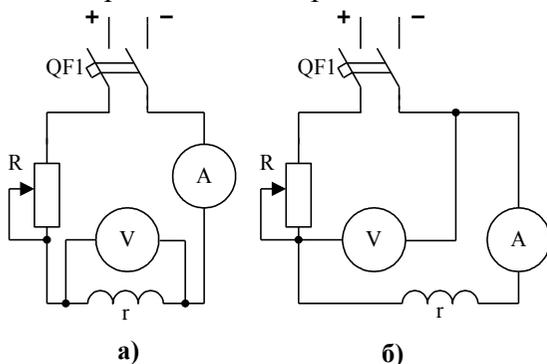


Рис. 1.7. Схемы измерения омических сопротивлений

$$r = \frac{U}{I},$$

Где  $U$  и  $I$  – измеряемые напряжение и ток.

При измерении сопротивления обмоток электрических машин и трансформаторов величину постоянного

тока, протекающего по обмотке, устанавливают не выше половины от номинального, чтобы обмотка не перегревалась. Обычно делают три замера при разных токах, а за истинное принимают среднее арифметическое значение измеряемого сопротивления.

При измерении сопротивлений обмоток трехфазных машин или трансформаторов не всегда есть возможность присоединения измерительных приборов к обмотке, сопротивление которой подлежит измерению. Если трехфазная обмотка имеет шесть выводов или при соединении в звезду имеет четыре вывода (три фазных и один нулевой), то возможно определение сопротивления постоянному току каждой отдельной фазной обмотки.

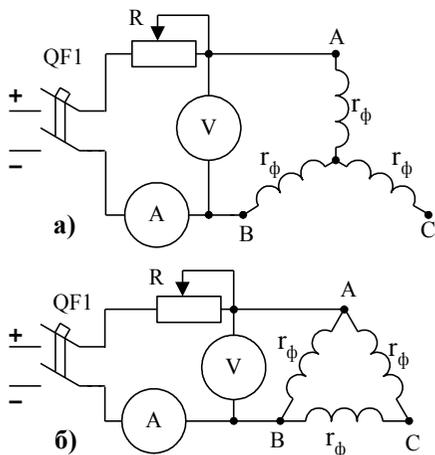
Если обмотка соединена звездой с тремя выведенными концами (рис. 1.8.а) и нулевая точка звезды недоступна, то измеряют сопротивление двух последовательно со-

единенных фазных обмоток, подводя питание к началам этих обмоток: АВ, ВС или СА.

В трехфазных машинах и трансформаторах фазные обмотки выполняются симметричными с мало отличающимися сопротивлениями, поэтому часто можно ограничиться измерением сопротивления обмоток на основании одного измерения сопротивления пары обмоток, например  $r_{AB}$ . Сопротивление фазной обмотки определяется как половина от сопротивления двух обмоток  $r_{\phi} = 0,5r_{AB}$ . При желании более точного определения сопротивлений производят измерения сопротивлений всех пар фазных обмоток  $r_{AB}$ ,  $r_{BC}$ ,  $r_{CA}$ , а сопротивление фазной обмотки определяют как среднее значение по формуле:

$$r_{\phi} = \frac{r_{AB} + r_{BC} + r_{CA}}{6}.$$

Если обмотка соединена треугольником и на зажимы выведены три проводника, то для измерения сопротивления питание подводят к двум из трех зажимов (рис. 1.8.б). При



этом измеряют общее сопротивление двух параллельных ветвей, состоящих из одной фазной обмотки и двух последовательно соединенных фазных обмоток. Сопротивление фазной обмотки определяется по формуле:

$$r_{\phi} = 1,5r_{AB}.$$

Рис.1.8. Схемы измерения сопротивлений трёхфазных обмоток, соединённых: а - звезда без нулевого вывода; б - треугольник

При необходимости повышения точности измерения сопротивления производят измерения для всех трех комбинаций подключения напряжения к обмоткам и измеряют  $r_{AB}$ ,  $r_{BC}$ ,  $r_{CA}$ . В этом случае сопротивление фазной обмотки определяют как среднее

$$r_{\phi} = \frac{r_{AB} + r_{BC} + r_{CA}}{2}.$$

Известно, что омическое сопротивление проводников зависит от его температуры. Если производят измерение сопротивления обмотки в холодном состоянии электрической машины или трансформатора, то температуру обмотки принимают равной температуре окружающего воздуха  $t$ . Расчетной рабочей температурой для обмоток электрических машин и трансформаторов принимается температура  $75^{\circ}\text{C}$ , к которой должны быть приведены сопротивления обмоток, измеренные при температуре  $t$ . Для обмотки из меди приведение выполняется по формуле:

$$r_{75} = r_t \frac{235 + 75}{235 + t}.$$

Для обмотки из алюминия вместо числа 235 в формулу подставляют число 245.

Сопротивление постоянному току называют омическим в отличие от сопротивления переменному току, которое обычно называют активным. Активное сопротивление больше омического в 1,01-1,05 раз, что объясняется неравномерным распределением плотности тока в проводнике при протекании переменного тока. Активное сопротивление обмотки может быть определено умножением омического сопротивления на коэффициент  $k_r = 1,01 \dots 1,05$ :  $r_a = (1,01 \dots 1,05) \cdot r$ .

Для обмотки, расположенной в пазах ротора глубокопазной электрической машины значение коэффициента  $k_r$

может значительно превышать 1,05, достигая значений до 3,0.

### 1.7. Измерение вращающего момента

При использовании для нагружения двигателя электромагнитного тормоза, величину момента определяют по углу отклонения его маятника (см. раздел 1.3 и рис. 1.2). Для этих целей маятник тормоза снабжается специальной шкалой, отградуированной в единицах измерения крутящего момента (Нм). В этом случае имеет место непосредственное измерение момента.

Непосредственное (прямое) измерение крутящего момента испытываемой машины производят также при использовании в качестве нагрузочных *балансирных (динамометрических)* электрических машин (рис. 1.9), отличающихся от обычных машин только тем, что их статор (корпус) не закрепляется жестко на основании или фундаменте, а вал опирается на специальные подшипники в

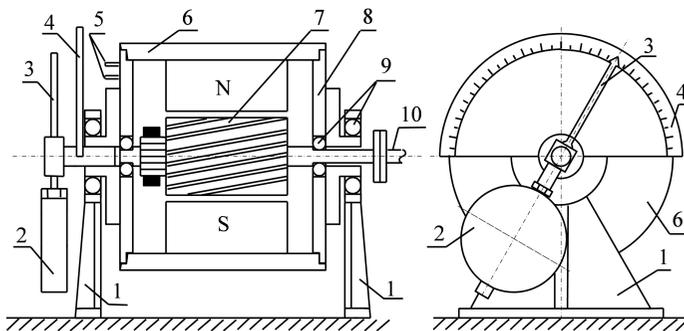


Рис.1.9. Электродинамический тормоз: 1-стойки; 2-груз; 3-стрелка; 4-шкала; 5-ограничивающие упоры; 6-станина тормоза; 7-якорь тормоза; 8-подшипниковые щиты; 9-шариико-вые подшипники; 10-вал испытуемого двигателя

отдельно стоящих стойках, благодаря чему статор может отклоняться под действием крутящего момента на угол, при котором этот электромагнитный момент уравнивается моментом прикрепленного к статору массивного маятника. Согласно закону Ньютона, крутящие моменты, действующие на статор и ротор машины, в установившемся режиме находятся в равновесном состоянии, т.е. равны по величине. Балансирная машина может работать как в генераторном, так и в двигательном режиме. В качестве балансирной может выступать машина постоянного или переменного тока любого принципа действия.

Для определения момента часто используют косвенные измерения. Наибольшее распространение получил метод тарированной машины, когда для измерения момента измеряют ток якоря нагрузочного генератора. При этом момент определяют по графикам зависимости момента от измеренного тока (моментная характеристика или тарировочная кривая). Для генераторов независимого возбуждения с ненасыщенной магнитной системой моментная характеристика представляет собой практически линейную зависимость, отражающую известное соотношение

$$M = C\Phi I_a,$$

где  $C$  – машинная постоянная;

$\Phi$  – магнитный поток;

$I_a$  – ток якоря генератора.

Для машин других типов моментная или тарировочная характеристика имеет более сложный характер, но в любом случае предполагается известным соотношение между моментом и током якоря нагрузочной машины.

При использовании в качестве нагрузочной машины асинхронного генератора тарирование производят в функции частоты вращения и напряжения на его зажимах.

## 1.8. Измерение частоты вращения

Для измерения частоты вращения электрических машин используются весьма разнообразные методы, среди которых наибольшее распространение получили следующие.

Способ *тахогенератора с вольтметром* заключается в использовании специальной электрической микромашины, непосредственно соединенной с валом испытываемой машины. При изменении частоты вращения тахогенератора практически пропорционально изменяется его ЭДС, которая фиксируется вольтметром. Определение частоты вращения или скорости производится по тарировочным кривым  $\Omega, n = f(U)$ .

Разновидностью этого способа может считаться закрепление на вращающемся валу постоянного магнита, в магнитном поле которого располагается индукционная катушка. При увеличении частоты вращения увеличивается частота и амплитуда ЭДС в катушке, причем последняя может быть измерена вольтметром.

При использовании *цифрового тахометра* на вращающийся вал машины надевают зубчатое стальное колесо, зубцы которого, похожие на зубцы шестерни, проходят при вращении зону считывающей магнитной головки прибора. Прибор считывает количество зубцов, пересекающих зону магнитной головки за эталонное время, и преобразует эту информацию в скорость (частоту) вращения с представлением её на цифровом индикаторе.

*Стробоскопический метод* предполагает использование для измерения скорости эффекта, весьма близкого к эффекту, используемому в кинематографе, когда изображение передается с киноплёнки на экран быстро чередующи-

мися световыми импульсами, а вследствие известной инерционности нашего зрения изображение на экране выглядит непрерывным. *Строботаксометры* представляют собой прибор для генерирования световых импульсов регулируемой частоты. На вращающееся тело наносят метку и освещают ее лампой *стробоскопа*. Регулируя частоту импульсов, добиваются того, чтобы вращающаяся метка выглядела неподвижной, что происходит при синхронизации частоты импульсов и частоты вращения тела. Частота вращения тела определяется по шкале строботаксометра.

### **1.9. Измерение скольжения асинхронных машин и угла нагрузки синхронных машин**

В тех случаях, когда необходимо измерить скольжение асинхронного двигателя в области малых значений, методы, основанные на измерении скорости, дают большую погрешность. Более точные измерения скольжения в таких случаях дает стробоскопический способ, который состоит в следующем. На торце вращающегося вала делают метку краской или мелом или закрепляют разграфленный диск. При вращении торец освещают газоразрядной лампой, мигающей с частотой тока источника питания двигателя или с двойной частотой (биполярный). Для повышения контрастности изображения используют источники света с узкими импульсами.

Если метка вращается с частотой равной частоте тока сети (при числе пар полюсов  $p=1$ ), она будет выглядеть как неподвижная. При  $p>1$ , вместо одной нарисованной метки будет наблюдаться  $p$ -лучевая звезда.

При скорости ниже синхронной метка будет вращаться в сторону, противоположную истинному направлению вращения машины и по частоте вращения этой метки, которая подсчитывается визуально, рассчитывается ис-

комое скольжение. Определение скольжения  $s$  при этом производится по формуле:

$$s = \frac{N \cdot p}{t \cdot f_1},$$

где  $N$  – число оборотов метки за время  $t$ , (с);  $f_1$  – частота тока сети, (Гц);  $p$  – число пар полюсов машины (число лучей метки). Скольжение определяется в относительных единицах.

При скорости выше синхронной  $p$ -лучевая метка вращается в направлении вращения машины, скольжение принимает отрицательное значение и определяется по формуле:

$$s = -\frac{N \cdot p}{t \cdot f_1}.$$

При испытаниях синхронных машин в качестве основного параметра нагружения используется так называемый угол нагрузки  $\Theta$  (буква греческого алфавита «тэтта»). Для его измерения в установившихся режимах также используют стробоскопический метод.

В синхронном режиме одному периоду тока соответствует  $1/p$  оборота ротора. Освещаемая метка выглядит как неподвижная  $p$ -лучевая звезда, но при изменении активной мощности (нагрузки) изменяется её угловое положение на угол, равный измеряемому углу нагрузки. Угол нагрузки измеряется по шкале, отградуированной в геометрических или электрических градусах (1 град. геом. =  $p$  град. электр.)

Такие явления, как процесс синхронизации машины и выпадение из синхронизма (переход машины из синхронного в асинхронный режим), можно наблюдать по поведению метки. В первом случае из вращающейся метка становится неподвижной, что обычно сопровождается

несколькими периодами затухающих колебаний метки; во втором из неподвижного состояния приходит во вращение.

### 1.10. Установка щеток на геометрическую нейтраль

В машинах постоянного тока щетки как правило располагаются на линии геометрической нейтрали. Конструкция траверсы и щеткодержателя серийных машин позволяют перемещать щетки в обоих направлениях от линии геометрической нейтрали на некоторый угол и при настройке машины после ремонта или профилактических работ следует установить щетки в нужное положение. Применяются несколько методов установки щеток на линии геометрической нейтрали. Наиболее эффективный из них –

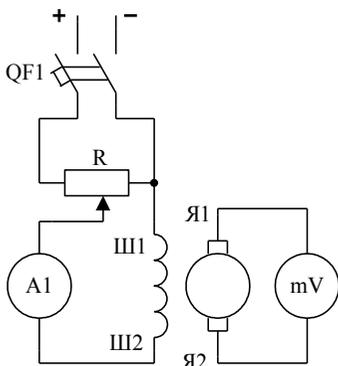


Рис.1.10. Схема для установки щеток на геометрическую нейтраль индуктивным методом

индуктивный метод, реализуемый при неподвижной машине (рис.1.10).

Индуктивный метод основан на том, что при расположении щеток на геометрической нейтрали изменения магнитного потока возбуждения не наводят ЭДС в неподвижном якоре (т.е. отсутствует трансформаторная ЭДС).

К щеткам присоединяют чувствительный вольтметр или гальванометр с нулем в середине шкалы, а в цепь независимой обмотки возбуждения включают коммутационный аппарат (рубильник) QF. При включении и выключении обмотки возбуждения наблюдают за показа-

ниями измерительного прибора  $mV$ . Кратковременное отклонение стрелки при включениях и выключениях обмотки возбуждения свидетельствует о смещении щеток с линии геометрической нейтрали. В этом случае, путем малых перемещений траверсы и щеток с последующим повторением опыта, добиваются того, чтобы при коммутациях в цепи обмотки возбуждения стрелка прибора не отклонялась. Если перемещение щеток приводит к увеличению угла отклонения стрелки, то это означает, что направление перемещения щеток выбрано неверно и его следует изменить.

После установки щеток на линии геометрической нейтрали изменяют положения якоря и повторяют опыт, что устраняет возможное влияние на результаты опыта побочных факторов.

Для проверки расположения щеток на линии геометрической нейтрали может применяться *метод двигателя*, который реализуется несколькими способами, из которых наиболее прост следующий. Двигатель запускают при холостом ходе и фиксируют частоту вращения. Затем изменяют направление вращения двигателя изменением направления тока якоря и при неизменных возбуждении и напряжении на якоре снова фиксируют частоту вращения. Совпадение частоты вращения свидетельствует о нормальном расположении щеток. Метод менее точен в сравнении с индуктивным.

### **1.11. Техника безопасности в лаборатории электрических машин**

Учебные электротехнические лаборатории должны иметь средства тушения пожара и оказания первой медицинской помощи.

На первом вводном занятии студенты изучают правила техники безопасности, с ними проводится инструктаж по электробезопасности с последующей проверкой его усвоения, о чем составляется акт, подписываемый преподавателем, проводившем инструктаж, и каждым студентом.

При работе в учебной лаборатории необходимо руководствоваться инструкциями по технике безопасности, учитывающими все специфические особенности лаборатории, такие как наличие высокого напряжения, нескольких независимых источников электроэнергии и легкодоступных для прикосновения токоведущих частей электроустановок, подъемно-транспортных машин, и т.п. Источники опасности в лаборатории электрических машин можно условно разделить на три группы: опасность поражения электрическим током; опасность, исходящая от вращающихся механических частей испытательного оборудования; прочие опасности, в число которых входит опасность травматизма вследствие тесноты помещения, наличия громоздкого оборудования и лабораторной мебели, пожарная и иная опасность.

Учебные электротехнические лаборатории должны обеспечиваться предусмотренными нормами и правилами техническими средствами электробезопасности, включая использование разделительного трансформатора, трехфазной сети с изолированной нейтралью пониженного напряжения 220 В, приборов контроля сопротивления изоляции токоведущих частей относительно заземленных частей здания, защитное ограждение заземленных частей конструкции здания, как трубопроводы водоснабжения, отопления и др. Испытательные стенды должно иметь защиту автоматическими выключателями и иными техническими средствами от аварийных и аномальных режимов работы оборудования. Вместе с тем, никакие технические средства защиты не гарантируют полной электробезопасности персонала. От испытателя всегда требуется соблюдение

правил безопасного поведения при выполнении работ в лаборатории.

В лаборатории электрических машин нельзя находиться в отсутствие преподавателя или лица, ответственного за состояние безопасности лаборатории.

В лаборатории студенту следует находиться в рабочей зоне, указанной преподавателем. С самого начала необходимо убедиться в том, что испытательный стенд находится в полностью отключенном состоянии; в противном случае должно быть обращено внимание персонала лаборатории и находящихся в ней людей на наличие электрического напряжения на оборудовании. Контроль отключенного состояния оборудования осуществляется по индикаторам, по положению рукоятки выключателей источников питания и показаниям соответствующих измерительных приборов.

Все испытания проводятся бригадами численность не менее двух человек. Перед сборкой стенда необходимо получить вводные инструкции преподавателя и внимательно ознакомиться с описанием испытательной установки и её оборудованием. Проверяется наличие ограждений на вращающихся частях и исправность присоединительных клемм и соединительных проводников.

При выполнении электрических соединений при сборке схемы испытательного стенда необходимо правильно подобрать проводники и рационально расположить их на стенде. Сечение проводников должно соответствовать силе тока, а длина не быть слишком маленькой или большой. Прокладывать проводники следует так, чтобы они не мешали проведению испытания и считыванию показаний приборов. Под один зажим, как правило, не должно присоединяться более двух проводников. При использовании разветвленной электрической схемы вначале выполняю соединения в главной цепи (как правило, это цепь с максимальным током), последовательно соединяя аппараты, приборы и обмотки машин, согласно схемы соединения, а

затем присоединяют вспомогательные, параллельные и слаботорочные цепи.

После сборки схемы необходимо получить у преподавателя разрешение на пробное включение, которое должно проходить с участием преподавателя после проверки им правильности сборки схемы испытательной установки. При пробном включении необходимо понаблюдать за поведением установки для выявления возможных неисправностей оборудования и ошибок сборки схемы. При обнаружении признаков неисправности как появление искрения, дыма, специфического запаха, аномальных показаний измерительных приборов и т.п., следует немедленно отключить все источники электроэнергии стенда и сообщить о своих наблюдениях преподавателю. При первом включении определяют, также, полярность или чередование фаз подключения измерительных приборов, а также направление вращения машин. При необходимости их изменяют, чтобы привести в соответствии с требуемыми. Любые изменения в электрической схеме стенда производят после полного отключения оборудования и остановки всех машин.

Каждое последующее включение оборудования производится после сигнала всем присутствующим при испытании, требующего от них повышенного внимания к безопасности.

Сразу после окончания испытания стенд отключают. В ходе занятия включенное электрооборудование нельзя оставлять без присмотра.

На испытательном стенде не должны находиться посторонние предметы, сумки, папки для бумаг, не используемые проводники и измерительные приборы. Запись показаний приборов должна производиться за столом или с использованием специальных подставок. Использовать для этой цели части работающего лабораторного оборудования запрещается.

Запрещается прикасаться к проводникам и клеммам при поданном на оборудование напряжении. При использовании реостатов, регуляторов и другого оборудования следует касаться только специальных рукояток или штурвалов, соблюдая при этом осторожность.

Во избежание травм от вращающихся частей, последние должны иметь ограждение, а в одежде работающих должны быть исключены все детали одежды, которые могут наматываться на вращающиеся части оборудования, т.е. шарфы, косынки, галстуки без заколок, а длинные волосы должны быть подобраны под головной убор.

При возникновении реальной опасности травматизма для кого-либо из присутствующих, участники испытания должны произвести немедленное отключение лаборатории от всех источников электроэнергии выключением вводного автомата на щитах питания лаборатории. В других случаях подходить к щитам и производить операционные переключения студентам запрещается.

Во избежание травм от падения, хождение студентов по лаборатории должно быть сведено к минимуму, необходимому для общения с преподавателем.

## ГЛАВА ВТОРАЯ

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

#### 2.1. Основные характеристики электрических машин

Основные свойства электрических машин проявляются в их *характеристиках*, отражающих основные закономерности во взаимном влиянии основных переменных величин в определенных условиях работы машины. В некоторых случаях характеристики устанавливают взаимосвязь только двух переменных, одна из которых условно считается независимой, а другая - зависимой переменной. Независимой обычно считают ту переменную, которая поддается прямому регулированию в процессе испытания. Часто при изменении одной независимой переменной интерес представляет характер зависимости от нее сразу нескольких величин.

Как правило, для выявления функциональной зависимости двух переменных величин, остальные переменные искусственно стабилизируют, чтобы сделать неизменным их влияние на исследуемые переменные. В этом случае, за стабилизированными величинами закрепилось название – *параметры электрической машины в опыте*, хотя, при более точном определении, параметрами является коэффициенты в основных уравнениях машины. Методы проведения ряда наиболее важных испытаний определены в государственном стандарте ГОСТ 11828-86 «Машины электрические. Общие методы испытаний». В других случаях используются частные методики проведения испытания.

По признаку схожести основных характеристик можно выделить два класса электрических машин: возбужда-

емые постоянным током и возбуждаемые трехфазным током. К первым относятся синхронные машины и машины постоянного тока, имеющие якорную обмотку переменного тока, и обмотку возбуждения, обтекаемую постоянным по роду током. К числу вторых относятся асинхронные машины и трансформаторы. Физическая сущность процессов в каждой группе электрических машин близка по природе, вследствие чего близки и характеристики этих машин. В некоторых характеристиках проявляются общие свойства всех индуктивных электрических машин. К таковым относятся, например, рабочие характеристики.

## 2.2. Характеристики холостого хода

Характеристика холостого хода устанавливает качественную и количественную связь между магнитной и электрической цепями машины и трансформатора. Является одной из важнейших характеристик вследствие её чрезвычайно широкой информативности. Определяется для машин и трансформаторов всех типов.

Для генераторов характеристика холостого хода определяется в автономном режиме и представляет собой зависимость ЭДС якорной обмотки от тока возбуждения при постоянной частоте вращения и отсутствии тока нагрузки. Для генераторов, возбуждаемых постоянным током (генераторы постоянного тока и синхронные генераторы), ток возбуждения создается внешними источниками электроэнергии или при самовозбуждении, за счет ЭДС якорной обмотки самого генератора и регулируется регуляторами тока. Для асинхронного генератора *тока намагничивания* создается за счет конденсаторов возбуждения и регулируется изменением их емкости или специальными регуляторами.

Для асинхронных двигателей и трансформаторов под холостым ходом понимают состояние, при котором они, бу-

дучи подключенными к источнику питания, не отдают полезную механическую (асинхронный двигатель) или электрическую (трансформатор) мощность. У этих машин магнитное поле при холостом ходе создается переменным током первичной обмотки (т.е. обмоткой, подключенной к источнику питания), и характеристика холостого хода устанавливает зависимость между приложенным к ней напряжением и тремя зависимыми переменными величинами: током в первичной обмотке, потребляемой активной мощностью и коэффициентом мощности. Названные зависимые переменные называют, соответственно, *током, мощностью и коэффициентом мощности холостого хода*. Ток холостого хода имеет реактивную составляющую, называемую *током намагничивания*, которая и создает магнитное поле, и активную составляющую, обусловленную наличием потерь мощности в асинхронном двигателе или в трансформаторе при холостом ходе. Эти потери обусловлены нагревом магнитопровода вихревыми токами, трением

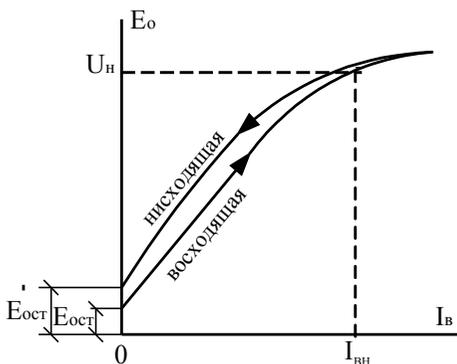


Рис.2.1. Характеристика холостого хода генераторов постоянного тока, синхронных и асинхронных.

вращающихся частей и др. Соотношение между активной и реактивной составляющими тока холостого хода устанавливает коэффициент мощности.

Для генераторов всех типов физическая природа характеристики холостого хода (рис. 2.1) может быть

объяснена следующим образом. При увеличении тока возбуждения или тока намагничивания, согласно закону полного тока, возрастает напряженность магнитного поля, магнитная индукция поля в магнитной цепи и магнитный

поток машины, который, в свою очередь, приводит к увеличению ЭДС якорной обмотки ( $E=c\Phi\Omega$  или  $E\equiv\Phi$ ). В области малых токов возбуждения характеристика холостого хода линейна, поскольку линейны все приведенные выше причинно-следственные связи. При токе возбуждения близком к номинальному проявляется насыщение ферромагнитных участков магнитной цепи, в форме нелинейной зависимости  $B=f(H)$ , вследствие чего характеристика холостого хода перестает быть линейной и плавно изменяет наклон, образуя так называемое *колени намагничивания*. При дальнейшем увеличении тока возбуждения в магнитной цепи машины проявляется глубокое насыщение ферромагнитных участков, и характеристика холостого хода снова приобретает вид прямой, но с изменившимся наклоном. Как правило, снимают две ветви характеристики холостого хода: *восходящую и нисходящую*, имеющие некоторое несовпадение. Восходящая ветвь снимается при монотонном увеличении тока возбуждения, когда недопустимо промежуточное регулирование тока возбуждения в сторону его уменьшения, в диапазоне от тока возбуждения равного нулю до такого тока, при котором ЭДС достигает 1,2...1,35 от номинального напряжения машины.

Наличие в якорной обмотке ЭДС при отсутствии тока возбуждения свидетельствует о наличии *остаточного магнитного потока* или *остаточной намагниченности* генератора и называется *остаточной ЭДС* ( $E_{ocm}$ ). Рекомендуется проводить опыт с предварительно размагниченной машиной, для чего остаточная намагниченность ликвидируется кратковременным изменением направления тока в обмотке возбуждения. Размагничивание машины требует известной сноровки, поскольку излишний по величине ток возбуждения не размагничивает, а перемагничивает машину, т.е. создает остаточную намагниченность обратного направления магнитного потока.

Нисходящую ветвь также снимают при монотонном изменении тока возбуждения, чтобы не «смазать» петлю гистерезиса. Нисходящая ветвь характеристики холостого хода вследствие проявления гистерезиса проходит несколько выше восходящей.

Современные электрические машины общепромышленного назначения, как правило, изготавливаются для работы в номинальном режиме со средним насыщением магнитопровода, соответствующим колену насыщения характеристики холостого хода. По этому признаку можно определить номинальное напряжение серийной машины при утрате паспортных данных. Номинальным напряжением испытываемой машины будет напряжение, соответствующее колену насыщения характеристики холостого хода, округленное до стандартного значения по шкале стандартных напряжений. Такой опыт проводят при номинальной частоте вращения генератора.

Характеристика холостого хода, в частности, показывает, что напряжение автономного генератора можно плавно регулировать в диапазоне от нуля до  $1,35U_n$  изменением тока возбуждения. Регулятор тока возбуждения генератора одновременно является регулятором напряжения генератора и регулятором магнитного потока.

По данным опыта холостого хода можно судить о симметрии трехфазной обмотки синхронного генератора, для чего при каком-либо токе возбуждения сравнивают ЭДС в разных фазах, которые должны быть одинаковой величины (при этом начальные фазы должны отличаться на 120 град. эл.).

Характеристики холостого хода трансформаторов и

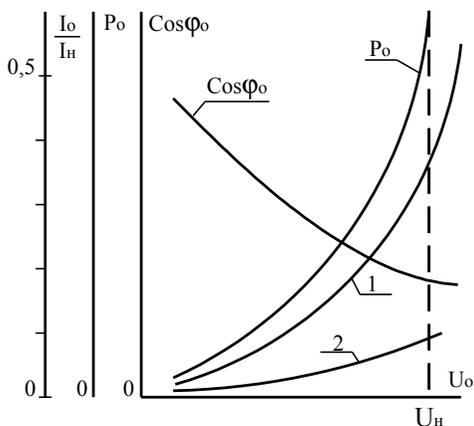


Рис.2.2 Характеристики холостого хода асинхронного двигателя и трансформатора: 1- ток холостого хода асинхронного двигателя; 2- ток холостого хода трансформатора.

асинхронных двигателей также близки по своей физической природе и имеют общие закономерности (рис 2.2). В обоих случаях под характеристиками холостого хода понимают зависимость  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $\cos \varphi_0 = f(U_0)$  при  $f_1 = f_n$ . При холостом ходе трансформатора его вторичная обмотка

разомкнута и тока в ней нет. Под холостым ходом асинхронного двигателя понимают состояние, когда вал двигателя не нагружен, вращается свободно без совершения полезной работы. Скольжение двигателя в этом случае должно быть близким к нулю, что имеет место при достаточно больших напряжениях (т.е. достаточно сильных магнитных полях), когда механические и иные потери в машине не оказывают заметного тормозящего действия. Как правило, это диапазон напряжений 0,6...1,2 от номинального напряжения.

Напряжение на первичной обмотке и магнитный поток асинхронного двигателя и трансформатора связаны известным соотношением:

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 k_{\text{об}} f_1 W_1 \Phi.$$

Изменение напряжения приводит к пропорциональному изменению магнитного потока и, уменьшая напряже-

ние, ослабляют магнитное поле асинхронного двигателя или трансформатора.

Общность характеристик холостого хода трансформаторов и асинхронных двигателей становится особенно наглядной при сопоставлении их схем замещения при холостом ходе, которые подобны по структуре. Зависимость  $I_0 = f(U_0)$  и трансформаторов, и асинхронных двигателей имеет характерные черты вольт-амперной характеристики дросселя с насыщением магнитной цепи (при холостом ходе трансформатор не отличается от дросселя, поскольку вторичная обмотка не создает собственного магнитного поля). В области малых напряжений (малых магнитных потоков) ток  $I_0$  изменяется линейно, а по мере роста напряжения и магнитного потока проявляется насыщение ферромагнитных участков магнитной цепи с отклонением характеристики вверх. Отличием характеристики холостого хода асинхронных машин и трансформаторов является значительно большая величина тока холостого хода в относительных единицах (относительно номинального) у асинхронной машины, что вызвано наличием у нее воздушного зазора, на долю которого приходится большая часть МДС обмотки статора. Легко видеть, что внешне и по существу эта характеристика подобна характеристике холостого хода генераторов.

Активную мощность  $P_0$  составляют суммарные потери при холостом ходе, среди которых преобладают потери в стали (магнитные). За счет того, что магнитные потери зависят от квадрата магнитной индукции и, следовательно, квадрата напряжения питания (поскольку  $U_1 \approx E_1 = 4,44 f_1 W_1 \Phi k_{об1}$ ;  $\Phi = B_{cp} / S$ , где  $B_{cp}$  – среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре и  $S$  – площадь воздушного зазора на одном полюсном делении), зависимость  $P_0 = f(U_0)$  имеет вид параболы. Мощность и ток холостого хода при номинальном напряжении называют номинальными потерями и номинальным током холостого хода. Их значения

для вращающихся машин и трансформаторов нормируются ГОСТом.

По мере того, как магнитопровод все больше насыщается, снижается коэффициент мощности ( $\cos\varphi_0$ ) за счет опережающего роста тока намагничивания по отношению к активной составляющей тока. В области малых напряжений, где вольтамперная характеристика линейна, коэффициент мощности остается постоянным по величине.

Характеристики холостого хода трансформатора и асинхронного двигателя позволяет сделать вывод о целесообразности снижения напряжения питания при холостом ходе для снижения потерь мощности в них.

### **2.3. Характеристики короткого замыкания**

Термин «короткое замыкание» в отношении электрических машин имеет несколько трактовок. Под коротким замыканием электрических генераторов понимают режим, при котором возбужденный генератор вращается с номинальной скоростью, а его якорная обмотка замкнута сама на себя (т.е. закорочена). Причем короткое замыкание возможно в одной, двух или трех фазных обмотках генератора, и соответственно этому короткое замыкание называется однофазным, двухфазным или трехфазным. Для трансформаторов короткое замыкание означает включение на саму себя вторичной обмотки, причем для трехфазных трансформаторов такое подключение возможно в одной, двух или всех трех фазных вторичных обмоток при подключении первичной обмотки к симметричному трехфазному источнику электроэнергии.

При номинальном возбуждении генераторов или номинальном первичном напряжении трансформатора режим короткого замыкания является аварийным, поскольку сопровождается большими токами способными по-

вредить обмотку. Лабораторные исследования такого режима проводят при значительно сниженном возбуждении генератора или напряжении питания трансформатора для снижения тока при коротком замыкании до безопасного.

Для асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока под коротким замыканием понимают состояние, когда якорная или статорная обмотка двигателя подключена к источнику питания, а ротор или якорь машины заторможен. Для синхронного двигателя такой режим неизбежно сопровождается выходом машины из синхронизма, при этом двигатель перестает быть синхронным.

При эксплуатации электрических машин и трансформаторов возможно повреждение изоляции обмоток и появления, вследствие этого, аномальных электрических контуров. В этом случае говорят о витковом коротком замыкании, коротком замыкании на корпус и т.п. В таком понимании термин «короткое замыкание» в настоящем учебном пособии не используется.

У асинхронных двигателей и трансформаторов под характеристиками короткого замыкания понимают зависимость тока  $I_k$ , активной мощности  $P_k$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi_k$  в заторможенной машине от приложенного к ней напряжения; т.е. зависимость тех же переменных, что и в опыте холостого хода, но при других условиях проведения опыта.

Как и режим холостого хода, режим короткого замыкания весьма информативен и отражает важные свойства электрической машины. При испытаниях на надежность опыт короткого замыкания позволяет определить способность якорной обмотки выдерживать номинальный ток без повреждений и перегрева. При лабораторных испытаниях характеристика короткого замыкания дает представление о некоторых соотношениях величин как исходного материала для расчетов и графоаналитического построения других важных характеристик машины. На основании данных

опыта определяются *параметры схемы замещения* асинхронной машины и трансформатора и так называемые *переменные потери*, а у трансформатора также и один из важнейших паспортных параметров – *напряжение короткого замыкания*  $U_k$ .

Как правило, проведение опыта короткого замыкания генератора требует предварительного размагничивания магнитной цепи машины, поскольку остаточный магнитный поток оказывает весьма заметное влияние на характеристику. Особенно значительно это проявляется у генераторов постоянного тока и обращенных синхронных генераторов (с неподвижным индуктором и вращающимся якорем), где направленному намагничиванию подвергается значительная часть магнитной цепи (главные полюса и ярмо индуктора).

Для проведения опыта короткого замыкания асинхронного двигателя и трансформатора потребуется регулятор напряжения, с номинальным током не ниже полукратного от номинального тока испытываемого двигателя или трансформатора, и диапазоном регулирования напряжения не ниже  $(0 \dots 0,2)U_n$ . Если номинальный ток трансформатора не известен, его до начала опыта следует определить расчетным путем, используя уравнение полной мощности:

$$\text{для трехфазного трансформатора } I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} = \frac{S_n}{3U_{нф}};$$

$$\text{для однофазного трансформатора } I_n = S_n/U_n.$$

Для генераторов всех типов характеристика короткого замыкания линейна (рис 2.3), поскольку опыт проводится при ослабленном возбуждении, когда насыщение магнитной цепи машины не проявляется. По этой же причине линейна характеристика  $I_k = f(U_k)$  асинхронного двигателя и трансформатора (рис. 2.4). Линейность характеристики означает

линейность электрической цепи машины в указанном режиме, поэтому значение  $\cos\varphi_k$  не меняется при изменении напряжения.

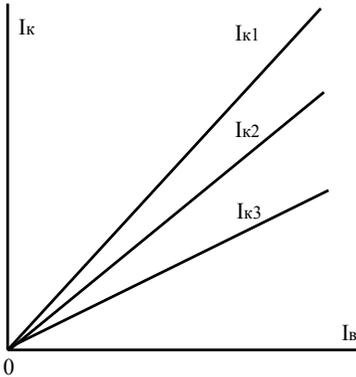


Рис.2.3. Характеристики короткого замыкания генератора постоянного тока ( $I_{k3}$ ) и трехфазного синхронного генератора при однофазном ( $I_{k1}$ ), двухфазном ( $I_{k2}$ ) и трехфазном ( $I_{k3}$ ) коротком замыкании

Потребляемую активную мощность составляют потери, идущие на нагрев обмоток машины или трансформатора. Магнитопровод в опыте практически не нагревается, поскольку опыт проводят при малых напряжениях, когда магнитный поток значительно меньше номинального и, соответственно, малы вихревые токи. При

таких напряжениях магнитная цепь не насыщена, вследствие чего вольт-амперная характеристика линейна, а коэффициент мощности постоянен. Активная мощность связана с напряжением квадратичной зависимостью, что объясняется проявлением закона Джоуля-Ленца, согласно которому количество тепла,

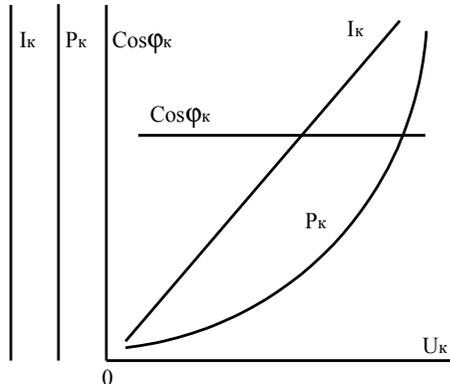


Рис.2.4. Характеристики короткого замыкания асинхронного двигателя и трансформатора

выделяемого в проводнике, пропорционально квадрату напряжения.

В опыте короткого замыкания трансформатора определяют один из паспортных параметров - *напряжение короткого замыкания*  $U_k$ . Регулируемое напряжение, подаваемое на первичную обмотку закороченного трансформатора, устанавливают такой величины, которая вызывает в обмотках ток, равный *номинальному току*. Контролировать ток можно в любой из обмоток: первичной или вторичной, но целесообразнее это делать в первичной обмотке. Это напряжение  $U_k$  и есть напряжение короткого замыкания, выраженное в именованных единицах (вольтах). Отнесенное к номинальному, оно выражается в относительных единицах:  $u_k = U_k / U_{In}$ , а умножением на 100 получают его значение в процентах:  $u_{k\%} = 100U_k / U_{In}$ , [%]. Для силовых трансформаторов  $u_k$  имеет значение 4...10 %.

## 2.4. Внешние характеристики

Внешняя характеристика определяется для автономных генераторов всех типов и трансформаторов. Для генераторов внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения генератора от тока нагрузки при постоянной частоте вращения и неизменном состоянии цепи возбуждения, а для генераторов переменного тока – еще и при постоянном коэффициенте мощности нагрузки. При независимом возбуждении ток возбуждения остается постоянным, а при самовозбуждении или наличии автоматического регулирования напряжения – при неизменном положении органов регулирования возбуждения, когда ток возбуждения изменяется естественным образом при изменении нагружения генератора. Практический интерес представляет внешняя характеристика, определенная в диапазоне изменения нагрузки от номинальной до нуля (холо-

стой ход). Под номинальной нагрузкой понимается работа с переменными величинами, равными их номинальным значениям (номинальное напряжение, ток, частота вращения, коэффициент мощности).

Разность между напряжением холостого хода  $U_0$  после снятия нагрузки с генератора и номинальным напряжением  $U_n$ , отнесенная к последнему и выраженная в процентах, называется *номинальным изменением напряжения*  $\Delta U_n$ :

$$\Delta U_n \% = \frac{U_0 - U_n}{U_n} 100.$$

Номинальное изменение напряжения генератора с автоматическим регулированием напряжения часто имеет решающее значение при выборе источника электроэнергии.

Для трансформаторов внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения на вторичной обмотке (т.е. вторичного или выходного напряжения) от тока нагрузки при работе с постоянным коэффициентом мощности нагрузки и неизменном напряжении на зажимах первичной обмотки. Т.о. внешние характеристики выявляют изменение напряжения генератора или трансформатора при изменении нагрузки.

Вид внешней характеристики в решающей степени определяется характером изменения магнитного потока машины при изменении нагрузки. На величину магнитного потока наибольшее влияние оказывают ток возбуждения (намагничивания) и поток реакции якоря, которые нужно в первую очередь анализировать при оценке опытных данных. Влияние на величину выходного напряжения оказывает также падение напряжения на сопротивлении якорной обмотки генератора или на сопротивлениях рассеяния первичной и вторичной обмоток (сопротивлению короткого замыкания) трансформатора.

У генераторов постоянного тока независимого возбуждения внешняя характеристика (кривая 3 на рис. 2.5) имеет слабый наклон вниз, что объясняется тем, что при росте тока якоря магнитный поток несколько снижается вследствие размагничивающего действия реакции якоря, вызывая снижение ЭДС якоря ( $E_a = C\Phi\Omega$ ). Размагничивающее

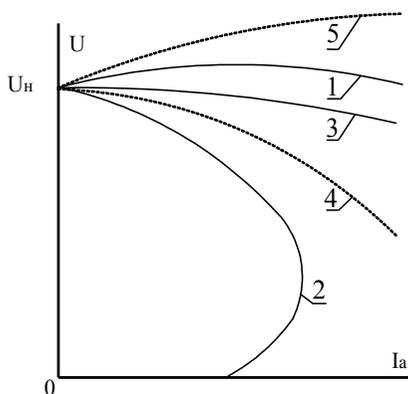


Рис.2.5. Внешние характеристики генератора постоянного тока: 1- смешанного, 2- параллельного, 3- независимого возбуждения, а также синхронного генератора и трансформатора при активной нагрузке; 4- для синхронного генератора и трансформатора при индуктивной нагрузке; 5- при ёмкостной

действия реакции якоря проявляется тем сильнее, чем выше насыщение главных полюсов генератора. Имеющее место падение напряжения на сопротивлении якорной обмотки дополнительно снижает напряжение, увеличивая наклон внешней характеристики ( $U_2 = E_a - R_a I_a$ ).

У генераторов постоянного тока параллельного возбуждения кроме действия указанных

выше факторов проявляется еще одно, но значительное обстоятельство: снижение  $U_2$  приводит к снижению тока возбуждения, поскольку обмотка возбуждения подключена к якорной цепи как источнику питания. Снижение тока возбуждения снижает магнитный поток, снижая тем самым ЭДС  $E_a$  и напряжение  $U_2$ , вследствие чего внешняя характеристика (кривая 2 на рис. 2.5) имеет существенно больший наклон и даже характерное загибание в области малых напряжений. В большинстве случаев к генератору предъяв-

ляются требования обеспечения стабильного напряжения. Этому требованию внешняя характеристика генератора постоянного тока параллельного возбуждения не отвечает. В подобных случаях используют генератор постоянного тока смешанного возбуждения (кривая 1 на рис. 2.5), где благодаря дополнительному подмагничиванию магнитной цепи генератора последовательной обмоткой, компенсируется размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения на сопротивлении якоря; при этом устраняются причины, вызывающие снижения тока возбуждения. В некоторых случаях внешняя характеристика генератора постоянного тока смешанного возбуждения может быть возрастающей, что свидетельствует об избыточной намагничивающей силе последовательной обмотки. Так поступают, например, если хотят иметь стабильное напряжение у электроприемника, подключенного в конце длинной линии, для компенсации падения напряжения в этой линии.

Для синхронных генераторов опыт проводят при независимом возбуждении или при действии их штатного устройства автоматического регулирования возбуждения. На внешние характеристики синхронных генераторов большое влияние оказывает коэффициент мощности нагрузки. При чисто *активной нагрузке* имеет место *поперечная* реакция якоря (как в случае генератора постоянного тока) и внешняя характеристика синхронного генератора подобна генератору постоянного тока при независимом возбуждении. При *индуктивной нагрузке* (чисто индуктивной или активно-индуктивной) проявляется также *продольная размагничивающая* реакция якоря, более заметно влияющая на снижение магнитного потока, вследствие чего внешняя характеристика проходит ниже, чем при чисто активной нагрузке. А вот *емкостные* приемники вызывают *продольное подмагничивающее* действие реакции якоря, вызывающее увеличение магнитного потока, благодаря чему

внешняя характеристика проходит выше или даже становится возрастающей.

Аналогично обстоит дело у трансформаторов, но наклон внешней характеристики там меньше, чем у синхронных генераторов, что объясняется меньшим изменением магнитного потока в трансформаторе при изменении тока нагрузки. Магнитный поток, согласно принципу действия трансформатора, стабилизируется изменением тока первичной обмотки при поддержании равновесия между напряжением и ЭДС первичной обмотки  $U_1 \approx E_1 = 4,44 f W_1 \Phi_m$ .

У асинхронного генератора на вид внешней характеристики решающее влияние оказывает возбудительное устройство и регуляторы напряжения. Естественные внешние характеристики, т.е. характеристики генератора, возбуждаемого от конденсаторов постоянной емкости при отключенных регуляторах напряжения, подобны внешней характеристике генератора постоянного тока параллельного возбуждения и имеют подобное объяснение причин изменения напряжения.

## 2.5. Регулировочные характеристики

Регулировочные характеристики генераторов и двигателей существенно отличаются друг от друга. Регулировочная характеристика автономного генератора представляет собой зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при поддержании постоянным напряжения генератора. Опыт проводят при постоянной частоте вращения и постоянном коэффициенте мощности нагрузки (для генераторов переменного тока). Эта характеристика выявляет возможность поддержания постоянного напряжения генератора при изменяющейся нагрузке. Опыт проводят при номинальном напряжении генератора, или ином напряжении, за-

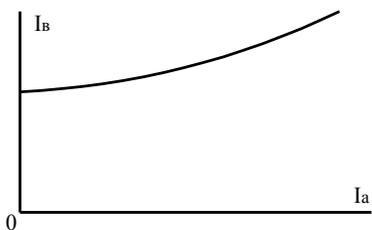


Рис.2.6. Регулировочная характеристика генераторов постоянного тока и синхронных генераторов при независимом возбуждении

данном дополнительными условиями проведения опыта. Опыт снятия регулировочной характеристики генератора может проводиться как при увеличении, так и при уменьшении нагрузки. Получаемые при этом результаты не вполне совпадают из-за проявления гистерезиса. В учебных целях достаточно зафиксиро-

вать регулировочную характеристику при монотонном изменении нагрузки в одном направлении в диапазоне от холостого хода, до тока нагрузки 1,2 от номинального (рис.2.6)

Анализ регулировочной характеристики базируется на определении необходимого изменения магнитного потока машины для компенсации действия факторов, приводящих к изменению напряжения генератора. Напомним, что кроме тока возбуждения такими факторами являются реакция якоря и падение напряжения на сопротивлении якоря. Если внешняя характеристика генератора оказывается падающей (при увеличении нагрузки генератора напряжение генератора снижается), то для восстановления напряжения потребуется увеличить магнитный поток генератора увеличением тока возбуждения.

Регулировочные характеристики электродвигателей представляют зависимость частоты вращения от переменной величины, используемой для её регулирования (напряжение на якоре или обмотке управления, ток возбуждения), при постоянном токе нагрузки или моменте двигателя. Такие характеристики определяются главным образом для исполнительных микродвигателей, но в лабораторном

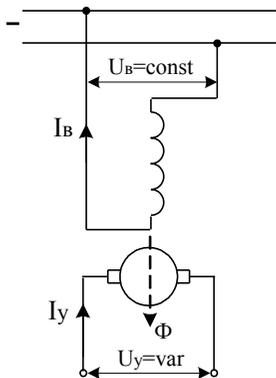


Рис.2.7. Схема включения исполнительного двигателя постоянного тока при якорном управлении

нием:

$$\Omega = \frac{U_y - R_a I_y}{C\Phi} \quad (2.1).$$

Регулировочная характеристика не проходит через начало координат, ротор начинает вращаться при наличии

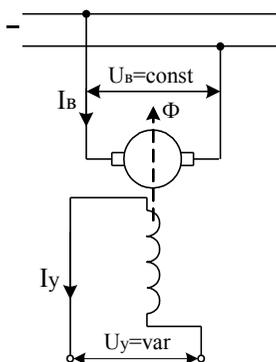


Рис.2.9. Схема включения исполнительного двигателя постоянного тока при полюсном управлении.

практикуме определяются и при изучении машин малой и средней мощности.

*Якорный способ управления двигателем постоянного тока* (рис. 2.7) предполагает регулирование частоты вращения  $\Omega$  изменением напряжения на якоре  $U_y$ . Этот способ обеспечивает линейную зависимость частоты вращения от напряжения (рис. 2.8) в соответствии с уравне-

достаточного напряжения на якоре, которое называют *напряжением трогания*. Величина напряжения трогания в двигателе определяет зону нечувствительности.

При *полюсном управлении* или регулировании частоты вращения изменением магнитного потока (рис. 2.9), регулировочная характеристика при постоянном токе якоря также

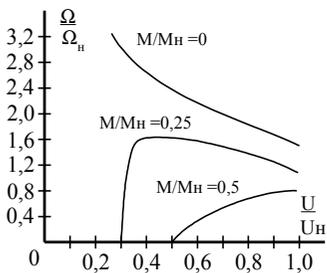


Рис.2.10. Регулировочные характеристики исполнительного двигателя с полюсным управлением

подчиняется уравнению (2.1) и представляет собой при малых нагрузках гиперболу (рис. 2.10). Снятая при значительном электромагнитном моменте, она имеет сложный вид, что вызвано изменением тока якоря при изменении магнитного потока двигателя в соответствии и уравнением *механической характеристики*

$$\Omega = \frac{U_y}{C\Phi} - \frac{R_a}{(C\Phi)^2} M. \quad (2.2.)$$

На рис. 2.10 представлены регулировочные характеристики двигателя постоянного тока при полюсном управлении, построенные в относительных единицах. Характерный «срыв» характеристики при снижении магнитного потока отражает потерю устойчивости двигателя при недостаточном возбуждении.

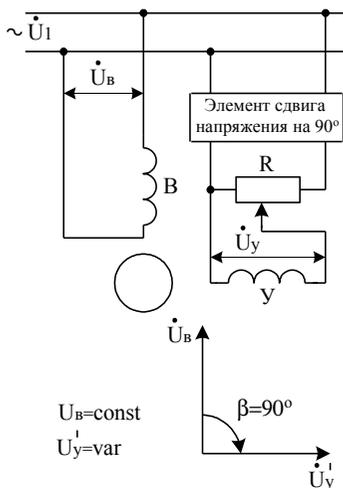


Рис.2.11. Схема и векторная диаграмма напряжений амплитудного управления.

По способу регулирования частоты вращения исполнительного асинхронного микродвигателя различают *амплитудное управление* (рис. 2.11), *фазовое управление* (рис. 2.12), *амплитудно-фазовое управление* (рис. 2.13) и *пространственное управление*. Амплитудное управление

предполагает регулирование амплитуды напряжения на

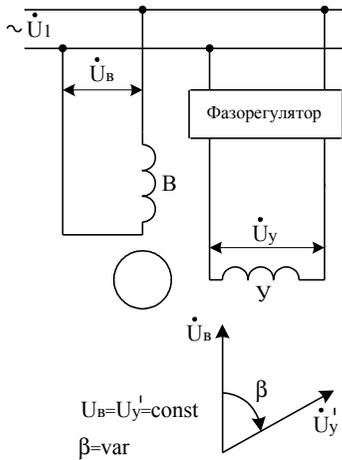


Рис.2.12. Схема и векторная диаграмма напряжений фазового управления.

обмотке управления при неизменном напряжении на обмотке возбуждения. Фазовое управление предполагает изменение начальной фазы напряжения на обмотке управления по отношению к обмотке возбуждения при неизменной амплитуде обоих напряжений. Амплитудно-фазовое управление с конденсатором в цепи возбуждения (конденсаторное) предполагает регулирование и амплитуды напряжений возбуждения и управления, и начальной фазы напряжения возбуждения.

Пространственное управление на практике применяется редко. Вид

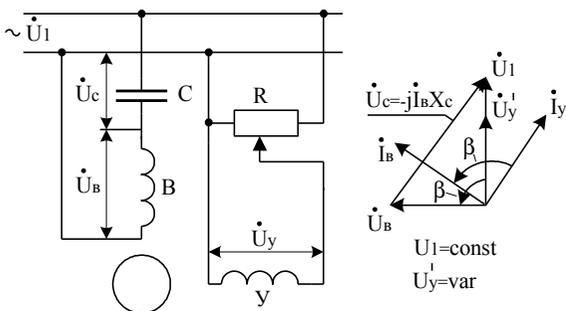


Рис.2.13. Схема и векторная диаграмма напряжений амплитудно-фазового управления с конденсатором в цепи возбуждения.

регулирующих характеристик представлен на рис. 2.14; при всех способах управления они нелинейны. Степень нелинейности наибольшая в режиме холо-

стого хода и зависит в основном от активного сопротивления ротора и сопротивлений рассеяния обмоток статора и ротора. Наиболее близко к линейным приближаются регу-

лировочные характеристики двигателя при фазовым управлении.

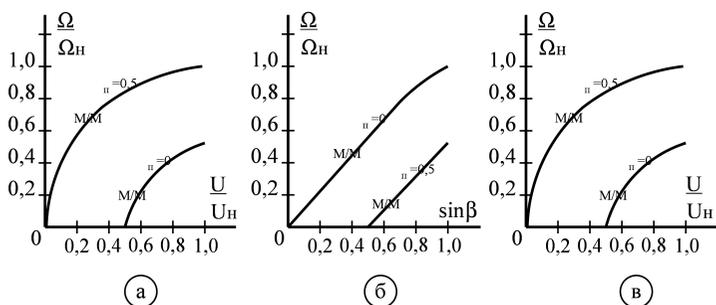


Рис.2.14. Регулировочные характеристики исполнительного асинхронного двигателя при управлении: а - амплитудном; б - фазовом; в - амплитудно-фазовом

## 2.6. Механические характеристики

Механические характеристики определяют наиболее важные свойства машин и наиболее часто бывают востребованными практикой. Многие вопросы теории электропривода решаются на базе анализа механических характеристик используемых двигателей. Практический интерес могут представлять механические характеристики машины как в двигательном, так и в тормозных режимах. Среди тормозных режимов различают: генераторный (рекуперативного торможения), противовключения и динамического торможения. Вид механических характеристик у машин различного типа при разных режимах работы существенно отличается.

Для машин постоянного тока механическая характеристика есть зависимость частоты вращения машины от момента на валу при неизменном напряжении питания и отсутствии регулирования в цепи возбуждения.

Для асинхронных машин вместо частоты вращения может использоваться *скольжение* – переменная величина, связанная с частотой вращения соотношением

$$s = 1 - \frac{\Omega_2}{\Omega_1}, \quad (2.3)$$

где  $\Omega_1$  – частота вращения магнитного поля (синхронная скорость);  $\Omega_2$  – частота вращения ротора в тех же единицах измерения.

Из выражения (2.3) следует, что скольжение – величина безразмерная.

У синхронных машин механическая характеристика имеет вид прямой, параллельной оси момента, т.е. является абсолютно жесткой, поскольку скорость синхронной машины всегда равна скорости вращения поля, определяемой частотой тока питания и числом полюсов машины, и не зависит от нагрузки. Для определения нагрузочных свойств синхронных машин вместо механической используют *угловую характеристику* – зависимость полезной мощности от угла нагрузки.

При опытным определении механической характеристики измеряются частота вращения вала двигателя и момент на валу. Методы измерения момента и частоты вращения рассматриваются в разделах 1.7 и 1.8.

При номинальном напряжении опытным путем удается определить только небольшую часть механической характеристики машины в диапазоне изменения момента от  $(-M_n)$  до  $(+M_n)$ . За пределами этого диапазона токи в обмотках машины становятся выше номинального, что вызывает ее перегрев. При необходимости экспериментального исследования механической характеристики в большем диапазоне изменения момента, а также исследования механической характеристики в наиболее тяжелом, с точки зрения нагрева машины, режиме противовключения, поступают следующим образом. Опыт проводят при сниженном напряжении на якоре испытываемой машины и, таким

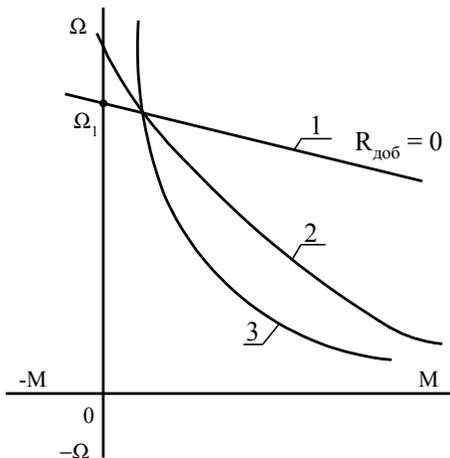


Рис.2.15. Механические характеристики машины постоянного тока: 1 - независимого (параллельного); 2- смешанного; 3 - последовательного возбуждения

Для машин постоянного тока вид механической характеристики определяется способом возбуждения (рис. 2.15). При этом механическая характеристика всех типов машин постоянного тока описывается уравнением

$$\Omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{R_a + R_{доб}}{(C\Phi)^2} M,$$

а различия в механической характеристике определяются разным характером изменения магнитного потока при изменении момента, т.е. различиями в *моментной характеристике*.

Для машины независимого и параллельного возбуждения естественная механическая характеристика ( $R_{доб}=0$ ) имеет вид прямой линии со слабым наклоном вниз (характеристика 1 на рис. 2.15). Наклон характеристики определяется величиной сопротивления цепи якоря  $R_a + R_{доб}$ . Генераторный режим отличается от двигательного знаком электромагнитного момента. Эти два режима разделяет точка

образом, предотвращают чрезмерно большой ток в обмотках и их перегрев, и экспериментально определяют механическую характеристику в требуемом диапазоне изменения угловой скорости. Затем выполняют пересчет полученных значений моментов на требуемое (номинальное или иное) напряжение.

Для машин постоян-

на оси ординат (частоты вращения), называемая режимом *идеального холостого хода*. Соответственно частоту вращения  $\Omega_1$  называют *скоростью идеального холостого хода*:

$$\Omega_1 = \frac{U}{C\Phi}.$$

При введении добавочного сопротивления в цепи якоря ( $R_{доб} > 0$ , рис.2.16), наклон механической характеристики увеличивается и становится возможным наблюдать режим

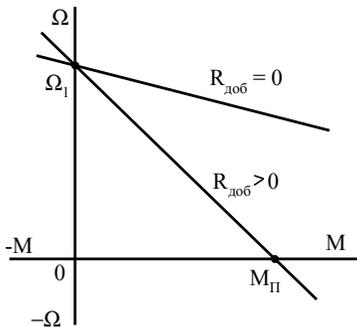


Рис.2.16. Механические характеристики машины постоянного тока

противовключения (четвертый квадрант), отделяемый от двигательного режима точкой на оси моментов (абсцисс), называемой *режимом короткого замыкания* машины. Момент  $M_n$ , соответствующий режиму короткого замыкания, называют *начальным пусковым моментом* двигателя.

Характеристика машины последовательного возбуждения имеет вид гиперболы, что объясняется изменением магнитного потока при изменении момента машины. Скорость идеального холостого хода у такого двигателя равна бесконечности (проще говоря, отсутствует), и работать в генераторном режиме такая машина не может.

Механическая характеристика асинхронной машины описывается уравнением электромагнитного момента

$$M = \frac{mU_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\Omega_1 [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2]},$$

где  $m$  – число фаз ( $m = 3$ );  $U_1$  – фазное напряжение на статоре,  $\Omega_1$  – частота вращения поля;  $r_1$ ,  $r_2'$ ,  $x_1$ ,  $x_2'$  – соответ-

ственно активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора;  $s$  – скольжение машины.

Частота вращения магнитного поля определяется частотой источника питания  $f_1$  и числом полюсов машины  $p$ :

$$\Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}.$$

Механическая характеристика может быть представлена в координатах  $\Omega=f(M)$  рис. 2.17.а или  $M=f(s)$  рис.2.17.б. Генераторный, двигательный режимы и режим противовключения на координатной плоскости  $\Omega_p=f(M)$  располагаются в тех же квадрантах, что и для машины постоянного тока.

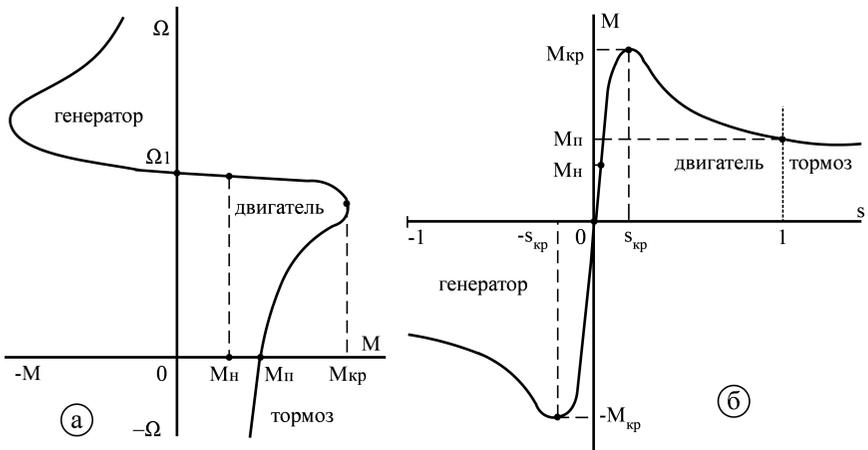


Рис.2.17. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Пограничные режимы по аналогии называют режимами идеального холостого хода и короткого замыкания. Скорость ротора при идеальном холостом ходе равна скорости поля. Электромагнитный момент в режиме короткого замыкания называют также начальным пусковым

моментом асинхронного двигателя. На механической характеристике выделяют устойчивый и неустойчивый участки. Устойчивым является участок, связывающий точки с моментами ( $-M_{кр}$ ) и  $M_{кр}$ , т.е. узкий участок  $[-S_{кр}; S_{кр}]$ .

При опытном определении механическую характеристику часто снимают при пониженном напряжении, что позволяет избежать перегрева машины при перегрузках. Удобно снижать напряжение на двигателе в  $\sqrt{3}$  раз переключением статорной обмотки с «треугольника» на «звезду» или с помощью регулятора напряжения. Естественную характеристику в этом случае получают, увеличивая в три раза значения моментов при фиксированной скорости.

## 2.7. Рабочие характеристики

Рабочие характеристики представляют зависимость основных переменных величин машины: потребляемой мощности, частоты вращения, момента на валу, тока, КПД, коэффициента мощности ( $\cos\phi$ ), от полезной мощности,

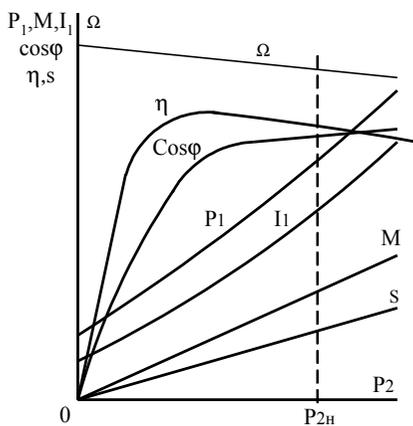


Рис.2.18. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя

при естественных условиях работы машины, т.е. при номинальном напряжении и частоте тока.

Нелишне напомнить, что для генераторов полезной является электрическая активная мощность, а для двигателя — механическая мощность (на валу). Для машин всех типов рабочие характеристики

(рис.2.18) во многом аналогичны. Рассмотрим их для двигателей разных типов.

Потребляемая мощность машины  $P_1$  определяется уравнением энергетического баланса: она равна сумме отдаваемой полезной мощности  $P_2$  и мощности потерь в машине  $\Delta P$ . Для машин с высоким КПД потери не велики и зависимость  $P_1=f(P_2)$  практически прямолинейно возрастающая функция для машин всех типов, как двигателей, так и генераторов. Ее незначительное отклонение вверх от прямой зависимости объясняется опережающим увеличением электрических потерь с увеличением нагрузки.

Характерным является изменение частоты вращения  $\Omega$  двигателей разных типов при изменении мощности на валу (нагрузки). Синхронным двигателям свойственно постоянство частоты вращения. Их скорость в установившемся синхронном режиме определяется частотой тока и числом полюсов якорной обмотки, которые от величины нагрузки не зависят. Для асинхронных двигателей характерно снижение частоты вращения при номинальной нагрузке на 3-6 % от частоты вращения холостого хода, что определяется наличием у них скольжения. Вследствие этого характеристика  $\Omega=f(P_2)$  практически линейна со слабым наклоном вниз. При увеличении нагрузки на валу асинхронный двигатель замедляет вращение, скольжение возрастает, за счет чего увеличиваются ЭДС и ток обмотки ротора и двигатель развивает больший момент, уравновешивающий возросшую нагрузку.

Аналогичный вид имеет кривая скорости двигателей постоянного тока параллельного и независимого возбуждения, у которых снижение скорости приводит к снижению ЭДС якоря и росту тока якоря и, вместе с ним, электрической мощности двигателя. Несколько иначе обстоит дело у двигателей последовательного возбуждения, у которого на скорость влияет не только изменение тока якоря, но и изменение магнитного потока, вызванное изменением тока в по-

следовательной обмотке возбуждения. При этом характеристика  $\Omega=f(P_2)$  значительно видоизменяется, она становится мягкой. У двигателя смешанного возбуждения характеристика  $\Omega=f(P_2)$  занимает промежуточное положение между характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения, зависящее от соотношения размеров последовательной и параллельной обмоток возбуждения, приближаясь к первой при слабой последовательной обмотке и к последней при использовании в конструкции машины усиленной последовательной обмотки возбуждения.

Изменение потребляемого тока у электродвигателей всех типов имеет схожий характер и схожее объяснение. При росте механической мощности растет и потребляемая электрическая мощность двигателя, что при постоянстве напряжения неизбежно сопровождается ростом тока. Некоторое отличие в наклоне этой характеристики у двигателей разных типов объясняется влиянием на него несколько отличающегося характера изменения КПД и  $\cos\varphi$ , что особенно заметно проявляется в области малых нагрузок. У асинхронного двигателя магнитное поле наводится током намагничивания, протекающим по обмотке статора и реактивным по характеру, в связи с чем уже при холостом ходе двигатель имеет большой ток, составляющий 40-60 % от номинального. У синхронного двигателя магнитный поток создается двумя обмотками – якорной и возбуждения, и  $\cos\varphi$  регулируется изменением тока возбуждения и потому ток якоря при холостом ходе может быть как большим (при малых значениях  $\cos\varphi$ ), так и малым (при  $\cos\varphi \approx 1$ ).

У двигателей постоянного тока ток холостого хода определяется величиной потерь мощности и, как правило, не велик.

Момент  $M$  и мощность на валу  $P_2$  связаны известным соотношением

$$P_2 = \Omega M,$$

где  $\Omega$  - частота вращения двигателя.

Для двигателей с мало меняющейся частотой вращения (синхронных, асинхронных, двигателей независимого и параллельного возбуждения) зависимость  $M=f(P_2)$  практически прямо пропорциональная с незначительным отклонением вверх вследствие снижения скорости. Для двигателей последовательного возбуждения рост электрической мощности приводит к пропорциональному росту тока якоря и, одновременно, магнитного потока. Вследствие того, что  $M=C\Phi I_a$ , зависимость  $M=f(P_2)$  приближается к квадратной параболе.

Зависимость  $\eta=f(P_2)$  особенно близко совпадает у всех типов электрических машин. Вид кривой  $\eta=f(P_2)$  объясняется следующим образом. При холостом ходе полезная мощность равна нулю, и КПД машины равен нулю. При небольших нагрузках электрические (переменные) потери относительно малы, и КПД с увеличением полезной нагрузки сначала быстро возрастает, затем рост замедляется, поскольку в потерях быстро возрастает доля электрических потерь, пропорциональных квадрату тока. Когда переменные потери сравняются с постоянными (магнитными, механическими и др.), КПД принимает максимальное значение, а при дальнейшем росте нагрузки начинает постепенно падать. Это поведение кривой  $\eta=f(P_2)$  при номинальном напряжении машины описывается формулой:

$$\eta = P_2 / (P_2 + \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{перем}}).$$

Изменение коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ) в рабочих характеристиках анализируется только для асинхронных двигателей. Для синхронных  $\cos\varphi$  зависит не только от нагрузки, но и от тока возбуждения и анализ его изменения при изменении нагрузки производят на основании семей-

ства *U-образных* характеристик. Для машин постоянного тока понятие «коэффициент мощности» не существует. Для асинхронного двигателя  $\cos\varphi$  при холостом ходе и в области малых нагрузок мал, т.к. мала активная составляющая тока статора, определяемая полезной нагрузкой и потерями в двигателе, по сравнению с реактивной составляющей этого тока, создающей магнитное поле. При увеличении нагрузки на валу  $\cos\varphi$  увеличивается за счет роста активной составляющей тока статора. В области больших нагрузок происходит некоторое снижение  $\cos\varphi$  за счет роста реактивного сопротивления обмотки ротора, вызванного увеличением частоты тока ротора при росте скольжения.

Низкий  $\cos\varphi$  в области малых нагрузок является одним из серьезных недостатков асинхронных двигателей. На практике применяют специальные меры повышения  $\cos\varphi$  двигателей при малых нагрузках, такие как понижение напряжения на слабо загруженном двигателе, например, переключением статорной обмотки с «треугольника» на «звезду», использование компенсационных конденсаторов, или применяют устройства ограничивающие время работы двигателя на холостом ходу.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

### МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### **РАБОТА №1. Исследование генераторов постоянного тока**

**Цель работы:** исследование рабочих свойств и ознакомление с методикой испытания генераторов постоянного тока.

#### **Содержание работы:**

1. Ознакомиться с испытательной установкой и записать паспортные данные исследуемого генератора, приводного двигателя и измерительных приборов.
2. Установить щетки на геометрической нейтрали генератора.
3. Собрать схему экспериментального исследования генератора с независимым возбуждением.
4. При независимом возбуждении генератора снять и построить следующие характеристики: холостого хода, нагрузочную, регулировочную, короткого замыкания и внешнюю.
5. Собрать схему экспериментального исследования генератора с параллельным и смешанным возбуждением. Выполнить наладку самовозбуждения генератора.
6. Снять и построить внешние характеристики при параллельном и смешанном возбуждении.
7. Дать оценку результатам испытаний.

#### **Выполнение работы**

## Определение геометрической нейтрали генератора

Установка щеток генератора на геометрической нейтрали производится одним из способов, описанных в главе 1.

## Характеристики генератора независимого возбуждения

Перед сборкой схемы необходимо ознакомиться с паспортными данными генератора. Значения номинального напряжения и тока будут использованы при выборе измерительных приборов, реостатов и переключателя.

Сборка схемы испытательной установки производится в соответствии с рис.3.1.

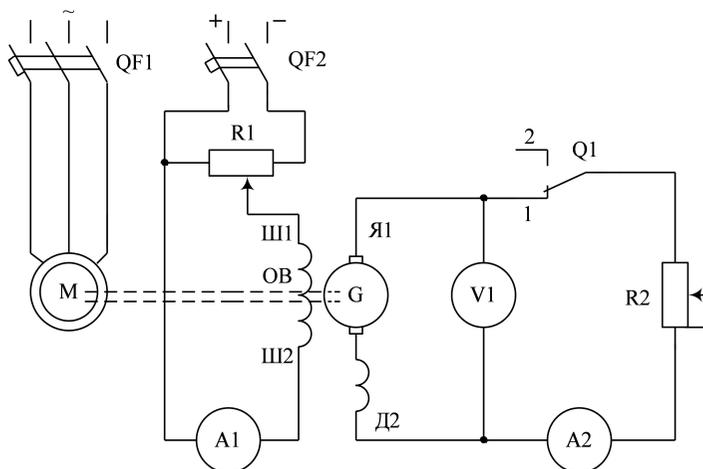


Рис.3.1. Схема экспериментального исследования генератора постоянного тока независимого возбуждения

В качестве приводного двигателя генератора используется асинхронный короткозамкнутый двигатель М, схема управления которого предварительно собрана. Включением автомата QF1 двигатель и генератор приводятся во вращение. На схеме: Ш1-Ш2 – клеммы обмотки возбуждения; R1

- потенциометр регулирования тока возбуждения (регулятор рабочего магнитного потока и регулятор напряжения генератора); А1 – амперметр измерения тока возбуждения  $I_1$ ; G – якорная обмотка; Д2 – обозначение клеммы обмотки добавочного полюса; V1 – вольтметр измерения напряжения на якоре (нагрузке); R2 - реостат нагрузки (имитатор электроприемников с переменной мощностью); А2 – амперметр измерения тока нагрузки (или тока якоря); Q1 – переключатель подключения нагрузки к генератору.

### **Характеристика холостого хода**

Характеристика холостого хода представляет зависимость напряжения генератора  $U$  от тока возбуждения  $I_1$  при отсутствии тока якоря  $I_2$ :

$$U = f(I_1) \text{ при } I_2 = 0 \text{ и } \Omega = \Omega_H = \text{const.}$$

Перед запуском генератора реостат R1 выводится в положение минимального (нулевого) выходного напряжения, переключатель Q1 размыкается. Генератор приводится во вращение включением автомата QF1. При вращении невозбужденного генератора на якорной обмотке наблюдается наличие напряжения малой величины. Это напряжение называют *остаточным*, и его наличие свидетельствует о наличии *остаточной намагниченности* в магнитной цепи генератора.

По заданию преподавателя остаточная намагниченность может быть ликвидирована, т.е. генератор размагничен. Для этого в генераторе надо создать магнитный поток, который должен иметь противоположное направление остаточному потоку. С этой целью запускают приводной двигатель M, включают автомат QF2. Потенциометром R1 задаётся малый ток возбуждения, и наблюдают за изменением напряжения на якоре. Возможны два варианта изменения напряжения: оно либо увеличивается, либо уменьшается и даже изменяет полярность. При увеличении напряжения на якоре происходит дополнительное подмагничива-

ние генератора. В этом случае необходимо остановив генератор и, отключив обмотку возбуждения, изменить полярность подключения обмотки возбуждения (поменять местами проводники на клеммах Ш1 и Ш2). Далее повторно запускают генератор и производят размагничивание до тех пор, пока напряжение на якоре после снятия возбуждения не станет равным нулю.

Операция размагничивания требует определенной сноровки; при чрезмерном токе размагничивания происходит перемагничивание генератора, что требует повторения операции размагничивания.

Далее приступают к снятию характеристики холостого хода.

При отсутствии возбуждения фиксируется остаточное напряжение (у размагниченного генератора  $U=0$ ). Заполняется первая строка таблицы 1.1. Автоматом QF2 в цепь обмотки возбуждения подается постоянный ток. Потенциометром R1 ток возбуждения постепенно увеличивается с шагом, соответствующим изменению напряжения примерно на  $0,2U_n$ .

*Изменять ток возбуждения нужно плавно, небольшими ступенями и только в одном направлении: только увеличивать при снятии восходящей ветви и только уменьшать при снятии нисходящей ветви. При невыполнении этого условия, вследствие влияния гистерезиса, характеристика окажется искаженной.*

Для построения характеристики холостого хода достаточно иметь 7-8 точек на каждую ветвь. Последним устанавливается ток возбуждения, соответствующий  $U \approx 1,25U_n$ . Снятая ветвь характеристики холостого хода называется *восходящей ветвью*.

Затем ток возбуждения в обратном порядке постепенно и монотонно уменьшается до нуля и снимается *нисходящая ветвь* характеристики холостого хода.

Таблица 1.1. Характеристика холостого хода

Восходящая ветвь			Нисходящая ветвь		
№ п.п.	$I_1$ mA	U В	№ п.п.	$I_1$ mA	U В
1	0		1		
8			8	0	

### Нагрузочная характеристика

Она представляет зависимость напряжения генератора  $U$  от тока возбуждения  $I_1$  при токе якоря  $I_2$ , равном номинальному току генератора:

$$U = f(I_1) \text{ при } I_2 = I_H \text{ и } \Omega = \Omega_H.$$

Опыт проводится в следующей последовательности. Генератор приводится во вращение и возбуждается до напряжения (1,2...1,25)  $U_H$ , после чего переключатель Q1 устанавливается в положение «1» и резистором R2 устанавливается номинальный ток нагрузки. Показания измерительных приборов заносят в таблицу 1.2 первой строкой.

Далее, уменьшая ток возбуждения  $I_1$ , нагрузочным резистором R2 увеличивают ток  $I_2$  до заданного значения и записывают величину полученного напряжения  $U$ .

При этом желательно изменять ток возбуждения через такие интервалы, чтобы получить 5-6 равномерно распределенных точек характеристики.

Таблица 1.2. Нагрузочная характеристика

№ п.п.	$I_1$ mA	U В	Примечание
			$I_2 = I_H$

### Характеристика короткого замыкания

Эта характеристика представляет зависимость тока якоря  $I_{2K}$  от тока возбуждения  $I_1$  при сопротивлении внешней цепи якоря R2, равном нулю (напряжении на зажимах генератора  $U$ , равном нулю):

$$I_{2K} = f(I_1) \quad \text{при } U = 0 \quad \text{и} \quad \Omega = \Omega_H = \text{const.}$$

Опыт проводится в следующем порядке.

Перед включением переключателя Q1 необходимо потенциометром R1 уменьшить ток возбуждения  $I_1$  до нуля. Сопротивление нагрузочного резистора R2 уменьшается до нуля и замыкается переключатель Q1. Так как сопротивление нагрузки (внешней цепи) в этом опыте практически равно нулю, то для создания в цепи якоря, имеющей малое сопротивление, большого тока короткого замыкания потребуется весьма малая ЭДС, а, следовательно, и малый ток возбуждения. Последнее обстоятельство необходимо учитывать при выборе амперметра для цепи возбуждения (выбрать меньший предел прибора).

При  $I_1 = 0$  измеряется ток короткого замыкания, который определяется величиной ЭДС от потока остаточной индукции. Этот ток может составлять 30...50 % номинального значения.

По заданию преподавателя генератор может быть размагничен, по методике, описанной выше. Контроль за степенью размагничивания осуществляется по амперметру A2.

Далее, ток возбуждения следует постепенно увеличивать от нуля до тех пор, пока ток короткого замыкания не станет равным  $1,5 I_H$ . Показания приборов заносятся в таблицу 1.3.

Таблица 1.3. Характеристика короткого замыкания

№ п.п.	$I_1$ mA	$I_2$ A	Примечание
			U = 0

### Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика представляет зависимость тока возбуждения  $I_1$  от тока нагрузки  $I_2$  при номинальном напряжении на зажимах генератора:

$$I_1 = f(I_2) \text{ при } U = U_H \text{ и } \Omega = \Omega_H.$$

После проведения опыта короткого замыкания устанавливают первоначальный предел измерения амперметра А1 в цепи возбуждения и резистор R2 выводят в положение максимального сопротивления (минимальной нагрузки). При разомкнутом переключателе Q1 потенциометром R1 устанавливается напряжение генератора, равное номинальному, и записывается первая строка в таблицу 1.4. Далее переключатель Q1 ставится в положение «1» и нагрузочным резистором R2 устанавливается ток  $I_2$ . Потенциометром R1 восстанавливается номинальное напряжение генератора. Записывается вторая строка таблицы. Далее, постепенно увеличивая ток нагрузки до  $I_2 = (1, 1 \dots 1, 2) I_H$ , заполняют таблицу 1.4.

Таблица 1.4. Регулировочная характеристика

№ п.п.	$I_1$ mA	$I_2$ A	Примечание
			$U = U_H$

### Внешняя характеристика

Представляет зависимость напряжения генератора  $U$  от тока нагрузки  $I_2$  при постоянном токе возбуждения  $I_1$ :

$$U = f(I_2) \text{ при } I_1 = \text{const} \text{ и } \Omega = \Omega_H$$

Величина тока возбуждения соответствует номинальному напряжению генератора при холостом ходе. Возможен вариант, когда величина тока возбуждения соответствует номинальному напряжению генератора при номинальном токе якоря.

Опыт проводится в следующей последовательности.

Сопротивление резистора R2 вводится до максимального значения. Генератор приводится во вращение. При разомкнутом переключателе Q1 (холостой ход) устанавливается значение тока возбуждения, при котором напряжение генератора равно номинальному напряжению  $U_H$ . Пока-

зания измерительных приборов заносятся в таблицу 1.5.а первой строкой.

Таблица 1.5. Внешние характеристики

№ п.п.	I <sub>1</sub> mA	U В	I <sub>2</sub> А	Примечание
а) независимое возбуждение				
1 . 6		U <sub>н</sub>	0	
б) параллельное возбуждение				
1 . 6		U <sub>н</sub>	0	R <sub>1</sub> = const
в) смешанное возбуждение				
1 . 6		U <sub>н</sub>	0	R <sub>1</sub> = const

Далее, переключатель Q1 переводится в положение «1». При неизменном значении тока возбуждения, резистором R2 ток нагрузки увеличивается от нуля до тока  $1,2I_H$  с занесением результатов измерений в таблицу 1.5.а

Внешняя характеристика позволяет определить изменение напряжения  $\Delta U \%$  при переходе от режима холостого хода генератора к режиму номинальной нагрузки

$$\Delta U \% = \frac{U_H - U}{U_H} 100,$$

где  $U$  – напряжение, соответствующее номинальному току генератора.

### **Характеристики генератора при параллельном и смешанном возбуждении**

Для снятия характеристик генератора при параллельном и смешанном возбуждении собирается схема рис. 3.2.

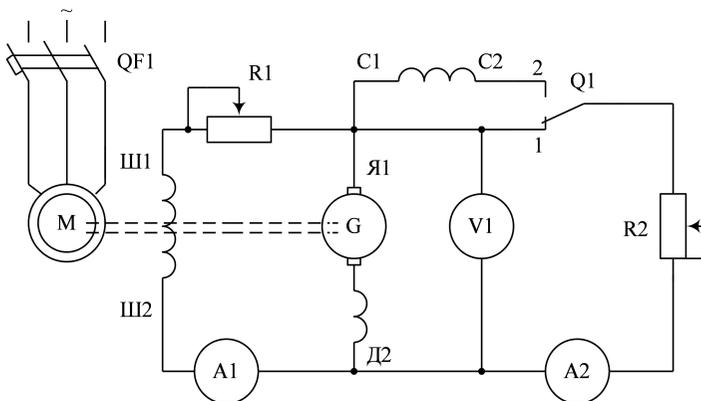


Рис.3.2. Схема экспериментального исследования генератора постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения

После сборки схемы производят наладку генератора, обеспечивая ему самовозбуждение. С этой целью при отключённом переключателе Q1 генератор приводится во вращение включением автомата QF1, а регулировочный резистор R1 полностью выводится.

При правильной полярности присоединения обмотки возбуждения напряжение на якоре генератора будет увеличиваться, т.е. генератор будет самовозбуждаться. При неправильном присоединении обмотки возбуждения генератор не возбуждается. В этом случае генератор следует остановить, отключением автомата QF1, и поменять местами проводники, присоединенные к клемма Ш1 и Ш2.

После этого генератор снова приводят во вращение и убеждаются в его самовозбуждении. При включении ключа Q1 в положение «1» получают схему параллельного возбуждения; в положении «2» - смешанного возбуждения.

Для генератора параллельного и смешанного возбуждения снимаются только внешние характеристики, которые

существенно отличаются от внешней характеристики генератора при независимом возбуждении.

Внешняя характеристика для генераторов параллельного и смешанного возбуждения выражает зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при постоянной частоте вращения и при постоянном сопротивлении цепи возбуждения:

$$U=f(I_2) \text{ при } \Omega = \Omega_H \text{ и } R_B = r_B + R1 = \text{const},$$

где  $R_B$  –сопротивление цепи возбуждения, включающее сопротивление обмотки возбуждения  $r_B$  и сопротивление регулирующего резистора  $R1$  в цепи возбуждения. При этом величина  $R1$  устанавливается такой величины, при которой напряжение  $U=U_n$  при холостом ходе генератора.

### **Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения**

При нейтральном (отключённом) положении переключателя  $Q1$ , резистором  $R1$  устанавливается номинальное напряжение генератора. Показания приборов заносятся в таблицу 1.5.б. В продолжение опыта сопротивление резистора  $R1$  остаётся неизменным.

Для снятия остальных точек характеристики переключатель  $Q1$  устанавливается в положение «1» и опыт предварительно проводится «вчерне». Увеличивая ток нагрузки изменением сопротивления резистора  $R2$ , необходимо определить величину максимального тока якоря (он может быть меньше номинального значения). Максимальному току  $I_2$  соответствует напряжение генератора  $U_{кр}$ . Диапазон  $U_n...U_{кр}$  разбивают на 5-6 примерно равных интервалов.

После этого опыт проводят «набело». Для этого размыкают  $Q1$ , устанавливают максимальное сопротивление резистора  $R2$  и на холостом ходу генератора током возбуждения  $I_1$  доводят напряжение до номинального значе-

ния. Показания измерительных приборов заносятся в таблицу 1.5.б первой строкой. Уменьшением сопротивления резистора R2 с заданным шагом изменения напряжения снимаются остальные точки внешней характеристики.

Измерения при максимальном токе  $I_2$  фиксируются как обязательные. Опыт продолжается с дальнейшим уменьшением сопротивления резистора R2 вплоть до  $R_2=0$  ( $U=0$ ), в диапазоне  $U_{кр} \dots 0$  фиксируют 1-2 строки. Показания приборов при  $U=0$  фиксируются как обязательные.

### **Внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения**

Перед началом опыта необходимо проверить согласованность включения обмоток возбуждения Ш1-Ш2 и С1-С2.

Генератор приводится во вращение и при отключенном переключателе Q1 возбуждается до номинального напряжения. После этого переключатель Q1 ставится в положение «1» (генератор параллельного возбуждения) и нагружается током 0,4 – 0,5 номинального с помощью нагрузочного резистора R2. Затем, не изменяя сопротивления резистора R2, переключатель Q1 переводится в положение «2», - смешанное возбуждение.

Если при этом ток нагрузки  $I_2$  и напряжение генератора увеличиваются, то параллельная и последовательная обмотки включены согласно, т.е. правильно.

Если указанные величины уменьшаются, то обмотки включены встречно, т. е. неправильно. В последнем случае концы последовательной обмотки С1- С2 надо поменять местами при предварительном отключении генератора.

Внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения снимается при согласном включении параллельной и последовательной обмоток возбуждения. Переключатель Q1 переводится в положение «2», а методика проведения опыта такая же, как для генератора независимого

возбуждения. Первой строкой таблицы 1.5.в должны быть показания приборов при с номинальным напряжением при токе  $I_2=0$  (переключатель Q1 в отключенном положении).

### **Содержание отчёта**

1. Паспортные данные генератора, приводного двигателя и технические характеристики используемых измерительных приборов.

2. Схема установки.

3. Таблицы результатов измерений.

4. Характеристика холостого хода и нагрузочная характеристика генератора независимого возбуждения, построенные в одной координатной плоскости.

5. Характеристика короткого замыкания.

6. Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения.

7. Внешние характеристики генераторов независимого, параллельного и смешанного возбуждения, построенные в одной координатной плоскости.

8. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Разъясните назначение каждого из элементов схемы экспериментального исследования генератора.

2. Каковы причины изменения напряжения генератора независимого возбуждения при изменении тока нагрузки при постоянном возбуждении?

3. Почему внешняя характеристика генератора при параллельном возбуждении падает более круто, чем при независимом возбуждении?

4. Каковы условия для возникновения устойчивого самовозбуждения генератора параллельного возбуждения?

5. Как необходимо включать обмотки возбуждения генератора смешанного возбуждения (согласно или встречно), чтобы уменьшить влияние тока нагрузки на напряжение генератора?

## **РАБОТА № 2. Исследование электродвигателей постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения**

**Цель работы:** ознакомиться со способами пуска и изменения направления вращения двигателей параллельного и смешанного возбуждения, а также исследовать их рабочие, электромеханические и регулировочные характеристики.

### **Содержание работы:**

1. Ознакомиться с лабораторной испытательной установкой и записать паспортные данные исследуемого двигателя и измерительных приборов.
2. Измерить сопротивление обмотки якоря и обмоток возбуждения двигателя.
3. Выполнить монтаж соединений электрооборудования для экспериментального исследования двигателя постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения.
4. Осуществить пуск и изменить направление вращения двигателя при параллельном возбуждении.
5. Снять и построить рабочие, электромеханические (скоростные) и моментные характеристики двигателя при параллельном и смешанном возбуждении.
6. Снять и построить регулировочные характеристики двигателя параллельного возбуждения.
7. Построить энергетическую диаграмму двигателя для заданной нагрузки по рабочей характеристике.
8. Дать оценку результатов испытаний.

### **Выполнение работы**

**Определение сопротивления обмоток двигателя**  
Сопротивление обмоток возбуждения и якоря двигателя по-

стоянного тока измеряется методом вольтметра и амперметра (см. главу 1).

### Сборка схемы

Перед сборкой схемы необходимо ознакомиться с паспортными данными двигателя. Значения номинальных

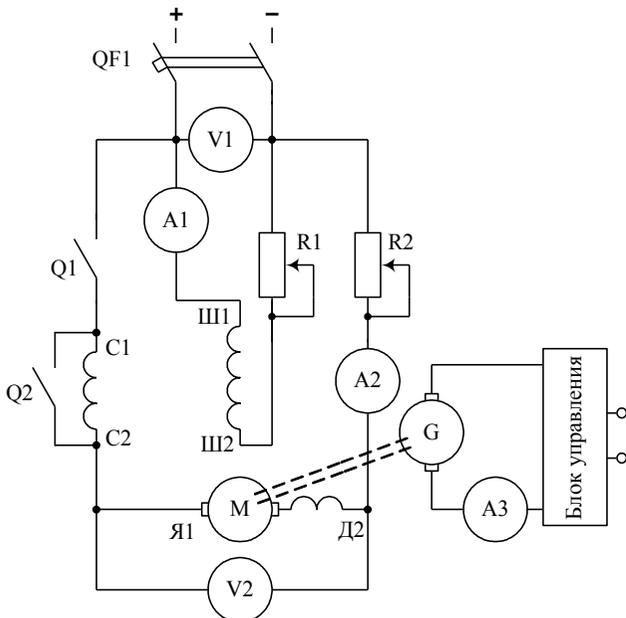


Рис.3.3. Схема экспериментального исследования двигателя постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения

напряжения и тока необходимы для выбора измерительных приборов и реостатов.

Для выполнения работы собирается схема по рис.3.3. В цепь якоря включается реостат R2, который ограничивает ток якоря при пуске двигателя, а также регулирует напряжение на зажимах якоря при снятии регулировочной характеристики.

В цепь обмотки возбуждения включается резистор R1, с помощью которого изменяется ток возбуждения.

Необходимо обратить внимание на надёжность соединений проводников в цепи возбуждения, чтобы исключить возможность обрыва цепи возбуждения во время работы двигателя. Наличие разрыва в цепи может привести к

резкому увеличению частоты вращения двигателя, двигатель “пойдёт в разнос”.

В процессе выполнения испытаний необходимо регулировать нагрузку двигателя (механическую мощность или момент). В качестве нагрузочного устройства рекомендуется использовать регулируемый тарированный генератор с возвратом электроэнергии (подробное описание нагрузочного устройства приводится в разделе 1.3). Момент на валу генератора определяется в зависимости от его тока якоря, который измеряется амперметром нагрузочного устройства АЗ, с использованием тарированной моментной характеристики генератора.

Измерение частоты вращения осуществляется одним из известных методов, например тахогенератором.

### **Пуск двигателя и изменение направления вращения**

Для ограничения тока якоря при пуске последовательно с якорем включается пусковой реостат R2, который перед включением двигателя в сеть должен быть полностью введён. Регулировочный реостат R1 в цепи возбуждения при пуске должен быть выведен ( $R_1=0$ ), чтобы магнитный поток двигателя был максимальным. Рубильник Q2 замкнут.

Включается автомат QF1 и проверяется полярность измерительных приборов цепи возбуждения и в случае необходимости приводится в соответствие при отключенном электрооборудовании.

Затем включают рубильник Q1. По мере возрастания частоты вращения двигателя ток якоря уменьшается, и пусковой реостат постепенно выводится до нуля.

Изменение направления вращения двигателя параллельного возбуждения осуществляется изменением направления тока либо в обмотке якоря, либо в обмотке возбуждения, так как при этом меняется знак вращающего момента.

Направление вращения двигателя при проведении всех опытов должно совпадать с направлением, указанным стрелкой на корпусе двигателя.

### **Рабочие, электромеханические и моментные характеристики**

Рабочие характеристики представляют собой зависимости частоты вращения  $\Omega$ , тока якоря  $I_2$ , момента на валу  $M$  и КПД  $\eta$  от мощности на валу (механической)  $P_2$ :

$$\Omega, I_2, M, \eta = f(P_2) \quad \text{при } U = U_H \text{ и } I_1 = I_{1H},$$

а электромеханическая характеристика - это зависимость частоты вращения  $\Omega$  от тока якоря  $I_2$ :

$$\Omega = f(I_2) \quad \text{при } U = U_H \text{ и } I_1 = I_{1H}.$$

Моментная характеристика представляет зависимость момента на валу от тока якоря двигателя

$$M = f(I_2) \quad \text{при } U_1 = U_H \text{ и } I_1 = I_{1H}.$$

### **Двигатель параллельного возбуждения**

Снятие рабочих и электромеханических характеристик производится в следующем последовательности.

Замыкается рубильник Q2 и, установив максимальное значение резистора R2, двигатель запускается при отсутствии нагрузки на валу. Резистором R1 устанавливается ток возбуждения, соответствующий номинальному току возбуждения  $I_{1H}$ . Величина номинального тока возбуждения сообщается преподавателем и в течение всех опытов, где не требуется регулирования частоты вращения двигателя изменением магнитного потока, поддерживается постоянной. Показания приборов при холостом ходе записывается первой строкой в табл.2.1.

Таблица 2.1. Рабочие и электромеханические характеристики

№ п. п.	Данные опыта							Расчетные данные			
	U <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	n	I <sub>3</sub>	M	Ω	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	η
	В	mA	В	А	<u>об</u> мин	А	Нм	<u>рад</u> с	Вт	Вт	-
	а) параллельное возбуждение										
1 · 6											
	б) смешанное возбуждение										
1 · 6									Расчёты не производятся		

Далее, включается нагрузочное устройство и двигатель последовательно нагружается до тока якоря, равного  $1,2I_H$  с шагом изменения тока примерно  $0,2I_H$ .

Момент на валу двигателя определяется с помощью тарировочной кривой  $M = f(I_3)$  в зависимости от величины тока нагрузочного устройства  $I_3$ .

Расчёты производятся по следующим формулам:

- мощность, потребляемая из сети (электрическая):

$$P_1 = U_1(I_1 + I_2), \text{ Вт};$$

- угловая частота вращения  $\Omega = \pi n/30$ , рад/с;

- мощность на валу (механическая):  $P_2 = M\Omega$  Вт;

- коэффициент полезного действия двигателя:

$$\eta = P_2/P_1.$$

### **Двигатель смешанного возбуждения**

Двигатель смешанного возбуждения должен иметь согласное включение параллельной и последовательной обмоток возбуждения. Перед снятием характеристик двигателя смешанного возбуждения необходимо проверить согласное включение этих обмоток. Для этого при вклю-

чѐнном рубильнике Q2 осуществляется пуск двигателя параллельного возбуждения. С помощью нагрузочного устройства двигатель нагружается до номинального тока, и фиксируется частота вращения двигателя. Затем рубильник Q2 отключается, и снова фиксируется частота вращения двигателя. Уменьшение частоты вращения двигателя указывает на согласное включение обмоток возбуждения. Увеличение скорости указывает на то, что обмотки возбуждения включены встречно. В этом случае необходимо поменять местами проводники на клеммах С1 и С2.

Изменение направления вращения двигателя смешанного возбуждения осуществляется только изменением направления тока в обмотке якоря.

Для снятия электромеханической и моментной характеристик при смешанном возбуждении рубильник Q2 отключается. Методика снятия характеристик аналогичная методике снятия характеристик двигателя параллельного возбуждения. Данные для 5-6 точек эксперимента заносятся в таблицу 2.1.б.

По данным, приведенным в таблице 2.1.а строятся рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения ( $\Omega, I_2, M, \eta = f(P_2)$  при  $U = U_H$  и  $I_1 = I_{1H}$ ). Электромеханические (скоростные)  $\Omega = f(I_2)$  и моментные  $M = f(I_2)$  характеристики строятся по данным таблицы 2.1. для двигателя параллельного и смешанного возбуждения.

### **Регулировочные характеристики двигателя параллельного возбуждения**

Регулировочные характеристики позволяют определить возможность регулирования частоты вращения двигателя и возможный диапазон регулирования.

*Регулировочная характеристика при регулировании напряжения на якоре*

Регулировочная характеристика при изменении напряжения на якоре двигателя представляет собой зависимость:

$$\Omega = f(U_2) \text{ при } I_1 = \text{const} \text{ и } I_2 = \text{const}.$$

Напряжение на якоре регулируется реостатом R2. Ток якоря поддерживается заданной величины регулированием нагрузки на валу с помощью нагрузочного устройства.

Опыт проводится следующим образом. После пуска двигателя реостат R2 выводится полностью ( $R_2=0$ ) и устанавливается номинальный ток возбуждения двигателя. Ток возбуждения в дальнейшем не регулируется. При помощи нагрузочного устройства устанавливается номинальный или заданный преподавателем ток якоря двигателя. Показания приборов заносятся в таблицу 2.2,а первой строкой.

Таблица 2.2. Регулировочные характеристики

№ п./п.	U <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	n	Ω
	В	mA	В	А	об/ мин	рад/ с
	а) Регулирование частоты вращения изменением напряжения на якоре					
1 · 6						
	б) Регулирование частоты вращения изменением тока возбуждения					
1 · 6						

Далее, напряжение на якоре двигателя  $U_2$  постепенно уменьшают, введением реостата R2. При этом ток якоря с помощью нагрузочного устройства поддерживается заданной величины. В процессе опыта задается 5-6 значений напряжения. При этом желательно, чтобы конечная скорость двигателя была близкой к нулю.

### Регулировочная характеристика при регулировании тока возбуждения

Регулировочная характеристика двигателя при изменении тока возбуждения представляет собой зависимость:

$$\Omega = f(I_1) \quad \text{при} \quad U = U_H \quad \text{и} \quad I_2 = \text{const.}$$

Опыт проводится следующим образом. После пуска двигателя реостат R1 в цепи возбуждения и реостат R2 в цепи якоря полностью выводятся. С помощью нагрузочного устройства устанавливается номинальный или заданный преподавателем ток якоря  $I_2$ . В течение всего опыта этот ток поддерживается постоянной величины. Показания приборов заносятся первой строкой в таблицу 2.2,б. Уменьшая ток возбуждения реостатом R1, фиксируют скорость двигателя. Опыт проводят до тех пор, пока частота вращения двигателя не достигнет значения  $(1,2 \dots 1,3)\Omega_H$ . Результаты измерения для 5-6 значений тока возбуждения заносятся в таблицу 2.2.

### Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Используя данные рабочих характеристик двигателя

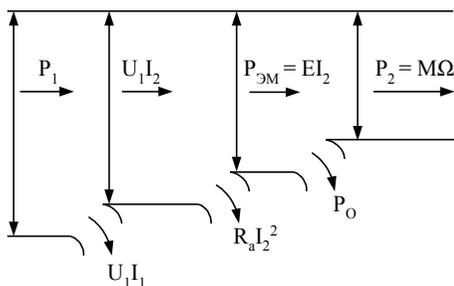


Рис.3.4. Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

параллельного возбуждения

(табл.2.1.а), для заданного значения механической мощности построить энергетическую диаграмму (рис.3.4)

Электрическая мощность, подводимая к двигателю из сети:

$$P_1 = U_1(I_1 +$$

$I_2).$

Часть этой мощности тратится (теряется) на нагрев элементов цепи возбуждения  $P_B$

$$P_B = U_1 I_1,$$

и нагрев элементов (на потери) в цепи якоря  $\Delta P_a$

$$\Delta P_a = R_a I_2^2.$$

Остальная часть мощности составляет электромагнитную мощность  $P_{ЭМ}$

$$P_{ЭМ} = EI_2,$$

которая преобразуется в механическую мощность  $P_{МХ}$ :

$$P_{ЭМ} = P_{МХ} = EI_2 = P_1 - P_B - \Delta P_a.$$

Полезная механическая мощность  $P_2 = M\Omega$ , отдаваемая двигателем рабочей машине (нагрузке), меньше мощности  $P_{ЭМ}$  на величину мощности  $P_0$ , необходимой для покрытия потерь в стали якоря  $\Delta P_{СТ}$  и механических потерь в двигателе (трение, вентиляция и др.)  $\Delta P_{МЕХ}$ . Потери  $P_0$  определяются по формуле:

$$P_0 = \Delta P_{СТ} + \Delta P_{МЕХ} = P_{ЭМ} - P_2.$$

### **Содержание отчёта**

1. Паспортные данные исследуемого двигателя, нагрузочной машины и технические характеристики используемых приборов.

2. Схема экспериментальной установки.

3. Таблицы результатов измерений.

4. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения.

5. Электромеханические характеристики двигателя при параллельном и смешанном возбуждении.

6. Моментные характеристики двигателя при параллельном и смешанном возбуждении.

7. Энергетическая диаграмма с расчётными значениями величин.

8. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Разъясните назначение каждого из элементов схемы экспериментального исследования двигателя.

2. В чем отличие двигателя параллельного возбуждения от двигателя смешанного возбуждения, и как получают каждый из этих способов возбуждения в испытываемом двигателе?

3. В каком положении должен находиться пусковой реостат при пуске двигателя постоянного тока (ДПТ)?

5. Как изменяют направление вращения ДПТ?

6. Как изменяется частота вращения ДПТ параллельного возбуждения при увеличении нагрузки?

7. Где располагается обмотка последовательного возбуждения?

### **РАБОТА № 3. Исследование электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения**

**Цель работы:** ознакомиться со способами пуска и изменения направления вращения двигателя последовательного возбуждения, а также исследовать рабочие, электромеханические, моментные и регулировочные характеристики электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

#### **Содержание работы:**

1. Собрать схему экспериментального исследования двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

2. Осуществить пуск и изменить направление вращения двигателя.

3. Снять и построить рабочие, электромеханическую и моментную характеристики при номинальном напряжении.

4. Снять и построить электромеханическую и моментную характеристики двигателя при наличии дополнительного сопротивления в цепи якоря.

5. Снять и построить регулировочные характеристики.
6. Дать оценку результатов испытаний.

## Выполнение работы

### Электрооборудование испытательного стенда

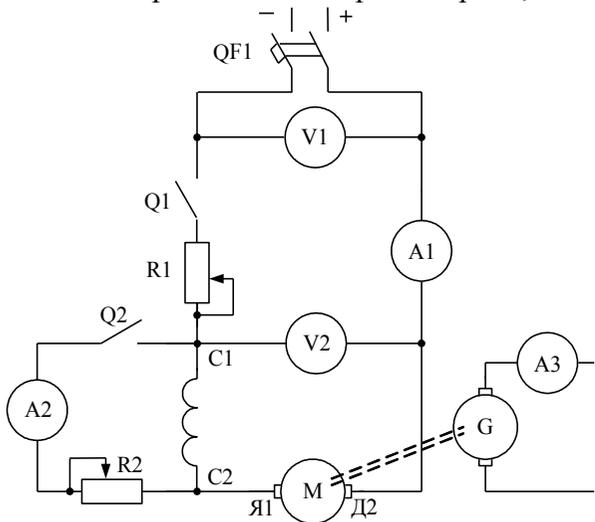
Перед сборкой схемы необходимо ознакомиться с паспортными данными двигателя. Значения номинальных напряжения и тока необходимы для выбора приборов и реостатов.

Для выполнения работы собирается схема по рис. 3.5. В цепь якоря включается резистор R1, который ограничивает ток во

время пуска, а также регулирует напряжение на якоре. Параллельно обмотке возбуждения включается реостат R2, с помощью которого регулируется ток возбуждения.

Рис.3.5. Схема экспериментального исследования двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Вольтметры V1 и V2 измеряют напряжение в сети и на якоре двигателя, которые могут отличаться на величину падения напряжения на реостате R1. Амперметр A1 измеряет ток якоря. Ток возбуждения, про-



ет ток во время пуска, а также регулирует напряжение на якоре. Параллельно обмотке возбуждения включается реостат R2, с помощью которого регулируется ток возбуждения. Вольтметры V1 и V2 измеряют напряжение в сети и на якоре двигателя, которые могут отличаться на величину падения напряжения на реостате R1. Амперметр A1 измеряет ток якоря. Ток возбуждения, про-

текающий по обмотке С1-С2, при включённом рубильнике Q2 определяется как разность показаний амперметров А1 и А2, т.е.  $I_B = I_1 - I_2$ .

Для нагружения двигателя механической мощностью используется нагрузочное устройство (НУ). Рекомендуется использовать НУ с возвратом энергии в сеть (описание НУ см. в разделе 1.3). НУ используется как комплектное оборудование, не требующее сборки схемы и соединения с валом испытываемого двигателя.

Измерение частоты вращения осуществляется одним из способов, описанных в разделе 1.7.

### **Пуск двигателя и изменение направления вращения**

Пуск двигателя последовательного возбуждения имеет ту особенность, что его нельзя запускать при отсутствии нагрузки на валу. Эта особенность отличает двигатель последовательного возбуждения от всех остальных электродвигателей. Вместе с тем, имеющий нагрузку на валу двигатель запускается так же, как двигатель параллельного возбуждения.

Пуск двигателя осуществляется в следующей последовательности. При отключённом автомате QF1 устанавливается наибольшее сопротивление реостата R1. Рубильники Q1 и Q2 разомкнуты. Включается нагрузочное устройство, которое должно создать нагрузку на валу двигателя приблизительно 20-30 % номинальной. Включается автомат QF1 и рубильник Q1. По мере разгона двигателя реостат R1 постепенно выводится до нулевого сопротивления, так как при возрастании частоты вращения растёт противо-ЭДС и ток двигателя уменьшается. Выводить реостат R1 нужно так, чтобы не было слишком больших бросков тока. По окончании пуска реостат R1 должен быть полностью выведен.

Направление вращения двигателя изменяют, меняя направление тока либо в обмотке якоря, либо в обмотке возбуждения, так как при этом меняется направление действия электромагнитного момента. При одновременном изменении направления тока в обеих обмотках (изменении полярности источника питания) направление вращения не меняется.

### **Рабочие, электромеханическая и моментная характеристики при номинальном напряжении**

Рабочие характеристики представляют собой зависимости частоты вращения якоря  $\Omega$ , тока якоря  $I_1$ , момента на валу  $M$ , КПД  $\eta$  от мощности на валу  $P_2$  при номинальном напряжении на двигателе:

$$\Omega, I_1, M, \eta = f(P_2) \text{ при } U_2 = U_H.$$

Электромеханическая (скоростная) характеристика – это зависимость частоты вращения якоря  $\Omega$  от тока якоря  $I_1$ :

$$\Omega = f(I_1).$$

Моментная характеристика – это зависимость момента на валу  $M$  от тока якоря  $I_1$ :

$$M = f(I_1).$$

Снятие всех трех характеристик при номинальном напряжении производится одновременно по результатам одного испытания двигателя. Опыт проводится в следующей последовательности.

Рубильник Q2 разомкнут. Осуществляется пуск двигателя. По мере разбега двигателя пусковой реостат R1 выводится полностью. С помощью нагрузочного устройства устанавливают ток якоря  $(I, 2 \dots I, 3) I_H$ . Результаты измерений заносятся первой строкой в таблицу 3.1.а.

№	Данные опытов						Расчёт			
	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>1</sub>	n	I <sub>3</sub>	M	Ω	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	η

п./п	В	В	А	об/мин	А	Нм	с <sup>-1</sup>	Вт	Вт	-
	а) без дополнительного сопротивления в цепи якоря									
1 · 6										
	б) с дополнительным сопротивлением в цепи якоря									
1 · 6								Расчёты не производятся		

Таблица 3.1. Данные рабочих и электромеханических характеристик

Постепенно уменьшая нагрузку двигателя до возможного минимума, записывают показания приборов при 5-6 разных значениях нагрузки на валу. Момент двигателя определяется с помощью тарировочной кривой  $M = f(I_3)$  по величине тока нагрузочного устройства  $I_3$ .

Расчёты производятся по следующим формулам:

- мощность, потребляемая из сети  $P_1 = U_1 I_1$ , Вт;

- мощность на валу двигателя  $P_2 = M\Omega$ , Вт,

где  $\Omega = \pi n/30$ , рад/с;

- коэффициент полезного действия  $\eta = P_2 / P_1$ .

### **Электромеханическая и моментная характеристики при введении дополнительного сопротивления в цепь якоря**

Эти характеристики снимаются аналогично предыдущей, только реостат R1 в цепи якоря вводится на некоторую величину, заданную преподавателем. Результаты измерений при 5-6 различных значениях тока  $I_1$  заносятся в таблицу 3.1.б.

По данным табл.3.1 строятся электромеханические и моментные характеристики при номинальном напряжении и при введённом резисторе R1. Рекомендуется совмещать

одноименные характеристики на одной координатной плоскости, что облегчит их сопоставление.

### **Регулировочные характеристики двигателя последовательного возбуждения**

Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения осуществляется путём регулирования напряжения, подводимого к двигателю, или регулирования тока возбуждения.

#### *Регулирование частоты вращения изменением напряжения на якоре*

Регулировочная характеристика двигателя при регулировании напряжения на якоре представляет собой зависимость:

$$\Omega = f(U_2) \quad \text{при } I_1 = \text{const}.$$

Напряжение на двигателе регулируется изменением сопротивления резистора R1 в цепи якоря. Опыт проводится следующим образом. После пуска двигателя резистор R1 полностью выводится. При помощи нагрузочного устройства в цепи якоря двигателя устанавливается номинальный ток или ток, заданный преподавателем. Показания измерительных приборов заносятся в таблицу 3.2 первой строкой. Далее, напряжение на зажимах якоря двигателя  $U_2$  постепенно уменьшается введением резистора R1. При этом ток якоря  $I_1$  поддерживается неизменным с помощью нагрузочного устройства. Опыт продолжается до тех пор, пока частота вращения двигателя не достигнет значений (0,3...0,4) от номинальной. Результаты измерений фиксируются при 5-6 различных значениях напряжения. Показания приборов заносятся в таблицу 3.2.а.

№	$U_1$	$U_2$	$I_1$	$I_2$	$I_B$	n	$\Omega$	
---	-------	-------	-------	-------	-------	---	----------	--

п./п.	В	В	А	А	А	об/ мин	рад/ с	При- ме- ча- ние
	а) регулирование частоты вращения изменением напряжения на якоре							
1 . 6				0 0 0	$I_1$ $I_1$ $I_1$			$I_B = I_1$
	б) регулирование частоты вращения изменением тока возбуждения							
1 . 6								$I_B = I_1 - I_2$

Таблица 3.2. Регулировочные характеристики

*Регулирование частоты вращения изменением тока возбуждения*

Регулировочная характеристика двигателя при изменении тока возбуждения представляет собой зависимость:

$$\Omega = f(I_B) \quad \text{при} \quad U = U_H \quad \text{и} \quad I_1 = \text{const.}$$

Ток возбуждения регулируется изменением сопротивления резистора R2. Опыт проводится следующим образом.

После пуска двигателя реостат R1 полностью выводится, реостат R2 устанавливается на максимальное сопротивление и включается рубильник Q2. С помощью нагрузочного устройства, ток якоря  $I_1$  доводится до заданной величины, аналогичной величине этого тока в таблице 3.2.а (величина этого тока в течение всего опыта поддерживается постоянной). Показания приборов заносятся первой строкой в таблицу 3.2.б. Далее, уменьшением сопротивления реостата R2 устанавливается ток  $I_2$  около 15% от номинального, а нагрузочным устройством восстанавливается заданный ток якоря. Полученные данные записываются второй строкой в таблицу 3.2.б. Далее, действуя аналогично, ток  $I_2$  увеличивают последовательно примерно на 10% и записывают результаты измерений.

Обе регулировочные характеристики рекомендуется построить на одной координатной плоскости. Это облегчит сопоставление двух способов регулирования частоты вращения двигателя.

### **Содержание отчёта**

1. Паспортные данные исследуемого двигателя и технические характеристики используемых измерительных приборов.

2. Схема экспериментальной установки.

3. Таблицы результатов измерений.

4. Рабочие характеристики двигателя при номинальном напряжении на двигателе.

5. Электромеханические  $\Omega = f(I_l)$  и моментные  $M = f(I_l)$  характеристики двигателя при номинальном напряжении и при введённом добавочном сопротивлении R1.

6. Регулировочные характеристики.

7. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Разъясните назначение каждого из элементов схемы экспериментального исследования двигателя.

2. Каковы особенности пуска двигателя последовательного возбуждения?

3. Объясните характер электромеханической характеристики двигателя последовательного возбуждения.

4. Как проводится опыт по снятию регулировочной характеристики  $\Omega = f(I_B)$ ?

5. Какими способами регулируется частота вращения ДПТ в лабораторной работе?

6. Назовите главное преимущество двигателя последовательного возбуждения в сравнении с двигателем параллельного возбуждения.

## **РАБОТА № 4. Тахогенераторы**

**Цель работы:** изучить устройство и принцип действия и основные характеристики тахогенератора постоянного тока и асинхронного тахогенератора.

**Содержание работы:**

1. Ознакомиться с устройством тахогенератора постоянного тока и его паспортными данными.
2. Снять и построить выходные характеристики тахогенератора в диапазоне частоты вращения от 0 до  $1,25n_H$ :
  - а) при холостом ходе –  $R_{НАГР} = \infty$ ;
  - б) при нагрузке –  $R_{НАГР} = 500 \text{ Ом}$ .
3. Ознакомиться с устройством и основными техническими данными асинхронного тахогенератора.
4. Определить остаточную ЭДС (нулевой сигнал) тахогенератора.
5. Снять и построить выходные характеристики тахогенератора в диапазоне частоты вращения от 0 до  $1,25n_H$ :
  - а) при холостом ходе –  $R_{НАГР} = \infty$ ;
  - б) при нагрузке –  $R_{НАГР} = 500 \text{ Ом}$ .
6. Дать оценку результатам испытаний.

**Предварительные замечания**

*Тахогенератором* называется электрическая машина, предназначенная для преобразования частоты вращения в пропорциональный ей электрический сигнал (напряжение).

Вольтметр, измеряющий это напряжение, может быть отградуирован непосредственно в оборотах в минутах.

По роду тока тахогенераторы разделяют на тахогенераторы переменного и постоянного тока. Тахогенераторы переменного тока могут быть асинхронными или синхронными.

Синхронные тахогенераторы конструктивно представляют собой однофазные синхронные генераторы малой

мощности с явно выраженными полюсами. Ротор таких генераторов выполняют в виде постоянных магнитов, имеющих форму звездочки.

Асинхронный тахогенератор по конструкции не отличается от двухфазного асинхронного исполнительного двигателя с полым немагнитным ротором и состоит из внешнего и внутреннего статора и ротора в виде полого цилиндра из немагнитного материала.

Внешний и внутренний статоры набираются из штампованных пластин электротехнической стали или пермаллоя (шихтованные). На статоре располагаются две сдвинутые в пространстве на 90 электрических градусов обмотки. Они могут располагаться как на внешнем, так и на внутреннем статоре. Одна из обмоток подключается к источнику питания и называется обмоткой возбуждения (ОВ). С другой обмотки снимается выходное напряжение тахогенератора. Эта обмотка называется выходной, или генераторной (ОГ). Полый ротор асинхронного тахогенератора, в отличие от ротора исполнительного двигателя, имеет большее активное сопротивление. Он выполняется из константана, специального манганина, фосфористой, марганцовистой бронзы или других сплавов, обладающих большим удельным электрическим сопротивлением, мало зависящим от изменения температуры. Реже используются алюминиевые сплавы. При изготовлении полого ротора стремятся повысить однородность структуры его материала и выдержать точность его геометрических размеров. С целью уменьшения влияния неравномерности воздушного зазора и несимметрии ротора на выходную характеристику точные асинхронные тахогенераторы чаще всего имеют две пары полюсов ( $2p = 4$ ).

Асинхронные тахогенераторы изготавливаются на синхронные скорости от 1500 до 30000 об/мин при частоте источника питания 50...1000 Гц.

Тахогенераторы постоянного тока - это небольшие генераторы постоянного тока чаще с возбуждением от постоянных магнитов, реже – с независимым возбуждением. Конструктивно они не отличаются от обычных машин постоянного тока малой мощности. Существенным достоинством тахогенераторов с постоянными магнитами является отсутствие надобности в постороннем источнике возбуждения, малое влияние нагрева на выходную характеристику и простота устройства.

Рабочая частота вращения у тахогенераторов постоянного

тока лежит в пределах  $n = 1000 \div 7000$  об/мин.

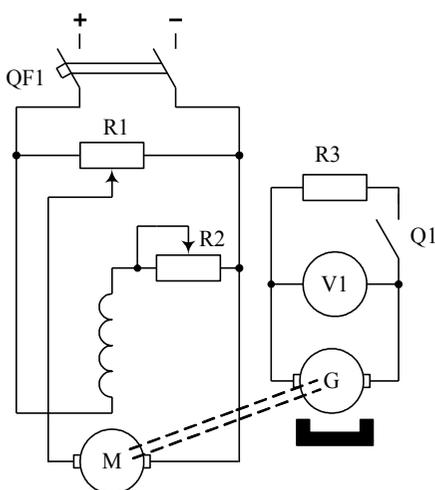


Рис.3.6. Схема испытания тахогенератора постоянного тока

### Выполнение работы

#### Испытание тахогенератора постоянного тока

Зависимость выходного напряжения на зажимах якоря  $U_1$  от скорости (частоты) вращения  $n$  тахогенератора при постоянном магнитном

потоке возбуждения  $\Phi_r$  и постоянном сопротивлении нагрузки  $R_3$  т. е.  $U = f(n)$  называется выходной характеристикой тахогенератора постоянного тока.

Схема для проведения опыта снятия выходной характеристики тахогенератора представлена на рис.3.6. Опыт проводят в такой последовательности. Ползунок потенциометра  $R_1$  устанавливается в положение, соответствующее минимальному выходному напряжению. Реостат

R2 полностью выводится. При разомкнутой цепи нагрузки тахогенератора (Q1 разомкнут,  $R_{\text{НАГР}}=\infty$ ) включением автомата QF1 на приводной двигатель М подается напряжение. Частота вращения двигателя сначала увеличивается изменением напряжения на якоре потенциометром R1, а при высоких скоростях - реостатом R2 в цепи возбуждения. Для значений частоты вращения тахогенератора в диапазоне от 0 до  $1,25n_H$  необходимо записать в таблицу 4.1. показание вольтметра V1, измеряющего выходное напряжение на якоре тахогенератора. Опыт также проводится для сопротивления нагрузки  $R3=500$  Ом (выключатель Q1 замкнут). Полученные данные также заносятся в таблицу 4.1.

Таблица 4.1.Выходные характеристики тахогенератора

постоянного тока

R3= $\infty$	U <sub>1</sub>	В						
	n	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	0					
R3=500 Ом	U <sub>1</sub>	В						
	n	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	0					

По данным табл.4.1 строятся выходные характеристики тахогенератора.

### Испытание асинхронного тахогенератора

Опыт по определению остаточной ЭДС асинхронного генератора проводится с использованием оборудования, схема которого представлена на рис. 3.7.

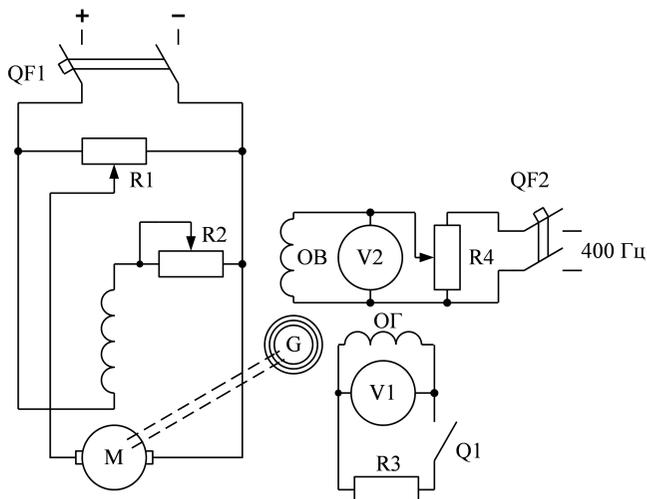


Рис.3.7. Схема испытания асинхронного тахогенератора

При неподвижном роторе тахогенератора на обмотку возбуждения подается номинальное напряжение ( $U_2=U_{ВН}$ ) при номинальной частоте  $f_1=400$  Гц.

При этом снимают показания высокоомного вольтметра (милливольтметра) V1 при отключённой нагрузки (Q1 разомкнут,  $R_{НАГР} = R_3=\infty$ ) и при подключенной нагрузке (Q1 замкнут,  $R_{НАГР}=R_3=500$  Ом). Измеренные напряжения записываются в первый столбец таблицы 4.2 (при  $n=0$ ).

Таблица 4.2. Выходные характеристики асинхронного тахогенератора

R3= $\infty$	U <sub>1</sub>	В						
	n	$\frac{об}{мин}$	0					
R3=500 Ом	U <sub>1</sub>	В						
	n	$\frac{об}{мин}$	0					

Зависимость выходного напряжения  $U_1$  на зажимах обмотки управления (генераторной) от скорости вращения  $n$  тахогенератора при постоянном напряжении  $U_2$  и частоте

источника питания  $f_1$  на зажимах обмотки возбуждения и неизменной нагрузке  $R_{\text{НАГР}}$  называется выходной характеристикой асинхронного генератора  $U_1=f(n)$ .

Опыт по снятию выходной характеристики асинхронного генератора проводится по схеме на рис.3.7. Потенциометр R1 устанавливается в положение, соответствующее минимальному выходному напряжению. Реостат R2 полностью выводится. Обмотка возбуждения тахогенератора подключается к источнику питания с частотой 400 Гц и устанавливается номинальное напряжение возбуждения. При отключенной нагрузке тахогенератора (Q1 разомкнут,  $R_{\text{НАГР}}=\infty$ ) включением автомата QF1 подается напряжение на приводной двигатель М. Сначала скорость двигателя увеличивается изменением напряжения на якоре потенциометром R1, а при больших скоростях – уменьшением тока возбуждения двигателя (реостатом R2 в цепи возбуждения). Для значений скорости вращения тахогенератора в диапазоне от 0 до  $1,25n_H$  записывают показания вольтметра V1, измеряющего напряжение на обмотке управления. Аналогичным образом проводится опыт по снятию выходной характеристики тахогенератора при подключенной нагрузке при  $R_{\text{НАГР}}=R_3=500$  Ом (выключатель Q1 замкнут). Полученные данные записываются в таблицу 4.2.

### **Содержание отчёта**

1. Паспортные данные тахогенераторов, приводного двигателя и технические характеристики используемых приборов.

2. Схемы экспериментальных установок.

3. Таблицы результатов измерений.

4. Выходные характеристики тахогенератора постоянного тока (обе на одной координатной плоскости).

5. Выходные характеристики асинхронного тахогенератора (обе на одной координатной плоскости).

6. Выводы.

## **Контрольные вопросы**

1. Разъясните назначение каждого из элементов схемы экспериментального исследования двигателя.
2. Как располагаются обмотки возбуждения и генераторная в конструкции асинхронного тахогенератора?
3. Какой вид должна иметь выходная характеристика тахогенератора?
4. Как влияет ток в якоре тахогенератора постоянного тока на крутизну выходной характеристики?
5. Какими способами может осуществляться возбуждение тахогенератора постоянного тока?

## **РАБОТА № 5. Исследование универсального коллекторного двигателя**

**Цель работы:** изучить устройство, принцип действия, рабочие характеристики универсального коллекторного двигателя на постоянном и переменном токе, способы регулирования скорости вращения.

### **Содержание работы:**

1. Ознакомиться с конструкцией универсального коллекторного двигателя и его паспортными данными.
2. Снять и построить рабочие характеристики двигателя на постоянном токе.
3. Снять и построить рабочие характеристики двигателя на переменном токе.
4. Снять и построить регулировочные характеристики двигателя на переменном и на постоянном токе.
5. Снять и построить механические характеристики двигателя на переменном токе: а) при нормальной схеме;  
б) при шунтировании обмотки якоря; в) при шунтировании обмотки возбуждения.
6. Дать оценку результатам испытаний.

## **Предварительные замечания**

В устройствах автоматики, приборах точной механики, различных бытовых приборах, электрифицированном ручном инструменте и т.п. широко применяют универсальные коллекторные двигатели (УКД) мощностью от нескольких ватт до сотен ватт, которые могут работать как от источников питания постоянного тока, так и однофазного переменного тока с примерно одинаковыми характеристиками.

Необходимость применения УКД встречается в тех случаях, когда неизвестно заранее от какого источника будет осуществляться питание, или когда по условиям эксплуатации необходимо переходить от питания постоянным током к питанию током переменным. УКД дают возможность плавного регулирования скорости в широком диапазоне при питании их от источников как постоянного, так и переменного тока промышленной частоты. Поэтому эти двигатели применяются также тогда, когда при наличии источника с промышленной частотой (сети) необходимо регулировать скорость или требуется получить высокую скорость вращения порядка 3000-20000 об/мин, выше синхронной скорости синхронных и асинхронных двигателей. УКД развивают относительно высокий пусковой момент и имеют небольшие размеры и массу вследствие высокой скорости вращения.

По конструкции УКД подобен двигателю постоянного тока с последовательным возбуждением без дополнительных полюсов. В УКД обмотка возбуждения разделяется на две части, включаемые с обеих сторон якоря. Такое включение (симметрирование обмотки) позволяет уменьшить радиопомехи, создаваемые двигателем. Обмотка возбуждения имеет разделенные выводы для подключения двигателя на постоянном и переменном токе.

## **Выполнение работы**

## Электрооборудование испытательного стенда

Электрическая схема для проведения опытов изображена на рис. 3.8. Используемый агрегат состоит из универсального

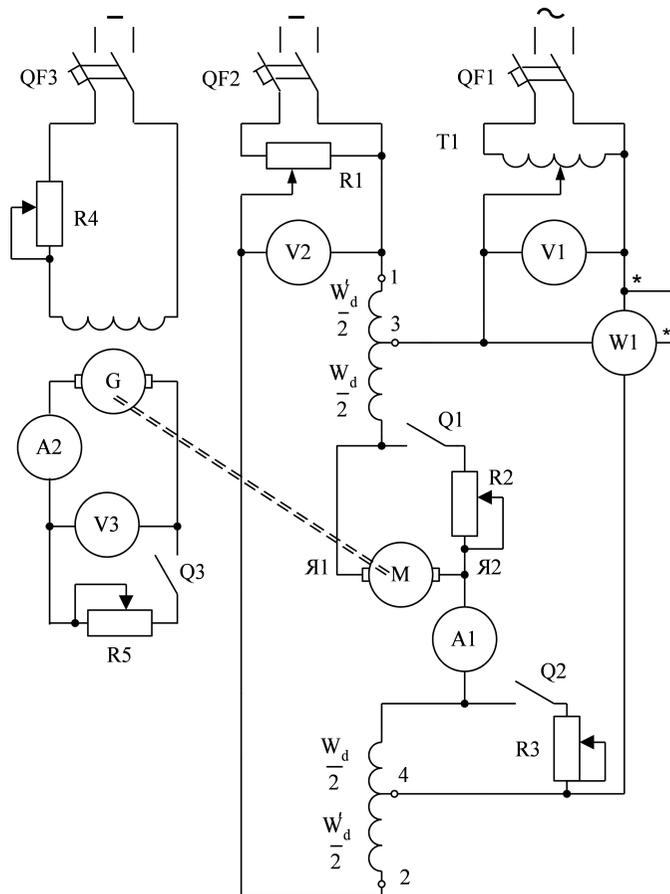


Рис.3.8. Электрическая схема для снятия характеристик универсального коллекторного двигателя

коллекторного двигателя М и нагрузочной машины постоянного тока независимого возбуждения G. Необходимо за-

писать тип машин, номинальное значение мощности, напряжения, тока, КПД, частоты вращения.

Измерительные приборы, регулировочные и нагрузочные реостаты выбирают в соответствии с номинальными данными испытуемого УКД и нагрузочного генератора с учетом регулирования напряжения и тока во время опытов от нуля до номинального значения.

При проведении испытаний на постоянном токе напряжение подводят к зажимам 1 и 2, при переменном - к зажимам 3 и 4.

Рекомендуется вначале провести опыты на переменном токе, а затем на постоянном. Для изменения направления вращения двигателя следует изменить направление тока в якоре (проводники на клеммах Я1 - Я2 поменять местами).

### **Рабочие характеристики**

Рабочие характеристики УКД представляют собой зависимости потребляемой мощности  $P_{\text{д}}$ , полезной мощности (на валу)  $P_2$ , частоты вращения  $n$ , тока  $I_{\text{д}}$ , КПД  $\eta$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$  двигателя от момента на валу  $M$  при постоянном напряжении на двигателе:

$$P_{\text{д}}, P_2, n, I_{\text{д}}, \eta, \cos\varphi = f(M), \quad \text{при } U = \text{const.}$$

Опыт снятия рабочих характеристик УКД при питании переменным током проводится в такой последовательности.

Лабораторный автотрансформатор Т1 устанавливается в положение, соответствующее наименьшему выходному напряжению (вольтметр V1). При разомкнутых ключах Q1, Q2 и Q3 включается автомат QF1. После этого плавно увеличивается подводимое к двигателю напряжение до такой величины (не более  $0,5U_{\text{н}}$ ), при которой скорость вращения будет близка к номинальной. Возбуждается генератор G (включается QF3) и, регулируя ток возбуждения реостатом R4, устанавливается номинальное напряжение генератора,

которое поддерживается постоянным во время проведения опыта. При наибольшем значении нагрузочного реостата R5 замыкается Q3 и уменьшением R5 двигатель загружается до номинальной нагрузки, когда  $I_d=I_H$ ,  $U_d=U_H$  и  $n=n_H$ . При этом заполняется первая строка таблицы 5.1.

После этого нагрузка двигателя уменьшается с примерно одинаковыми интервалами изменения тока якоря генератора до тех пор, пока скорость вращения двигателя не достигнет  $1,5n_H$ . Потребляемая мощность при питании переменным током измеряется ваттметром W1. Частота вращения определяется строботаксометром или тахогенератором. Результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу 5.1.

Таблица 5.1. Рабочие характеристики УКД на переменном токе

№	Измерения						Расчетные величины					
	$U_1$	$I_1$	$P_1$	$n$	$U_3$	$I_2$	$P_Г$	$P_2$	$\Omega$	$M$	$\eta$	$\cos\varphi$
	В	А	Вт	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	В	А	Вт	Вт	$\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	Нм	-	-

Необходимые расчетные величины получаются из ниже приведенных соотношений:

- мощность на выходе генератора  $P_Г = U_3 I_2$ , Вт;
- мощность на входе генератора (полезная мощность на валу двигателя)  $P_2 = P_Г / \eta_г$  (КПД генератора при вычислениях можно принять неизменным и равным 0,8);
- угловая частота  $\Omega = \pi n / 30$ , рад/с;
- момент на валу двигателя  $M = P_2 / \Omega$ , Нм;
- КПД двигателя  $\eta = P_2 / P_1$ ;
- коэффициент мощности  $\cos\varphi = P_1 / (U_1 I_1)$ .

Опытные данные для построения рабочих характеристик УКД при питании постоянным током получаются при включении автомата QF2. Напряжение на двигателе поддерживается неизменным потенциометром R1. Ток  $I_1$  изме-

ряется амперметром А1. Результаты измерений и расчетов заносятся в таблицу 5.2.

Потребляемая мощность при питании постоянным током рассчитывается по формуле:  $P_1 = U_2 I_1$ .

На основании расчетных данных табл. 5.1 и 5.2 на совмещенном графике строятся рабочие характеристики УКД:

при питании постоянным током – сплошными линиями;  
при питании переменным током – пунктирными линиями.

Таблица 5.2. Рабочие характеристики УКД на постоянном токе

№ п.п	Измерения					Расчетные величины					
	U <sub>2</sub>	I <sub>1</sub>	n	U <sub>3</sub>	I <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>Г</sub>	P <sub>2</sub>	Ω	M	η
	В	А	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	В	А	Вт	Вт	Вт	$\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	Нм	-

### Регулировочные характеристики

Регулировочные характеристики УКД представляют зависимости угловой частоты  $\Omega$  от подведенного напряжения  $U$  при постоянном моменте  $M$ , т. е.

$$\Omega = f(U) \quad n_{пу} \quad M = const.$$

При питании переменным током подводимое напряжение изменяется автотрансформатором Тр1, при питании постоянным током – реостатом, включенным по схеме потенциометра. Напряжение, подводимое к двигателю, плавно увеличивается до такой величины, при которой частота вращения достигает номинального значения. Включается QF3 и генератор возбуждается. Реостат R4 выводится до нуля. При максимальном сопротивлении нагрузки R5 включается Q3, устанавливается заданный преподавателем ток якоря генератора  $I_2$ . Одновременно увеличивают подводимое к двигателю напряжение до номинального значения. Установив для двигателя  $U_H$ , при заданном  $I_2$  получают первую точку характеристики. Постоянство момента сопротивления на валу двигателя во время опыта поддерживают

регулируем ток генератора  $I_2$ . Затем подводимое к двигателю напряжение уменьшается через примерно одинаковые интервалы до такой минимальной величины, при которой удастся поддерживать заданный момент на валу.

Опыты для снятия регулировочных характеристик УКД при питании постоянным током и при питании переменным током проводится одинаково. Результаты измерений заносятся в таблицу 5.3.

Таблица 5.3. Регулировочные характеристики УКД

№ п.п.	Переменный ток			Постоянный ток			Примечание
	$U_1$	n	$\Omega$	$U_1$	n	$\Omega$	
	В	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	$\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	В	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	$\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	А
							$I_2 = \text{const}$

### Механические характеристики

Механические характеристики представляют зависимости  $\Omega = f(M)$  при постоянном напряжении. Момент изменяется от номинального до такого значения, при котором угловая частота вращения достигает  $(1,3 \dots 1,5)\Omega_H$ . На переменном токе механические характеристики снимаются при шунтировании обмотки якоря (закрывается ключ Q1) и обмотки возбуждения (закрывается ключ Q2). Шунтирующие реостаты в обоих случаях перед пуском устанавливаются в положение максимального сопротивления, а затем регулируются таким образом, чтобы при номинальном моменте на валу и номинальном напряжении ток, протекающий через реостат, составлял примерно 0,25 тока основной цепи. Результаты измерений заносятся в табл. 5.4.

Таблица 5.4. Механические характеристики УКД

№ п.п.	Опытные данные					Расчетные данные		
	$U_1$	$I_1$	$U_3$	$I_2$	n	$\Omega$	$P_2$	M

	В	А	В	А	об мин	рад с	Вт	Нм
а) Шунтирование обмотки возбуждения								
1								
..								
5								
б) Шунтирование обмотки якоря								
1								
..								
5								

### Содержание отчёта

1. Паспортные данные исследуемого двигателя, нагрузочной машины и технические характеристики измерительных приборов.

2. Схема экспериментальной установки.

3. Таблицы результатов измерений.

4. Построенные на совмещенном графике рабочие характеристики УКД на переменном и постоянном токе.

5. Механические характеристики при разных способах включения шунтирующих сопротивлений.

6. Регулировочные характеристики УКД.

7. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Какой двигатель называется УКД?

2. Какая особенность конструкции УКД?

3. Поясните назначение всех элементов, входящих в схему экспериментального исследования УКД.

4. Почему при включении УКД в сеть переменного тока уменьшают число витков в обмотке возбуждения?

5. С какой целью магнитную систему УКД делают шихтованной?

6. Перечислите способы регулирования частоты вращения УКД.

# ГЛАВА ЧЕТВЁРТАЯ

## ТРАНСФОРМАТОРЫ

### РАБОТА № 6. Исследование трёхфазного двухобмоточного трансформатора

**Цель работы:** освоить методику опытного определения основных параметров и характеристик, исследовать рабочие свойства трёхфазного двухобмоточного трансформатора.

**Содержание работы:**

1. Ознакомиться с конструкцией исследуемого трансформатора и определить его паспортные данные.
2. Определить сопротивление обмоток трансформатора постоянному току.
3. Снять и построить характеристики холостого хода.
4. Определить коэффициент трансформации.
5. Снять и построить характеристики короткого замыкания.
6. На основании данных п.3 и п.5 определить мощность холостого хода  $P_{ХХ}$ , мощность короткого замыкания  $P_{КЗ}$ , ток холостого хода в процентах  $I_X\%$ , напряжение короткого замыкания  $U_K\%$ .
7. По данным п.п. 2,3,4,5 определить параметры Т-образной схемы замещения трансформатора и вычертить её с указанием значений параметров.
8. Снять и построить внешние характеристики трансформатора при  $\cos\varphi_2=1$  и  $\cos\varphi_2=0$  и определить по ним величину процентного изменения напряжения  $\Delta U\%$ .
9. Для нескольких значений коэффициента загрузки  $\beta$  рассчитать КПД трансформатора при  $\cos\varphi_2=1$  и построить зависимость  $\eta=f(\beta)$ . Определить коэффици-

ент загрузки трансформатора  $\beta_{omt}$ , при котором КПД достигается максимума.

10. Дать оценку результатам испытаний.

### **Предварительные замечания**

При ознакомлении с конструкцией исследуемого трансформатора необходимо определить тип магнитопровода, конструкцию обмоток, число обмоток в каждой фазе, расположение обмоток на магнитопроводе и особенности крепления. Определить способ охлаждения активной части трансформатора. Ознакомиться с маркировкой выводов обмоток. Необходимо записать все паспортные данные трансформатора в таблицу 6.1.

Часть паспортных данных переносят из паспортной таблички трансформатора, другие данные определяются расчетным путем или экспериментально. При отсутствии в паспорте трансформатора номинальных токов первичной и вторичной обмоток, их рассчитывают по формулам:

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{1H}}; \quad I_{2H} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{2H}},$$

где  $S_H$  – номинальная мощность трансформатора, ВА;

$U_{1H}$ ,  $U_{2H}$  – номинальные линейные первичное и вторичное напряжения, В.

### **Выполнение работы**

#### **Измерение сопротивления обмоток трансформатора**

Измерение сопротивлений обмоток трансформатора осуществляется методом амперметра и вольтметра (рис. 4.1) на постоянном токе. Измеряются сопротивления всех фаз первичной и вторичной обмоток.

Таблица 6.1. Паспортные данные исследуемого

## трансформатора

Наименование паспортной величины		Услов. обознач.	Ед. измер.	Значение величины
Номинальная мощность трансформатора		$S_H$	кВА	
Номинальная частота		$f_1$	Гц	50
Число фаз		$m_1$	-	3
Обмотка высокого напряжения ВН:	Номинальное напряжение: звезда Y	$U_{1H}$	В	380
	треугольник Δ	-“-	-“-	220
Обмотка низкого напряжения НН:	Номинальный ток: звезда Y	$I_{1H}$	А	
	треугольник Δ	-“-	-“-	
Обмотка высокого напряжения ВН:	Номинальное напряжение: звезда Y	$U_{2H}$	В	230
	треугольник Δ	-“-	-“-	133
Обмотка низкого напряжения НН:	Номинальный ток: звезда Y	$I_{2H}$	А	
	треугольник Δ	-“-	-“-	
Коэффициент трансформации		$k_T$	-	
Ток холостого хода		$I_X$	А	
Ток холостого хода в процентах от номинального		$I_X\%$	%	
Потери холостого хода		$P_{XH}$	Вт	
Напряжение короткого замыкания		$U_K\%$	%	
Потери короткого замыкания		$P_{KH}$	Вт	

Измерение сопротивления производится не менее трёх раз при различных значениях тока. Чтобы исключить влияние нагрева обмоток на результаты измерений, ток при опыте не должен превышать 20% номинального тока обмотки.

Сопротивления обмоток определяются из соотношения  $r = U/I$  при комнатной температуре  $t_K$ . Потом рассчитывается среднеарифметическое сопротивление  $r_{CP}$ :

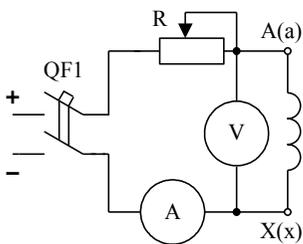


Рис.4.1. Схема для измерения омического сопротивления обмоток трансформатора

$$r_{CP} = r_1 + r_2 + r_3.$$

Полученные сопротивления должны быть приведены к расчётной рабочей температуре. Приведение сопротивления обмоток трансформатора к температуре 75°C производится по следующим формулам:

для обмоток из алюминия

$$r_{75} = r_{CP} \frac{245 + 75}{245 + t_K};$$

для обмоток из меди

$$r_{75} = r_{CP} \frac{235 + 75}{235 + t_K}.$$

Данные измерений записываются в таблицу 6.2.

Таблица 6.2. Данные измерений для расчета сопротивлений обмоток

Обмотка	№ п. п.	Фаза 1			Фаза 2			Фаза 3			Ср. значение	
		U	I	$r_1$	U	I	$r_2$	U	I	$r_3$	$r_{CP}$	$r_{75}^0$
		В	А	Ом	В	А	Ом	В	А	Ом	Ом	Ом
Первичная обмотка	1										$r_{1CP}$	$r_{175}$
	2											
	3											
Вторичная обмотка	1										$r_{2CP}$	$r_{275}$
	2											
	3											

## Опыт холостого хода

Характеристики холостого хода трансформатора представляют зависимость тока  $I_X$ , потребляемой активной мощности  $P_X$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi_X$  от напряжения первичной обмотки  $U_{1X}$  при разомкнутой вторичной обмотке:

$$I_X, P_X, \cos \varphi_X = f(U_{1X}) \text{ при } f = f_H = \text{const} \text{ и } I_2 = 0.$$

Опыт холостого хода можно проводить как со стороны обмотки высшего напряжения ВН, так и со стороны обмотки низшего напряжения НН. Этот опыт входит в число обязательных прямо-сдаточных испытаний, которым подвергается каждый трансформатор на заводе-изготовителе. Опыт холостого хода проводится по схеме рис.4.2.

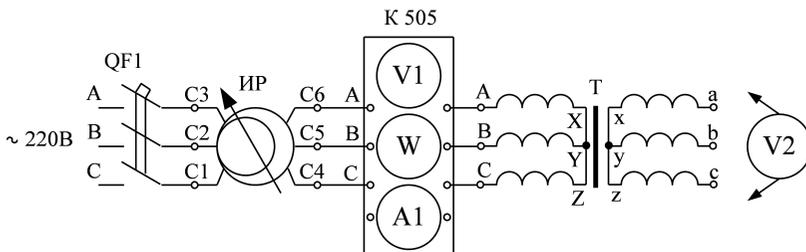


Рис.4.2. Схема опыта холостого хода трансформатора

В качестве регулятора напряжения при испытании трансформатора целесообразно использовать индукционный регулятор (ИР). Ток холостого хода измеряется в каждой фазе обмотки трансформатора, так как вследствие несимметрии магнитопровода трёхфазного стержневого трансформатора, намагничивающие токи крайних стержней больше, чем намагничивающий ток среднего стержня.

При выборе измерительных приборов следует иметь в виду, что для силовых трансформаторов общего назначения  $I_X \approx (0,02 \dots 0,1) I_H$ . Верхний предел соответствует трансформаторам малой мощности, нижний – трансформаторам большой мощности.

Для повышения точности измерения мощности холостого хода трансформаторов малой мощности обмотки напряжения ваттметров подключаются непосредственно к зажимам испытуемого трансформатора. Для измерения напряжения, тока и мощности в каждой фазе трансформатора используется измерительный комплект типа К505.

Опыт холостого хода проводят в следующей последовательности.

Перед включением схемы индукционный регулятор устанавливается в положение, обеспечивающее минимальное напряжение на зажимах трансформатора.

После включения схемы проверяется симметрия первичных и вторичных напряжений трансформатора. Напряжение считается симметричным, если разница между линейными или фазными напряжениями данной обмотки во всех фазах не превышает 1% от их номинального значения. Напряжение вторичной обмотки трансформатора измеряется вольтметром V1.

Регулирование напряжения при выполнении опыта производится с помощью индукционного регулятора в диапазоне от  $1,2U_H$  до  $0,6U_H$  с примерно равным шагом изменения напряжения. Результаты измерений и вычисления (6-7 строк) заносятся в табл.6.3. При проведении опыта холостого хода необходимо снять точку, соответствующую номинальному напряжению первичной обмотки.

Таблица 6.3. Данные опыта холостого хода

№ п п	Опытные данные									Расчётные данные			
	U <sub>A</sub> В	U <sub>B</sub> В	U <sub>C</sub> В	I <sub>A</sub> А	I <sub>B</sub> А	I <sub>C</sub> А	P <sub>A</sub> Вт	P <sub>B</sub> Вт	P <sub>C</sub> Вт	U <sub>1X</sub> В	I <sub>X</sub> А	P <sub>X</sub> Вт	cosφ <sub>X</sub>

Необходимые расчётные величины получают из соотношений:

$$U_{IX} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}; \quad I_X = \frac{I_A + I_B + I_C}{3};$$

$$P_X = P_A + P_B + P_C; \quad \cos\varphi_X = \frac{P_X}{3U_{IX}I_X}.$$

По расчётным данным табл.6.3 строятся характеристики холостого хода  $I_X$ ,  $P_X$ ,  $\cos\varphi_X = f(U_{IX})$ . Все три характеристики целесообразно построить на одной координатной плоскости.

Ток холостого хода при номинальном напряжении  $I_{XH}$  является паспортной величиной трансформатора, Обычно он выражается в процентах от номинального тока трансформатора ( $I_{XH}\%$ ). Таким образом,

$$I_{XH}\% = \frac{I_{XH}}{I_H} 100.$$

Вследствие малого изменения магнитного потока трансформатора при переходе от холостого хода к работе при нагрузке, потери  $P_{XH}$  и ток  $I_{XH}$ , измеренные на холостом ходу при  $U_H$ , обычно принимаются равными магнитным потерям и намагничивающему току  $I_0$  при нагрузке.

По опытным данным холостого хода для номинального напряжения определяются параметры холостого хода трансформатора:

$$Z_X = |Z_l + Z_m| = \frac{U_{1H}}{I_{XH}}, \text{ полное сопротивление холостого}$$

хода;

хода;

$$r_X = r_l + r_m = \frac{P_{XH}}{3I_{XH}^2}, \text{ активное сопротивление холостого}$$

хода;

$$x_X = x_l + x_m = \sqrt{Z_x^2 - r_x^2}, \text{ индуктивное сопротивление холостого}$$

хода.

### Определение коэффициента трансформации

Коэффициентом трансформации трансформатора  $k$  называют отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения. В паспорте трансформатора всегда указывается коэффициент трансформации как отношение напряжений обмотки ВН к обмотке НН, т.е.  $k \geq 1$  :

$$k = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}}.$$

Коэффициент трансформации однофазных трансформаторов определяется отношением напряжений  $U_{ВН}/U_{НН}$ , которое равно отношению чисел витков этих обмоток:

$$k = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} = \frac{W_{ВН}}{W_{НН}}.$$

При выполнении расчетов электрических цепей с трансформаторами определяют коэффициент трансформации как отношение напряжения первичной обмотки к напряжению вторичной и для трехфазных трансформаторов используют фазные значения напряжений. При этом коэффициент трансформации может быть больше или меньше единицы в зависимости от того, понижающий это трансформатор или повышающий

$$k_{\phi} = U_{1\phi}/U_{2\phi},$$

где  $U_{1\phi}$ -фазное напряжение первичной обмотки;

$U_{2\phi}$ -фазное напряжение вторичной обмотки.

Коэффициент трансформации при любой трактовке определяется по данным опыта холостого хода измерением напряжения на обмотках трансформатора.

$$k_A = \frac{U_{AX}}{U_{ax}}; k_B = \frac{U_{BY}}{U_{by}}; k_C = \frac{U_{CZ}}{U_{cz}}.$$

Затем находят среднее значение коэффициента трансформации:

$$k = \frac{k_A + k_B + k_C}{3}.$$

## Опыт короткого замыкания

Характеристики короткого замыкания представляют зависимость тока  $I_K$ , потребляемой активной мощности  $P_K$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi_K$  от подводимого напряжения  $U_K$  при замкнутой на саму себя (накоротко) вторичной обмотке трансформатора:

$$I_K, P_K, \cos\varphi_K = f(U_K) \text{ при } U_2 = 0 \text{ и } f = f_H = \text{const.}$$

Опыт короткого замыкания проводят по схеме рис.4.3. при значительно пониженном напряжении, порядка (4...12) % от  $U_H$ , чтобы ток  $I_K \leq I_H$ . Поэтому после окончания опыта холостого хода на выходе регулятора ИР устанавливается минимальное напряжение. Опыт короткого замыкания входит в число обязательных приемо-сдаточных испытаний трансформатора. Он может проводиться при подключении к источнику любой из двух обмоток трансформатора. Обычно при испытании высоковольт-

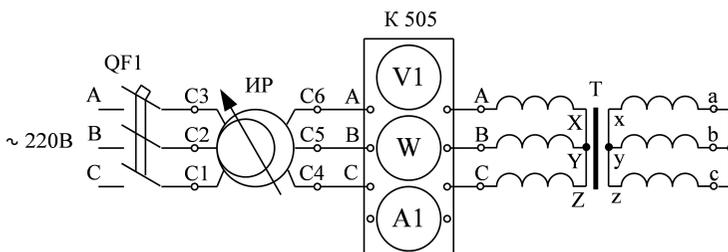


Рис.4.3. Схема опыта короткого замыкания трансформатора

ного трансформатора по соображениям электробезопасности закорачивается обмотка ВН; при испытании низковольтного трансформатора обмотку для закорачивания выбирают, руководствуясь удобством регулирования напряжения в требуемом диапазоне и подбором измерительных приборов.

Опыт короткого замыкания проводится следующим образом. Чтобы избежать значительного нагревания обмоток трансформатора, эксперимент начинают с тока,

равного  $(1,2\dots 1,3)I_H$ . Затем ток уменьшают до номинального  $I_K=I_H$ , и далее, при понижении напряжения, измеряют значения напряжения, тока и активной мощности. С целью уменьшения влияния нагрева обмоток на результаты измерений, опыт нужно проводить быстро. Данные заносятся в табл. 6.4.

Таблица 6.4. Данные опыта короткого замыкания

№ п.п.	Опытные данные									Расчётные данные			
	$U_A$ В	$U_B$ В	$U_C$ В	$I_A$ А	$I_B$ А	$I_C$ А	$P_A$ Вт	$P_B$ Вт	$P_C$ Вт	$U_K$	$I_K$ А	$P_K$ Вт	$\cos\varphi_K$

Необходимые расчётные величины получают из соотношений:

$$U_K = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}; \quad I_K = \frac{I_A + I_B + I_C}{3};$$

$$P_K = P_A + P_B + P_C; \quad \cos\varphi_K = \frac{P_K}{3U_K I_K}.$$

Мощность, соответствующая номинальному току обмоток при температуре  $75^\circ$ , принято называть номинальными потерями короткого замыкания ( $P_{KH}$ ):

$$P_{KH} = 3 r_{K75} I_H^2.$$

По опытным данным для номинального тока ( $I_K = I_H$ ) определяют параметры схемы замещения трансформатора: полное сопротивление короткого замыкания  $Z_K$  и его составляющие – активную  $r_K = r_1 + r_2'$  и индуктивную  $x_K = x_1 + x_2'$ :

$$Z_K = |Z_1 + Z_2'| = \frac{U_{KH}}{I_H}; \quad r_K = \frac{P_{KH}}{3I_H^2}, \quad x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}.$$

Определенное из опыта активное сопротивление  $r_K$  приводится к температуре  $75^\circ\text{C}$  ( $x_K$  от температуры не зависит):

$$Z_{K75} = \sqrt{r_{K75}^2 + x_K^2}.$$

Из опыта короткого замыкания определяется значение напряжения короткого замыкания  $U_K$ , его активная  $U_{KA}$  и реактивная  $U_{KP}$  составляющие, соответствующие номинальному току при температуре обмоток, равной температуре окружающей среды. Эти значения следует привести к номинальной рабочей температуре обмоток  $75^\circ \text{C}$ .

Обычно значение  $U_K$  выражают в процентах от номинального напряжения той обмотки ( $U_K\%$ ), со стороны которой в опыте короткого замыкания подводится напряжение:

$$U_K\% = \frac{U_{KH\Phi}}{U_{H\Phi}} 100 = \frac{I_H Z_{K,75}}{U_{H\Phi}} 100.$$

Активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания также выражают в процентах от номинального напряжения:

$$U_{KA75}\% = \frac{I_H r_{K75}}{U_{H\Phi}} 100 = U_K \cos\varphi_K,$$

$$U_{KP}\% = \frac{I_H x_K}{U_{H\Phi}} 100 = U_K \sin\varphi_K.$$

### **Определение параметров Т-образной схемы замещения трансформатора**

Параметры схемы замещения определяются по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

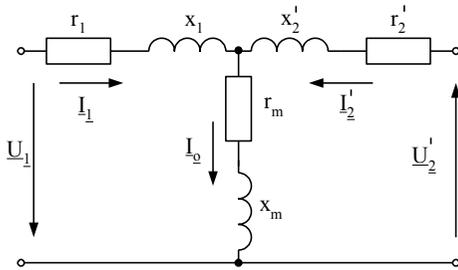


Рис.4.4. Схема замещения трансформатора

Активное сопротивление обмоток трансформатора может быть получено умножением омического сопротивления на коэффициент  $k_r$ , учитывающий отличие

сопротивлений проводника постоянному и переменному току. В большинстве случаев для обмоток трансформаторов значение коэффициента  $k_r$  лежит в пределах 1,01-1,05. Примем  $k_r = 1,03$ . Тогда активное сопротивление первичной обмотки  $r_1 = 1,03 \times r_{1(75^\circ)}$ , а вторичной обмотки  $r_2 = 1,03 \times r_{2(75^\circ)}$ . Активное сопротивление вторичной обмотки необходимо привести к виткам первичной обмотки  $r_2' = k_\phi^2 r_2$ , где  $k_\phi$  – фазный коэффициент трансформации. Индуктивные сопротивления обмоток, обусловленные потоками рассеяния ( $x_1$  и  $x_2'$ ), можно приближенно принять одинаковыми и равными половине индуктивного сопротивления короткого замыкания:  $x_1 = x_2' = 0,5x_K$ .

Параметры ветви намагничивания  $x_m$  и  $r_m$  определяются по выражениям:

$$x_m = x_x - x_1; \quad r_m = r_x - r_1.$$

На схеме замещения необходимо указать значения сопротивлений, направление токов и напряжений (рис.4.4.).

### Внешняя характеристика трансформатора

Внешняя характеристика трансформатора представляет зависимость вторичного напряжения  $U_2$  от вторичного тока  $I_2$ :

$$U_2 = f(I_2) \text{ при } U_1 = \text{const и } \cos\phi_2 = \text{const.}$$

Внешнюю характеристику получают опытным путём, включая вторичную обмотку на регулируемую нагрузку (рис.4.5).

Порядок снятия внешней характеристики следующий.

Трансформатор подключается к сети без нагрузки (аппараты Q1 и Q2 разомкнуты, имеет место холостой ход трансформатора) и измеряется напряжение  $U_{2х}$ . Далее, включив Q1 или Q2, загружают трансформатор до номинального тока, поддерживая постоянным значение  $\cos\varphi_2$ . Внешнюю характеристику снимают обычно для различных значений коэффициента мощности. Внешняя характери-

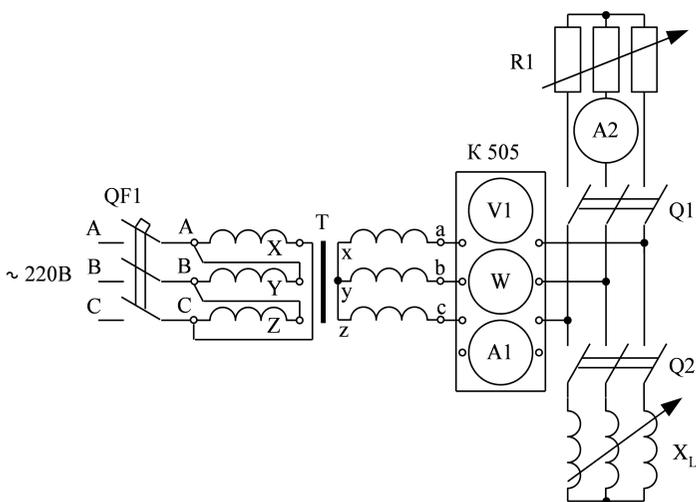


Рис.4.5. Схема для снятия внешних характеристик трансформатора

стика для  $\cos\varphi_2 = 1$  снимается при замкнутом Q1 и изменении величины нагрузочного сопротивления R1, а для  $\cos\varphi_2 = 0$  (инд.) характеристика снимается при включённом Q2 и разомкнутом Q1. Показания измерительных приборов записывают в таблицу 6.5.

Таблица 6.5. Опытные данные внешних характеристик

№	$U_2$	$I_2$	№	$U_2$	$I_2$
---	-------	-------	---	-------	-------

п.п.	В	А	п.п.	В	А
	$\cos\varphi_2=1$			$\cos\varphi_2=0(\text{инд.})$	
1	$U_{2x}$	0	1	$U_{2x}$	0
6			6		

Внешние характеристики позволяют определить изменение вторичного напряжения, представляющее алгебраическую разность между вторичным напряжением при холостом ходе и напряжением на зажимах вторичной обмотки при номинальном вторичном токе, номинальной частоте, заданном значении коэффициента мощности и номинальном напряжении на зажимах первичной обмотки. Изменение напряжения  $\Delta U$  выражается в процентах номинального вторичного напряжения:

$$\Delta U\% = \frac{U_{2H} - U_2}{U_{2H}} 100.$$

При номинальной нагрузке трансформатора величина  $\Delta U\%$  составляет от 2 до 5 %. С достаточной точностью изменение напряжения может быть определено расчетом по формуле:

$$\Delta U\% = \beta(U_{KA} \cos\varphi_2 + U_{KP} \sin\varphi_2),$$

где  $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$  – коэффициент загрузки трансформатора;

$U_{KA}$  и  $U_{KP}$  – соответственно активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, %.

Как видно из формулы, зависимость  $\Delta U=f(\beta)$  прямолинейна.

### **Коэффициент полезного действия трансформатора**

Коэффициент полезного действия трансформатора (КПД) представляет собой отношение активной мощности

$P_2$ , отдаваемой трансформатором нагрузке, к активной мощности  $P_1$ , потребляемой трансформатором из сети, т. е.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{или} \quad \eta\% = \frac{P_2}{P_1} 100.$$

Высокие значения КПД трансформаторов (максимальное значение КПД в трансформаторах большой мощности достигает 0,98...0,99) не позволяют определять его с достаточной степенью точности способом непосредственного измерения мощностей  $P_1$  и  $P_2$ . Поэтому ГОСТ рекомендует вычислять КПД косвенным методом по паспортным данным полной мощности, составляющих потерь мощности и величине коэффициента загрузки трансформатора по следующей формуле:

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = 1 - \frac{P_{XH} + \beta^2 P_{KH}}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_{XH} + \beta^2 P_{KH}},$$

где  $\Sigma P$  – суммарные потери в трансформаторе;

$\beta$  – коэффициент загрузки трансформатора;

$S_H$  – номинальная мощность трансформатора, ВА или кВА;

$\beta S_H \cos \varphi_2$  – отдаваемая трансформатором мощность  $P_2$ , Вт или кВт;

$P_{XH}$  – потери в стали трансформатора (Вт или кВт), равные мощности потерь холостого хода при номинальном напряжении;

$P_{KH}$  – электрические потери в обмотках трансформатора при номинальном токе и температуре 75 °С.

Максимум КПД трансформатора достигается при таком значении коэффициента загрузки  $\beta_{опт}$ , при котором потери в обмотках становятся равными потерям в стали:

$$\beta^2_{опт} P_{KH} = P_{XH}.$$

В трансформаторах максимум КПД выражен сравнительно слабо, т. е. высокое значение КПД сохраняет в широком диапазоне изменения нагрузки ( $0,4 < \beta < 1,5$ ).

## Содержание отчёта

1. Паспортные данные исследуемого трансформатора (по таблице 6.1) и технические характеристики используемых измерительных приборов.

2. Схемы опытов.

3. Таблицы результатов измерений.

4. Характеристики холостого хода трансформатора.

Расчёт параметров холостого хода.

5. Характеристики короткого замыкания. Расчёт параметров короткого замыкания.

6. Схема замещения трансформатора с указанием расчётных значений её параметров.

7. Внешние характеристики трансформатора при  $\cos\varphi_2 = 1$  и  $\cos\varphi_2 = 0$ , построенные на одной координатной плоскости. Численное значение изменения напряжения трансформатора.

8. На основании данных опытов холостого хода и короткого замыкания рассчитать КПД трансформатора при  $\cos\varphi_2 = 1$  и построить зависимость  $\eta = f(\beta)$ . Определить коэффициент загрузки трансформатора  $\beta_{opt}$ , при котором достигается максимум КПД.

9. Дать оценку результатам испытаний.

## Контрольные вопросы

1. Что означают термины «холостой ход» и «короткое замыкание» трансформатора?

2. Как проводится опыт холостого хода трансформатора? Поясните назначение элементов схемы для проведения опыта холостого хода.

3. Как проводится опыт короткого замыкания трансформатора? Поясните назначение элементов схемы проведения опыта.

4. Как определяются параметра схемы замещения по данным опыта холостого хода и короткого замыкания?

5. Что такое коэффициент трансформации? Из какого опыта он определяется?

6. Что такое напряжение короткого замыкания трансформатора и как оно определяется?

7. Почему с ростом нагрузки трансформатора напряжение  $U_2$  уменьшается?

## **РАБОТА № 7. Параллельная работа трехфазных трансформаторов**

**Цель работы:** освоить методику опытной проверки правильности обозначения зажимов обмоток трансформатора, определения групп соединения обмоток и исследовать распределение токов при параллельном включении трансформаторов.

### **Содержание работы:**

1. Ознакомиться с паспортными данными трансформаторов и обозначением зажимов обмоток.
2. Проверить правильность обозначения зажимов обмоток одного из трансформаторов.
3. Определить опытным путем группы соединений трансформатора для схем соединений обмоток  $Y/Y$  и  $\Delta/Y$ .
4. Произвести опытную проверку распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами при одинаковых и разных коэффициентах трансформации; построить зависимость вторичных токов трансформаторов от тока нагрузки.
5. Дать оценку полученным результатам.

### **Предварительные замечания**

Для нормальной работы трансформаторов при параллельном включении необходимо выполнение следующих условий:

1. номинальные первичные и вторичные напряжения обоих трансформаторов должны быть равны, что практически равнозначно требованию равенства их коэффициентов трансформации  $k_1=k_2$ ;
2. трансформаторы должны иметь одинаковую группу соединения обмоток;
3. напряжения короткого замыкания трансформаторов должны быть одинаковыми  $U_{K1}=U_{K2}$ .

При выполнении первого условия вторичные напряжения трансформаторов будут иметь одинаковую величину; при выполнении второго условия будут совпадать начальные фазы вторичного напряжения. В этом случае напряжение между одноименными зажимами двух трансформаторов отсутствует ( $\Delta E = U_{21} - U_{22} = 0$ ), поэтому при подключении вторичных обмоток трансформаторов на параллельную работу в этих обмотках не возникает уравнивающий ток. В противном случае, уже при холостом ходе (отключенной нагрузке) в цепи вторичных обмоток возникает уравнивающий ток

$$\dot{I}_y = \frac{\Delta E}{Z_{K1} + Z_{K2}},$$

который циркулирует в замкнутом контуре, образованном вторичными обмотками параллельно включенных трансформаторов. Уравнивающий ток трансформируется также в первичную обмотку обоих трансформаторов, вызывая дополнительные потери и нагрев.

Допустимая разница в коэффициентах трансформации составляет не более  $\pm 0,5\%$  от их среднего значения.

Параллельная работа трансформаторов с разными группами недопустима, поскольку уравнивающий ток при этом в несколько раз превосходит номинальный и является аварийным.

Условие равенства напряжений короткого замыкания необходимо соблюдать для распределения нагрузки между трансформаторами пропорционально их номинальным

мощностям. При разных напряжениях короткого замыкания при параллельной работе больше нагружаются трансформаторы, имеющие меньшую величину напряжения короткого замыкания. ГОСТ рекомендует включать на параллельную работу трансформаторы при отношении их номинальных мощностей не более чем 3:1 и допускает отклонение напряжения короткого замыкания любого трансформатора не более чем на  $\pm 10\%$  от среднеарифметического значения  $U_K$  всех трансформаторов.

## Выполнение работы

### Проверка маркировки обмоток

Перед первоначальным включением трансформатора на параллельную работу необходимо проверить правильность маркировки его обмоток и группу трансформатора. Следует отметить, что понятие начала и конца обмотки условны, но при практическом осуществлении обмоток и их взаимных соединениях введение этих понятий совершенно необходимо. Проверка маркировки обмоток производится опытным путем (рис.4.6).

В трехфазных двухобмоточных трансформаторах начала и концы обмоток высшего и низшего напряжения обозначаются соответственно буквами  $A, B, C$ ; и  $X, Y, Z$ ;  $a, b, c$ , и  $x, y, z$ . Зажимы нейтрали при соединении в звезду обозначают буквой  $N$ . В трехстержневых трансформаторах с плоским магнитопроводом магнитная цепь не вполне симметрична, и фазные обмотки фазы  $B$  ( $b$ ) всегда располагают на среднем стержне.

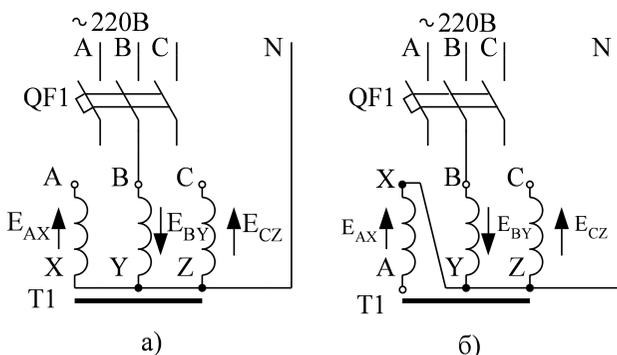


Рис.4.6. Схема проверки обозначений зажимов обмотки высшего напряжения трансформатора

Проверять маркировку обмоток трансформаторов можно при пониженном напряжении, что лучше обеспечивает безопасность персонала, особенно при испытаниях трансформаторов высокого напряжения.

Сначала проверяют маркировку обмотки высшего напряжения (ВН). Для этого трехфазную обмотку ВН соединяют звездой и фазную обмотку  $BY$  подключают к источнику однофазного переменного напряжения (рис.4.6.а). Измеряют напряжения  $U_{BY}$ ,  $U_{AX}$ ,  $U_{CZ}$ ,  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  (индекс указывает клеммы, на которых измеряется напряжение) и их значения заносят в таблицу 7.1.

Таблица 7.1. Проверка обозначения зажимов обмоток трансформатора

Обмотка ВН					Обмотка НН				
$U_{BY}$	$U_{AX}$	$U_{CZ}$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{AX}$	$U_{ax}$	$U_{Aa}$	$U_{Bb}$	$U_{Cc}$
В	В	В	В	В	В	В	В	В	В

Поскольку фазная обмотка  $BY$  располагается на среднем стержне магнитопровода, то образованный ею магнитный поток замкнется по крайним стержням сердечника, разделившись поровну. В крайних стержнях магнитный поток равен половине потока среднего стержня и

направлен противоположно, следовательно, ЭДС, индуцированная в фазных обмотках  $AX$  и  $CZ$ , численно равна половине ЭДС фазы среднего стержня или половине напряжения  $U_{BY}$ :  $U_{BY} \approx E_{BY}$ ,  $E_{AX} = E_{CZ} = 0,5U_{BY}$ .

При правильной маркировке обмоток (рис.4.6.а) напряжения между зажимами  $A$  и  $B$  или  $B$  и  $C$ , будут определяться суммой ЭДС, индуцированных в обмотках средней ( $E_{BY}$ ) и соответствующей крайней ( $E_{AX}$  или  $E_{CZ}$ ) фаз и будут равны  $1,5U_{BY}$ .

$$U_{AB} = U_{BY} + E_{AX} = 1,5U_{BY}, \quad U_{BC} = U_{BY} + E_{CZ} = 1,5U_{BY}.$$

Если маркировка обмоток неправильна, напряжения на зажимах  $A$  и  $B$  или  $B$  и  $C$ , будут определяться разностью тех же ЭДС. Например, для рисунка 4.6.б,  $U_{AB} = U_{BY} - E_{AX} = 0,5U_{BY}$ . В случае, если  $U_{AB} = 0,5U_{BY}$ , обозначение выводов  $A$  и  $X$  фазной обмотки  $AX$  необходимо поменять местами после чего выполнить правильное соединение обмотки звездой.

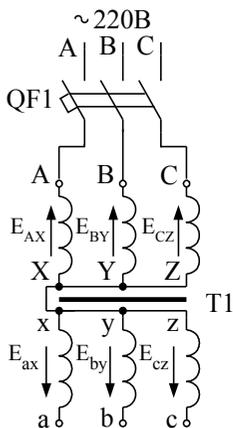


Рис.4.7. Схема проверки обозначений зажимов обмотки низшего напряжения трансформатора

определяться разностью ЭДС, индуцируемых в обмотках

Проверку обозначения зажимов обмотки низшего напряжения (НН) производят по схеме (рис.4.7). Нейтрали обмоток ВН и НН трансформатора соединяют. Обмотку ВН подключают к трехфазному источнику напряжения.

Предположим, что ЭДС, наводимая в обмотках трансформатора при правильном обозначении зажимов обмотки НН, направлена от конца к началу обмотки. Тогда напряжение между зажимами  $A$  и  $a$  будет

$A-X$  и  $a-x$ :  $U_{Aa} = E_{AX} - E_{ax}$ . Когда обозначения начала и конца обмотки НН в фазе  $a-x$  сделаны неверно, напряжение будет определяться суммой ЭДС, индуцируемых в обмотках  $A-X$  и  $a-x$ . Данные эксперимента заносятся в таблицу 7.1. (правая часть таблицы).

Если напряжение  $U_{Aa}$  не равно ни сумме ЭДС, ни разности, это означает, что обмотки  $A-X$  и  $a-x$  размещены на разных стержнях и нужно исправлять маркировку вторичной обмотки.

Проверка маркировки обмотки в других фазах осуществляется аналогично.

### **Определение группы соединений трансформатора**

Группа соединения трансформатора определяется разностью начальных фаз его одноимённых линейных ЭДС обмоток ВН и НН. Группа трансформатора определяется схемой соединения его обмоток.

Опытное определение группы соединения трансформатора производится при подключении трансформатора к трехфазному источнику при холостом ходе с замкнутыми зажимами  $A$  и  $a$ , как показано на рис.4.8. Все измерения производятся вольтметром  $V$ .

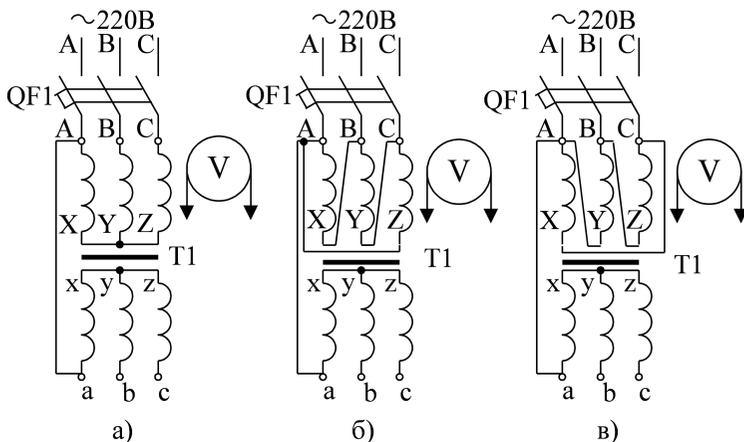


Рис. 4.8. Схемы опытного определения групп соединения обмоток трансформатора Y/Y и Δ/Y

Сущность метода заключается в том, что величина напряжений между зажимами первичной и вторичной обмоток трансформаторов находится в определённой зависимости от его группы. При эквипотенциальных зажимах  $A$  и  $a$ , напряжения между зажимами  $b$  и  $B$ ,  $b$  и  $C$ ,  $c$  и  $B$ ,  $c$  и  $C$  при различных группах соединений определяются формулами, приведенными в таблице 7.2.

Опытным путём группа соединений определяется следующим образом.

На зажимы первичной обмотки трансформатора подаётся трехфазное напряжение и определяется коэффициент трансформации  $k$  (отношение линейных напряжений)

Таблица 7.2. Расчетные формулы для определения групп трансформаторов

Группа	ЭДС Угловое смещение	Возможные соединения обмоток	$U_{bB}=U_{cC}$	$U_{bC}$	$U_{cB}$

0	0°	Y/Y; Δ/Δ; Δ/Z	$U_{ab}(k-1)$ <b>м</b>	$U_{ab}\sqrt{1-k+k}$ <b>м</b>	$U_{ab}\sqrt{1-k+k}$ <b>м</b>
1	30°	Y/Δ; Δ/Y; Y/Z	$U_{ab}\sqrt{1-\sqrt{3}k}$ <b>м</b>	$U_{ab}\sqrt{1-\sqrt{3}k}$ <b>м</b>	$U_{ab}\sqrt{1+k^2}$ <b>р</b>
2	60°	Y/Y; Δ/Δ; Δ/Z	$U_{ab}\sqrt{1-k+k}$ <b>м</b>	$U_{ab}(k-1)$ <b>м</b>	$U_{ab}\sqrt{1+k+k}$ <b>б</b>
3	90°	Y/Δ; Δ/Y; Y/Z	$U_{ab}\sqrt{1+k^2}$ <b>р</b>	$U_{ab}\sqrt{1-\sqrt{3}k}$ <b>м</b>	$U_{ab}\sqrt{1+\sqrt{3}k}$ <b>б</b>
4	120°	Y/Y; Δ/Δ; Δ/Z	$U_{ab}\sqrt{1+k+k}$ <b>б</b>	$U_{ab}\sqrt{1-k+k}$ <b>м</b>	$U_{ab}(k+1)$ <b>б</b>
5	150°	Y/Δ; Δ/Y; Y/Z	$U_{ab}\sqrt{1+\sqrt{3}k}$ <b>б</b>	$U_{ab}\sqrt{1+k^2}$ <b>р</b>	$U_{ab}\sqrt{1+\sqrt{3}k}$ <b>б</b>
6	180°	Y/Y; Δ/Δ; Δ/Z	$U_{ab}(k+1)$ <b>б</b>	$U_{ab}\sqrt{1+k+k}$ <b>б</b>	$U_{ab}\sqrt{1+k+k}$ <b>б</b>
7	210°	Y/Δ; Δ/Y; Y/Z	$U_{ab}\sqrt{1+\sqrt{3}k}$ <b>б</b>	$U_{ab}\sqrt{1+\sqrt{3}k}$ <b>б</b>	$U_{ab}\sqrt{1+k^2}$ <b>р</b>
8	240°	Y/Y; Δ/Δ; Δ/Z	$U_{ab}\sqrt{1+k+k}$ <b>б</b>	$U_{ab}(k+1)$ <b>б</b>	$U_{ab}\sqrt{1-k+k}$ <b>м</b>
9	270°	Y/Δ; Δ/Y; Y/Z	$U_{ab}\sqrt{1+k^2}$ <b>р</b>	$U_{ab}\sqrt{1+\sqrt{3}k}$ <b>б</b>	$U_{ab}\sqrt{1-\sqrt{3}k}$ <b>м</b>
10	300°	Y/Y; Δ/Δ; Δ/Z	$U_{ab}\sqrt{1-k+k}$ <b>м</b>	$U_{ab}\sqrt{1+k+k}$ <b>б</b>	$U_{ab}(k-1)$ <b>м</b>
11	330°	Y/Δ; Δ/Y; Y/Z	$U_{ab}\sqrt{1-\sqrt{3}k}$ <b>м</b>	$U_{ab}\sqrt{1+k^2}$ <b>р</b>	$U_{ab}\sqrt{1-\sqrt{3}k}$ <b>м</b>

$$k = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}$$

Затем измеряются напряжения  $U_{bb} = U_{cc}$ ,  $U_{bc}$  и  $U_{cb}$  между соответствующими зажимами первичной и вторичной обмоток. Данные измерений заносят в таблицу 7.3.

Таблица 7.3. Определение группы трансформатора

№	Измерения	Расчет	Схема
---	-----------	--------	-------

п./П	$U_{AB}$ В	$U_{ab}$ В	$U_{bB}$ В	$U_{bC}$ В	$U_{cB}$ В	k	$U_X$ В	соединения и группа
1								Y/Y-
2								$\Delta$ /Y-
3								$\Delta$ /Y-

Измеренные напряжения в зависимости от группы соединений могут быть больше (**б**), равны (**р**) или меньше (**м**) расчетного напряжения  $U_X$ , определяемого по формуле:

$$U_X = U_{ab} \sqrt{1 + k^2} .$$

В таблице 7.2, помимо формул для вычисления напряжений  $U_{bB}$ ,  $U_{bC}$  и  $U_{cB}$ , имеющих вспомогательное значение, проставлены значки (**б**), (**р**), (**м**), указывающие на соотношения между измеренными напряжениями и напряжением  $U_X$ . Для таких значков в таблице 7.3. также предусмотрено место. Используя эти значки, можно определить группу соединения обмоток не прибегая к вычислениям, а затем, при желании, измеренные напряжения проверить на их соответствие расчетным формулам таблицы 7.2. Совпадение расчетных и измеренных напряжений дополнительно свидетельствуют о соответствии трансформатора данной группе.

При больших коэффициентах трансформации ( $k > 20$ ) возможны ошибки при определении группы соединений. В этом случае рекомендуется к обмотке высшего напряжения присоединить понижающий трансформатор с группой соединений «0», и при измерениях вместо зажимов *A*, *B* и *C* использовать вторичные зажимы *a*, *b* и *c* понижающего трансформатора.

## Параллельная работа трансформаторов

Исследование параллельной работы трансформаторов с нулевой группой соединений обмоток и равными коэффициентами трансформации производится по схеме рис.4.9. В этом случае общий узел звезды трансформатора Т2 соединяется на зажимах  $X, Y, Z$ . Нагрузка трансформаторов осуществляется с помощью регулируемого индуктивного сопротивления  $X_L$  (индуктивная нагрузка).

Включением автоматов QF1 и QF2 на оба трансформатора подается напряжение в режиме холостого хода и определяются коэффициенты трансформации  $k_1$  и  $k_2$ .

*Включение трансформаторов на параллельную работу рубильником Q1 допустимо только после того, как будет проверено отсутствие напряжения на одноименных зажимах рубильника Q1.*

Для этого вольтметром  $V$  измеряют напряжения между выводами  $a_1-a_2, b_1-b_2, c_1-c_2$ . Эти напряжения должны быть равны нулю. Если показания близки к двойному вторичному напряжению трансформатора, то следует поменять чередование фаз одному из трансформаторов, после чего заново выполнить аналогичную проверку.

После замыкания рубильника Q1 включают рубильник Q2 и увеличивают ток нагрузки от холостого хода до номинального тока одного из трансформаторов. Показания приборов записываются в таблицу 7.4.

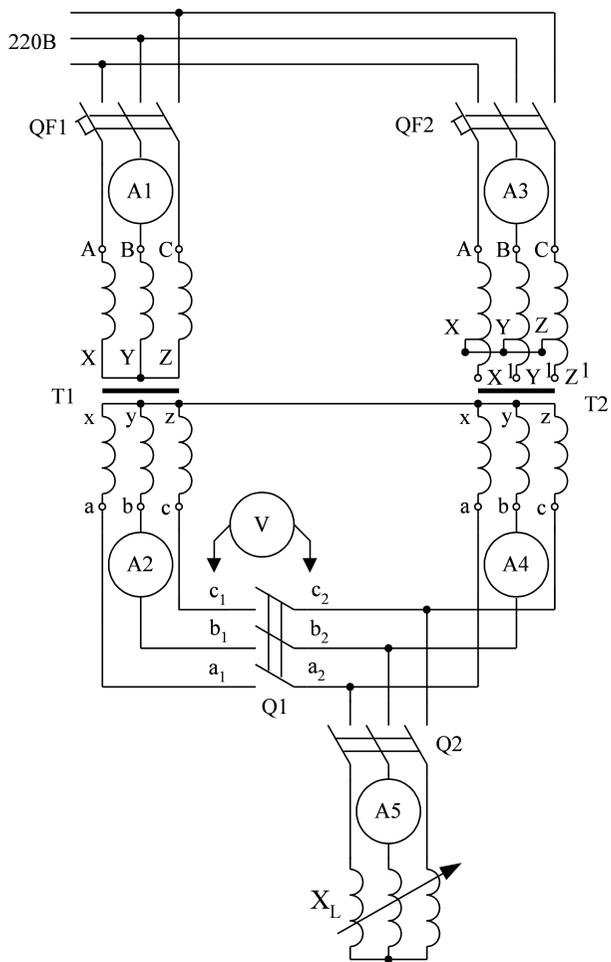


Рис.4.9. Схема для исследования параллельной работы трансформаторов

Для исследования параллельной работы трансформаторов с разными коэффициентами трансформации, общий узел звезды на первичной обмотке трансформатора T2 переносят на клеммы  $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ . Включением автоматов QF1 и QF2 на трансформаторы подают напряжение. Определяют коэффициент трансформации T2. Затем включают

рубильник Q1 и записывают значение уравнительного тока в первичных и вторичных обмотках, после чего включают нагрузку рубильником Q2 и доводят её до такой величины, при которой по одному из трансформаторов будет протекать номинальный ток. Данные измерений записывают в табл.7.4.б. По данным табл.7.4 строятся графики зависимости  $I_2=f(I_3)$  и  $I_4=f(I_5)$  для  $k_1 = k_2$  и  $k_1 \neq k_2$ . Все графики целесообразно разместить на одной координатной плоскости.

Таблица 7.4. Распределение нагрузки трансформаторов

№ п. п.	Трансформатор 1		Трансформатор 2		Нагрузка
	$I_1$ А	$I_2$ А	$I_3$ А	$I_4$ А	$I_5$ А
	а) $k_1=k_2=$				
1					0
...					
5					
	б) $k_1=$		$k_1 \neq k_2$		$k_2 =$
1					0
...					
5					

### Содержание отчёта

1. Паспортные данные исследуемых трансформаторов и технические характеристики используемых приборов.
2. Схемы опытов.
3. Таблицы результатов измерений.
4. Построить на одном графике зависимости вторичных токов трансформаторов от тока нагрузки при параллельной работе для  $k_1=k_2$  и  $k_1 \neq k_2$ .

5. Дать оценку полученных результатов испытаний трансформаторов.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие условия должны быть соблюдены при включении трансформаторов на параллельную работу?

2. Что понимается под группой соединения обмоток трансформатора?

3. Каким образом можно изменить группу соединения обмоток трансформатора?

4. Почему при маркировке обмотки высшего напряжения трехфазного трехстержневого трансформатора однофазное напряжение подают на фазу «В»?

5. Как проверяется маркировка обмотки низкого напряжения?

6. Как определяют группу соединения обмоток трансформатора опытным путём при испытании отдельного трансформатора и как проверяют одинаковость групп перед включением двух трансформаторов на параллельную работу?

## **РАБОТА № 8. Исследование несимметричной нагрузки трехфазного трансформатора**

**Цель работы:** исследование влияния несимметричной нагрузки на симметрию напряжений при различных схемах соединения обмоток трансформатора и освоение методики опытного определения сопротивлений нулевой последовательности.

### **Содержание работы:**

1. Ознакомиться с паспортными данными трансформатора.

2. Для схемы соединения трансформатора «звезда – звезда» (Y/Y) при однофазной и двухфазной нагрузке снять зависимости линейных и фазных напряжений вторичной обмотки, фазных напряжений и токов пер-

вичной обмотки, напряжение смещения нейтрали первичной обмотки трансформатора от тока нагрузки.

3. Для схемы соединения трансформатора «треугольник – звезда» ( $\Delta/Y$ ) при однофазной и двухфазной нагрузке снять зависимости линейных и фазных напряжений вторичной обмотки, линейные и фазные токи первичной обмотки трансформатора от тока нагрузки.

4. Определить сопротивление нулевой последовательности для схем «звезда - звезда с нулевым проводом»  $Y/Y_N$  и «треугольник - звезда с нулевым проводом»  $\Delta/Y_N$ .

5. По данным опытов п.п. 2 и 3 построить зависимости фазных напряжений вторичной обмотки от тока нагрузки и сравнить их между собой.

6. Рассчитать линейные токи первичной обмотки для п.п. 2 и 3 и сравнить их с опытными данными.

7. Дать оценку полученных результатов.

### **Выполнение работы**

В настоящей работе проводятся исследования несимметрично нагруженного трёхфазного трёхстержневого трансформатора при крайних случаях несимметричной нагрузки: однофазной и двухфазной.

До выполнения экспериментальной части работы необходимо ознакомиться с паспортными данными трансформатора и произвести расчёт номинальных токов первичной и вторичной обмоток трансформатора и привести их отчете.

#### **Схема соединения обмоток $Y/Y$**

Для экспериментального исследования соединения обмоток  $Y/Y_N$  и однофазной нагрузки собирается схема рис.4.10.а; для соединения обмоток  $Y/Y$  и двухфазной нагрузки схема рис. 4.10.б.

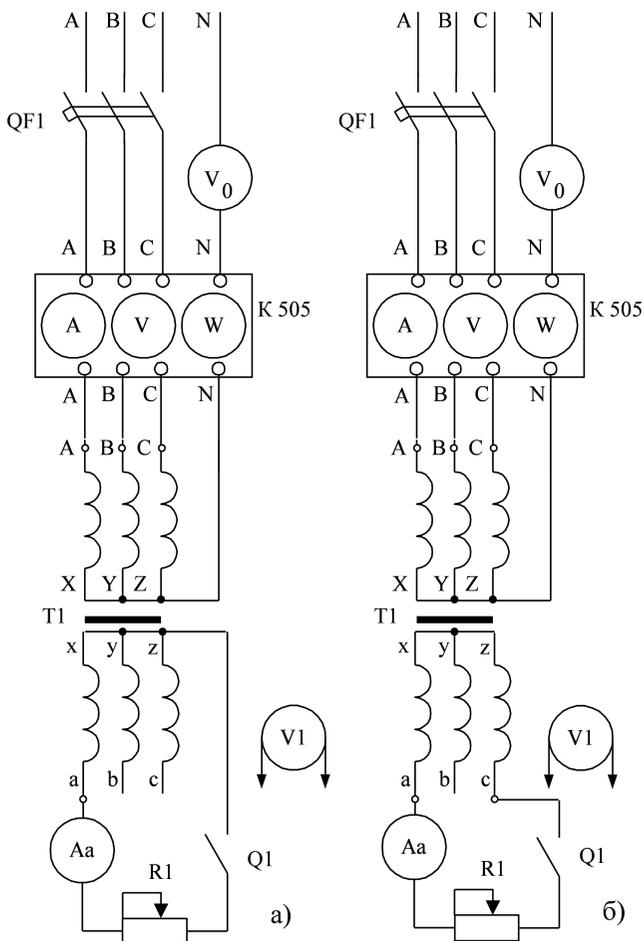


Рис.4.10. Схемы исследования трансформаторов:  
 а) однофазная нагрузка, соединение обмоток  $Y/Y_N$ ;  
 б) двухфазная нагрузка, соединение обмоток  $Y/Y$

Фазные напряжения и токи первичной обмотки измеряются комплектом К505. Напряжение смещения между нулем трансформатора и нулевой точкой сети измеряется вольтметром  $V_0$ . Ток нагрузки трансформатора измеряется

амперметром  $A_a$ , а линейные и фазные напряжения на вторичной обмотке трансформатора вольтметром  $V1$ .

Перед подключением трансформатора к питающей сети необходимо установить максимальным сопротивление нагрузки  $R1$  и разомкнуть рубильник  $Q1$ . После включения в сеть первичной обмотки (автомат  $QF1$ ) снимают показания приборов на холостом ходу трансформатора, а потом после включения  $Q1$  уменьшают сопротивление нагрузки и устанавливают заданный ток во вторичной обмотке трансформатора. Опыты проводятся для трёх значений тока нагрузки:  $0$ ;  $0,5I_{2H}$ ;  $I_{2H}$ . Данные измерений заносятся в таблицу 8.1.

Таблица 8.1. Данные несимметричной нагрузки для схем  $Y/Y_N$  и  $Y/Y$

№ п. п.	Первичная обмотка							Вторичная обмотка						
	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_0$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$U_a$	$U_b$	$U_c$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ac}$	$I_a$
	В	В	В	В	А	А	А	В	В	В	В	В	В	А
	Схема $Y/Y_N$ . Однофазная нагрузка													
1														0
2														
3														
	Схема $Y/Y$ . Двухфазная нагрузка													
1														0
2														
3														

Опытные данные распределения токов первичной обмотки могут быть проверены путём их сопоставления с расчётными, полученными по приводимым ниже соотношениям (для абсолютных значений), в которых ток холостого хода принят равным нулю.

Схема  $Y/Y_N$  однофазная нагрузка (рис.4.10.а)

Токи в фазах вторичной обмотки равны:

$$I_a = I_{2H}, \quad I_b = I_c = 0.$$

Токи первичной обмотки будут равны:

$$I_A = \frac{2}{3} \frac{I_{2H}}{k}; \quad I_B = \frac{1}{3} \frac{I_{2H}}{k}; \quad I_C = \frac{1}{3} \frac{I_{2H}}{k}$$

где  $k = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2}$  – коэффициент трансформации.

Опыт и приведённые уравнения показывают, что, хотя на вторичной стороне нагружена лишь одна фаза, в первичной обмотке ток протекает по всем трём фазам. Фазные вторичные напряжения при изменении нагрузки трансформатора от холостого хода до номинального значения в разных фазах имеют разную величину.

Схема Y/Y двухфазная нагрузка (рис.4.10.б)

Линейные токи вторичной обмотки для этого случая:

$$I_a = I_b = I_{2H}; \quad I_c = 0.$$

Линейные токи первичной обмотки равны фазным токам:

$$I_A = I_{A\phi} = \frac{I_a}{k}; \quad I_B = I_{B\phi} = \frac{I_b}{k}; \quad I_C = I_{C\phi} = 0.$$

Опыт и приведённые формулы показывают, что при соединении обмоток по схеме Y/Y и нагрузке двух фаз намагничивающие силы первичной и вторичной обмоток на каждом стержне трансформатора уравновешивают друг друга. Фазные вторичные напряжения при изменении нагрузки трансформатора от холостого хода до номинальной в разных фазах практически симметричны.

### **Схема соединения обмоток Δ/Y**

Для экспериментального исследования соединения обмоток Δ/Y<sub>N</sub> и однофазной нагрузки собирается схема рис.4.11.а; для соединения обмоток Δ/Y и двухфазной нагрузки схема рис. 4.11.б.

Линейные напряжения и токи первичной обмотки измеряются комплектом К505. Фазные токи первичной обмотки измеряются соответственно амперметрами А<sub>А</sub>, А<sub>В</sub>,

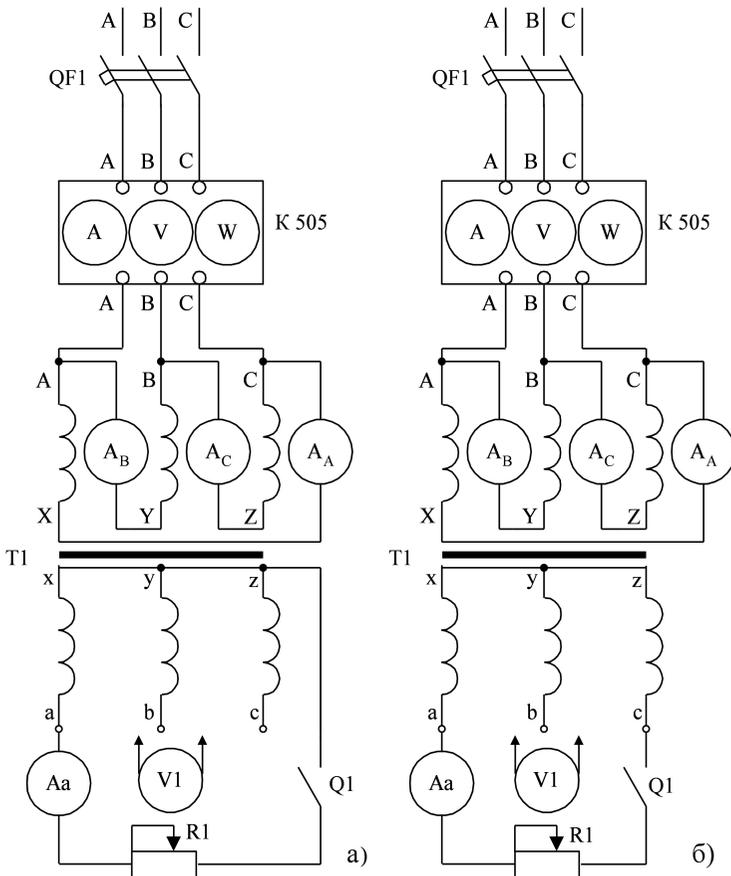


Рис.4.11. Схемы исследования трансформаторов:  
 а) однофазная нагрузка, соединение обмоток  $\Delta/Y_N$ ;  
 б) двухфазная нагрузка, соединение обмоток  $\Delta/Y$ .

$A_c$ . Ток нагрузки трансформатора измеряется амперметром  $A_a$ , а линейные и фазные напряжения на вторичной обмотке трансформатора вольтметром  $V_1$ .

Перед подключением трансформатора к питающей сети необходимо установить максимальным сопротивление нагрузки  $R_1$  и разомкнуть рубильник  $Q_1$ . После включения в сеть первичной обмотки (автомат  $QF_1$ ) снимают показа-

ния приборов на холостом ходу трансформатора, а потом после включения Q1 уменьшают сопротивление нагрузки и устанавливают заданный ток во вторичной обмотке трансформатора. Опыты проводятся для трёх значений тока нагрузки: 0;  $0,5I_{2H}$ ;  $I_{2H}$ . Данные измерений заносятся в таблицу 8.2.

Таблица 8.2. Данные несимметричной нагрузки для схем  $\Delta/Y_N$  и  $\Delta/Y$

№ п/ п	Первичная обмотка						Вторичная обмотка						
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_{A\phi}$	$I_{B\phi}$	$I_{C\phi}$	$U_a$	$U_b$	$U_c$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$I_a$
	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A
Схема $\Delta/Y_N$ . Однофазная нагрузка													
1													0
2													
3													
Схема $\Delta/Y$ . Двухфазная нагрузка													
1													0
2													
3													

Опытные данные распределения токов первичной обмотки могут быть проверены путём их сопоставления с расчётными, полученными по приводимым ниже соотношениям (для абсолютных значений), в которых ток холостого хода принят равным нулю.

Схема  $\Delta/Y_N$  однофазная нагрузка (рис.4.11.а)

Нагружена фаза  $a$ -х вторичной обмотки. Токи этой обмотки:

$$I_a = I_{2H}; \quad I_b = I_c = 0.$$

Токи в фазах первичной обмотки:

$$I_{A\phi} = \frac{I_a}{k} = \frac{I_{2H}}{k}; \quad I_{B\phi} = I_{C\phi} = 0.$$

Фазные вторичные напряжения при изменении нагрузки трансформатора от холостого хода до номинальной в разных фазах практически симметричные.

Схема  $\Delta/Y$  двухфазная нагрузка (рис.4.11.б)

Токи вторичной обмотки:  $I_a = I_c = I_{2H}$ ;  $I_b = 0$ .

Фазные токи первичной обмотки:

$$I_{A\phi} = \frac{I_a}{k} = \frac{I_{2H}}{k}; \quad I_{B\phi} = \frac{I_b}{k} = 0; \quad I_{C\phi} = \frac{I_c}{k} = \frac{I_{2H}}{k}.$$

Фазные вторичные напряжения при изменении нагрузки трансформатора от холостого хода до номинальной в разных фазах практически симметричны.

### **Определение сопротивлений нулевой последовательности**

При несимметричной нагрузке ток нулевой последовательности  $I_0$  возникает во вторичной обмотке трансформатора. Поэтому при определении сопротивления нулевой последовательности  $Z_0$  опытным путём её используют в качестве питающей обмотки, подводя к ней напряжение однофазного переменного тока. Однофазный ток при этом будет соответствовать току нулевой последовательности. Вторичные фазные обмотки могут быть соединены либо последовательно, либо параллельно с таким расчётом, чтобы потоки всех фаз имели одинаковое направление.

Первичную обмотку исследуемого трансформатора, то есть обмотку, которая при опытном определении сопротивления нулевой последовательности играет роль вторичной обмотки, соединяют звездой или треугольником, в зависимости от того, для какой схемы соединения трансформатора ( $Y/Y_N$  или  $\Delta/Y_N$ ) определяется  $Z_0$ .

По измеренным напряжению, току и мощности определяют значение  $Z_0$  и его составляющие  $R_0$  и  $X_0$  отнесённых к одной фазе.

Определение сопротивления нулевой последовательности для схемы  $\Delta/Y_N$  (рис.4.12.а)

Перед началом опыта устанавливают минимальное напряжение на выходе автотрансформатора Т1. Включают автомат QF1 и, увеличивая напряжение до номинального

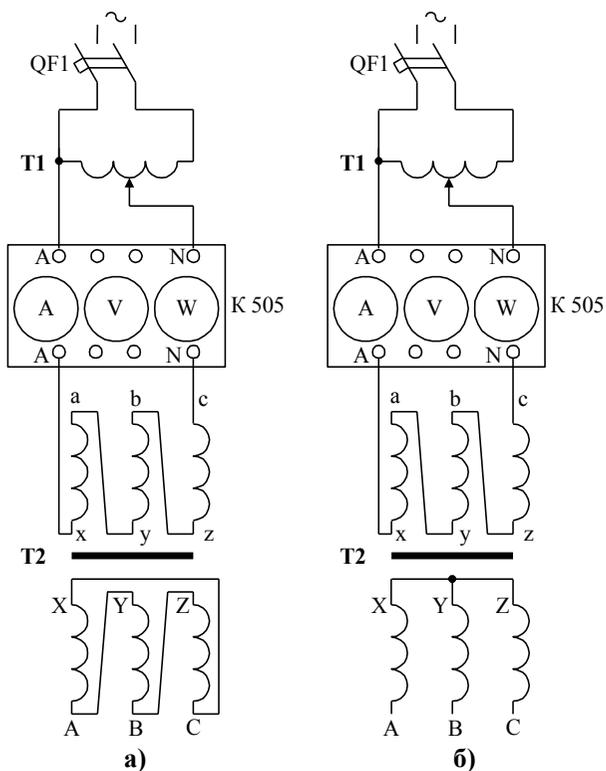


Рис.4.12. Схемы опытного определения сопротивления нулевой последовательности: а) для схемы соединения обмоток  $\Delta/Y_N$ ; б) для схемы соединения обмоток  $Y/Y_N$

тока вторичной обмотки или близкого к нему значения, записывают показания приборов в таблицу 8.3.

Таблица 8.3. Определение сопротивлений нулевой последовательности

Схема	$U_0$	$I_0$	$P_0$	$Z_0$	$R_0$	$X_0$
	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом
$\Delta/Y_N$						
$Y/Y_N$						

На основании опытных данных рассчитываем:

$$Z_0 = \frac{U_0}{3I_0}; \quad R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}.$$

Определение сопротивления нулевой последовательности для схемы  $Y/Y_N$  (рис.4.12.б)

Опыт проводится по схеме рис.4.12.б. Методика проведения опыта аналогичная опыту для схемы  $\Delta/Y_N$ . Результаты опыта заносятся в таблицу 8.3. На основании опытных данных рассчитываются  $Z_0$ ,  $R_0$ ,  $X_0$  по формулам, приведённым выше.

Следует иметь в виду, что при соединении обмоток трансформатора по схеме  $\Delta/Y_N$  сопротивление нулевой последовательности может быть в 5...10 раз меньше чем сопротивление нулевой последовательности при соединении обмоток по схеме  $Y/Y_N$ . Поэтому напряжение  $U_0$  в этом опыте будет значительно меньше.

**Содержание отчёта**

1. Паспортные данные исследуемого трансформатора и технические характеристики используемых приборов.
2. Схемы опытов.
3. Таблицы измерений.
4. Для схем соединения  $Y/Y_N$ ,  $Y/Y$ ,  $\Delta/Y_N$  и  $\Delta/Y$  построить зависимости фазных напряжений вторичной обмотки от тока нагрузки.
5. Рассчитать сопротивление нулевой последовательности для схем соединения обмоток  $Y/Y_N$  и  $\Delta/Y_N$ .
6. Рассчитать линейные токи первичной обмотки для п.2 и 3 и сравнить их с опытными данными.
7. Дать оценку полученных результатов.

**Контрольные вопросы**

1. Какая из групп трансформатора  $0$  или  $11$  предпочтительнее при наличии значительной несимметрии нагрузки и почему?
2. В каких случаях при несимметричной нагрузке появляется ток нулевой последовательности, а в каких он отсутствует?

3. Что является причиной несимметрии вторичных напряжений 3-х трансформаторов при несимметричной нагрузке?

4. Почему при схеме соединения  $\Delta/Y_N$  при несимметричной нагрузке вторичные фазные напряжения трансформатора практически симметричные?

## ГЛАВА ПЯТАЯ

### АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

#### **РАБОТА № 9. Исследование трёхфазного Асинхронного двигателя с фазным ротором**

**Цель работы:** изучить конструкцию асинхронного двигателя с фазным ротором, способы пуска и провести исследование его электромеханических свойств.

**Содержание работы:**

1. Ознакомиться с конструкцией и вычертить разрез асинхронного двигателя с фазным ротором.
2. Определить сопротивление обмоток статора и ротора постоянному току.
3. Собрать схему для опытного исследования асинхронного двигателя с фазным ротором.
4. Определить коэффициент трансформации.
5. Осуществить пуск двигателя, а затем изменить направление его вращения.
6. Снять и построить характеристики холостого хода.
7. Снять и построить характеристики короткого замыкания.
8. Снять и построить рабочие характеристики двигателя без добавочного сопротивления в цепи ротора.
9. Снять и построить зависимость пускового момента от добавочного сопротивления в цепи ротора. Найти величину сопротивления пускового реостата, необходимую для создания максимального пускового момента.
10. Дать оценку результатам испытаний.

## Выполнение работы

Перед началом работы необходимо записать паспортные данные исследуемого асинхронного двигателя. Определить число пар полюсов и частоту вращения поля статора, номинальное скольжение и рассчитать номинальный момент по следующим формулам:

$$\Omega_i = \frac{2\pi f_1}{p} \text{ (рад/с) - угловая частота магнитного поля}$$

статора;

$$s_n = \frac{\Omega_1 - \Omega_{2H}}{\Omega_1} \text{ - номинальное скольжение;}$$

$$M_H = \frac{P_{2H}}{\Omega_{2H}} \text{ - номинальный момент, Нм;}$$

$$\Omega_{2H} = \frac{\pi n_n}{30} \text{ (рад/с) - номинальная угловая частота}$$

ротора;

где  $f_1, p$  - соответственно частота тока (Гц) и число пар полюсов обмотки статора..

Начертить продольный разрез асинхронного двигателя с фазным ротором. Указать на чертеже: корпус; сердечник статора; обмотку статора; подшипниковые щиты; вал ротора; сердечник ротора; обмотку ротора; контактные кольца и щеточный механизм.

### Измерение омических сопротивлений обмоток статора и ротора

Сопротивление обмоток статора и ротора постоянному току определяется методом амперметра и вольтметра при трех различных значениях тока  $I=(0,2\dots 0,5)I_H$  по методике, изложенной в главе 1.6.

Обмотка статора может иметь три или шесть выводов, обмотка ротора обычно соединяется в звезду, и выводятся только начала обмоток  $P1, P2$  и  $P3$  (нулевая точка недо-

ступна). Поэтому в опыте измеряется сопротивление двух последовательно соединённых фазных обмоток (между выводами  $P1-P2$ ,  $P2-P3$  и  $P1-P3$ ) при трёх значениях тока и находится среднее арифметическое значение сопротивления фазной обмотки  $r_{2cp}$ . По измеренному омическому

сопротивлению обмоток статора  $r_1$  и ротора  $r_2$  определяют их активное сопротивление, которое расчетным путем приводят к рабочей температуре обмотки  $75^\circ\text{C}$ .

### Схема лабораторной установки

Для испытания двигателя собирается схема рис.5.1. Регулирование напряжения на статоре осуществляется индукционным регулятором ИР. Измерительный комплект К505 измеряет фазные напряжения на статоре  $U_{1\phi}$ , ток статора  $I_{1л}$  и активную мощность  $P_\phi$ , линейное напряжение на роторе  $U_{2л}$ , измеряется вольтметром V2. В цепь ротора включен

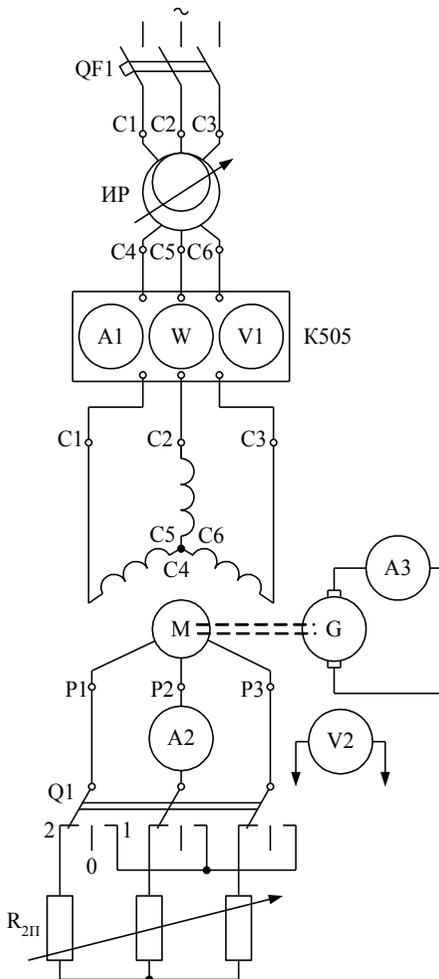


Рис.5.1. Схема исследования асинхронного двигателя с фазным ротором

трехпозиционный переключатель Q1, который в положении «1» подключает к обмотке ротора реостат R<sub>2п</sub>, в положении «2» замыкает ротор накоротко и в положении «0» размыкает цепь обмотки ротора. Для нагрузки асинхронного двигателя применяется нагрузочное устройство с генератором постоянного тока и рекуперацией электроэнергии в сеть постоянного тока.

### Определение коэффициента трансформации асинхронного двигателя

Для определения коэффициента трансформации асинхронного двигателя с фазным ротором к обмотке статора подводят номинальное напряжение при разомкнутой обмотке ротора (положение «0» переключателя Q1), измеряются напряжения на статоре и роторе, которые записываются в таблицу 9.1. Коэффициент трансформации определяется отдельно для каждой фазы:

$$k_m = \frac{\sqrt{3} U_{1\phi}}{U_{2Л}}$$

Затем определяется среднее значение коэффициента трансформации  $k_{Tcp} = \frac{k_{T1} + k_{T2} + k_{T3}}{3}$ .

Таблица 9.1. Определения коэффициента трансформации

Статор			Ротор			Коэффициент трансформации			
C1	C2	C3	P1-P2	P1-P3	P2-P3				
U <sub>1A</sub>	U <sub>1B</sub>	U <sub>1C</sub>	U <sub>2AB</sub>	U <sub>2AC</sub>	U <sub>2BC</sub>	k <sub>T1</sub>	k <sub>T2</sub>	k <sub>T3</sub>	k <sub>cp</sub>

### Пуск в ход трехфазного асинхронного двигателя и изменение направления его вращения

Пуск асинхронного двигателя осуществляется подачей напряжения на обмотку статора при обмотке ротора, за-

мкнутой на реостат или накоротко. Перед пуском необходимо установить минимальное напряжение на выходе индукционного регулятора и замкнуть цепь ротора на реостат (Q1 в положение 1 или 2). Постепенно увеличивая напряжение до номинального, асинхронный двигатель запускается.

*Для изменения направления вращения двигателя надо изменить направление вращения магнитного поля, изменив чередование фаз питающего напряжения. Для этого достаточно поменять местами два любых проводника на клеммах обмотки статора двигателя.*

### **Опыт холостого хода**

Холостой ход – это режим, при котором обмотка статора двигателя присоединена к источнику питания, ротор замкнут накоротко, а механическая нагрузка на валу отсутствует. При отсутствии нагрузки ротор вращается практически с синхронной скоростью ( $s \approx 0$ ). Напряжение на статоре регулируется индукционным регулятором ИР.

При испытании двигателя снимаются характеристики холостого хода, которые представляют собой зависимости  $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_x)$  при  $f_1 = f_H = \text{const}$ .

Опыт холостого хода проводят по схеме рис.5.1, установив Q1 в положении «2». Опыт начинают после пуска двигателя с напряжения, равного  $(1,1 \dots 1,2)U_H$ , снижая его постепенно до такой минимальной величины  $(0,3 \dots 0,4)U_H$ , при которой двигатель еще работает устойчиво. Результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу 9.2. Все измерения проводят в одной из трех фаз. При проведении опыта холостого хода необходимо зафиксировать измерения при номинальном напряжении на статоре  $U_H$ .

Таблица 9.2. Данные опыта холостого хода

№ п/п.	$U_{x\phi}$	$I_{x\phi}$	$P_{x\phi}$	$\cos \varphi_x$
		В	А	Вт

Коэффициент мощности  $\cos \varphi_x$  рассчитывается по формуле:

$$\cos \varphi_x = \frac{P_{x\phi}}{U_{x\phi} I_{x\phi}}.$$

По данным табл. 9.2 строятся характеристики холостого хода.

Значение тока холостого хода  $I_{XH}$  при номинальном напряжении  $U_H$  в процентном выражении от номинального тока определяют из соотношения:

$$I_{XH}\% = \frac{I_{XH}}{I_H} 100\%.$$

Следует обратить внимание на то, что величина тока  $I_{XH}$  асинхронных двигателей составляет (40...70)% от номинального тока, что значительно больше тока холостого хода трансформаторов (2...10)%.

### **Опыт короткого замыкания**

Режим короткого замыкания двигателя возникает в случае, когда его ротор оказывается заторможенным (скорость вращения равна нулю и скольжение  $s=1,0$ ). При этом обмотка ротора короткозамкнута. Такой режим при номинальном и близком к нему напряжении на обмотке статора опасен для двигателя, так как токи в цепях статора и ротора будут значительно превышать номинальные значения. Опыт короткого замыкания проводится при пониженных напряжениях  $U_K$  и используется для экспериментального определения параметров асинхронной машины, в частности, параметров схемы замещения.

Перед включением напряжения обмотка ротора замыкается накоротко, и ротор затормаживается специальным тормозным устройством. На обмотку статора подается пониженное напряжение, чтобы ток статора не превосходил  $(1,1...1,3)I_H$ . Схема включения приборов для проведения опыта короткого замыкания остается той же, что и в

опыте холостого хода (рис.5.1, Q2 в положении «2»), но пределы измерения измерительных приборов устанавливаются с учетом тех величин токов и напряжений, которые имеют место в опыте короткого замыкания.

Опыт короткого замыкания выполняется в такой последовательности. Индукционный регулятор устанавливается на минимальное напряжение. Ротор затормаживается механическим тормозом, ключ Q1 устанавливается в положение «2». Затем включается вводный автомат и напряжение быстро поднимается до величины, когда ток статора станет  $(1,1 \dots 1,3)I_H$ . Показания приборов записываются в таблицу 9.3. Затем индукционным регулятором подводимое напряжение постепенно понижается с записью показаний приборов. Опыт следует проводить быстро, поскольку при неподвижном роторе условия охлаждения плохие и двигатель быстро нагревается. При проведении опыта короткого замыкания необходимо зафиксировать режим, при котором ток статора равен номинальному току.

Таблица 9.3. Данные опыта короткого замыкания

№ п.п.	$U_{K\phi}$ В	$I_{K\phi}$ А	$P_{K\phi}$ Вт	$\cos \varphi_K$ -

Коэффициент мощности ( $\cos \varphi_K$ ) рассчитывается по формуле:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_{K\phi}}{U_{K\phi} I_{K\phi}}.$$

На основании данных опыта короткого замыкания определяются параметры двигателя: полное ( $z_K$ ), индуктивное ( $x_K$ ) и активное ( $r_K$ ) сопротивления при коротком замыкании. Эти параметры определяются по результатам измерений при номинальном токе статора по следующим формулам:

$$z_k = \frac{U_{KH\phi}}{I_{H\phi}}; \quad r_k = \frac{P_{KH\phi}}{I_{H\phi}^2}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Далее, активное сопротивление короткого замыкания должно быть приведено к температуре 75°C.

### Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называются зависимости подводимой мощности  $P_1$ , тока статора  $I_1$ , КПД  $\eta$ , коэффициента мощности  $\cos\phi_1$ , угловой частоты вращения ротора  $\Omega_2$ , момента на валу  $M$  от полезной мощности на валу  $P_2$  при постоянном подводимом к статору напряжении  $U_1=U_H=const$  и постоянной частоте  $f_1=f_H=const$ .

Снятия рабочих характеристик осуществляется по методу непосредственной нагрузки. Испытание проводят по схеме рис.5.1 при закороченном роторе (Q1 в положении «2»). Номинальное напряжение на статоре поддерживается индукционным регулятором. Нагрузкой двигателя служит генератор постоянного тока G. При снятии рабочих характеристик необходимо регулировать момент на валу в диапазоне от нуля до  $1,2M_H$ . Загрузку асинхронного двигателя можно контролировать по току статора  $I_1$ , так как в пределах номинальной нагрузки ток не превышает номинального значения. Величину момента на валу двигателя определяют методом тарированного генератора (по величине тока нагрузочного генератора  $I_3$  с помощью тарировочной кривой  $M = f(I_3)$ ).

Частота вращения ротора измеряется с помощью тахогенератора или другим способом, описанным в разделе 1.8. Опытные и расчетные данные заносятся в таблицу 9.4.

Необходимые расчетные величины получают из соотношений:

$$\Omega_2 = \frac{\pi n_2}{30} \text{ (rad/c)}; \quad P_2 = M\Omega_2 \text{ (Bm)}; \quad \eta = \frac{P_2}{3P_{1\phi}};$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_{1\phi}}{U_{1\phi} I_{1\phi}} ; \quad \Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} \text{ (рад/с)}; \quad s = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} ,$$

где  $f_1, p$  - частота источника питания и число пар полюсов двигателя соответственно.

Таблица 9.4. Данные рабочих характеристик.

№ п. п.	Опыт						Расчет				
	$U_{1\phi}$	$I_{1\phi}$	$P_{1\phi}$	$n_2$	$I_3$	$M$	$\Omega_2$	$P_2$	$\eta$	$\cos\varphi_1$	$s$
	В	А	Вт	об мин	А	Нм	рад с	Вт	-	-	-

По расчетным данным таблицы 9.4 строятся рабочие характеристики двигателя.

### Определение пускового момента двигателя

Пусковые характеристики асинхронных двигателей с фазным ротором можно изменять введением на время пуска реостата в цепь ротора. Таким образом, к собственному сопротивлению обмотки ротора  $r_2$  при пуске добавляется внешнее сопротивление  $R_{2п}$ . Активное сопротивление фазы ротора складывается из этих двух сопротивлений:  $r_2 + R_{2п} = R_2$ .

Для определения зависимости начального пускового момента двигателя  $M_{п}$  от величины сопротивления реостата в цепи ротора  $R_{2п}$  переключатель Q1 в схеме рис.5.1 переводится в положение «1». Для уменьшения нагрева электродвигателя опыт проводится при пониженном напряжении  $U_1 = (0,4 \dots 0,5)U_H$ , которое с помощью индукционного регулятора поддерживается постоянным в течение всего опыта.

Для определения начального пускового момента ротор двигателя затормаживают с помощью нагрузочной машины. Значения токов и напряжений в момент остановки двигателя записывают в таблицу 9.5

Таблица 9.5. Опытные данные зависимости  $M_{п}$  от  $R_{2п}$

№	U <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	R <sub>2П</sub>	M <sub>П</sub>	M <sub>П*</sub>
п.п.	В	А	В	А	Ом	Нм	Нм

Сопrotивление пускового реостата определяют по формуле  $R_{2П} = U_2/I_2$ . Последний опыт проводится для закороченного ротора ( $R_{2П} = 0$ ).

Величина начального пускового момента двигателя определяется по тарировочной кривой  $M = f(I_3)$ .

Начальный пусковой момент при номинальном напряжении  $M_{П*}$  определяется по формуле:

$$M_{П*} = \left( \frac{U_H}{U_1} \right)^2 M_{П}$$

Величина сопротивления пускового реостата  $R_{2ПМ}$ , соответствующая максимальному пусковому моменту двигателя  $M_{Пmax}$  определяется по формуле:

$$R_{2ПМ} = \frac{x_K - k_T^2 r_2}{k_T^2},$$

где  $x_K$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания двигателя;

$k_T$  – коэффициент трансформации;

$r_2$  – активное сопротивление фазы обмотки ротора.

### Содержание отчёта

1. Паспортные данные исследуемого двигателя и технические характеристики используемых измерительных приборов.

2. Эскиз продольного разреза асинхронного двигателя с фазным ротором.

3. Схема испытательной установки.

4. Таблицы измерений и расчетов.

5. Характеристики холостого хода асинхронного двигателя.

6. Характеристики короткого замыкания. Расчёт параметров короткого замыкания.

7. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.

8. Зависимость начального пускового момента от сопротивления реостата в цепи ротора.

9. Дать оценку результатам испытаний.

### **Контрольные вопросы**

1. Объясните устройство асинхронного двигателя с фазным ротором.

2. Как определяется коэффициент трансформации асинхронного двигателя с фазным ротором?

3. Как изменяется направление вращения асинхронного двигателя?

4. Что означают термины «холостой ход» и «короткое замыкание» применительно к асинхронному двигателю?

5. Как изменяются КПД и  $\cos\varphi$  двигателя при изменении нагрузки на валу?

6. Как влияет дополнительное сопротивление, введённое в цепь ротора на величину пускового момента?

## **РАБОТА № 10. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором**

**Цель работы:** исследовать влияние напряжения и частоты источника питания на механическую и электромеханическую характеристики асинхронного двигателя и исследовать зависимость сопротивления обмотки ротора от скольжения.

### **Содержание работы:**

1. Ознакомиться с конструкцией асинхронного короткозамкнутого двигателя.

2. Снять механическую и электромеханическую характеристики двигателя при номинальном и пониженном напряжении и номинальной частоте (50 Гц).

3. Переключить электродвигатель на источник регулируемой частоты и снять механические и электромеха-

нические характеристики при частоте источника питания 35 и 20 Гц и регулировании источника по закону  $U/f=const$ .

4. Провести опыт короткого замыкания АД при частоте 10 Гц.

5. По данным режимов короткого замыкания (пп. 2, 3 и 4) рассчитать сопротивление короткого замыкания двигателя (полное, активное и индуктивное) при разной частоте тока.

6. По данным п.5 рассчитать приведённые к статору и частоте сети активные и индуктивные сопротивления ротора и построить графики их зависимость от скольжения.

7. Дать оценку результатам испытаний.

### **Предварительные замечания**

Асинхронные двигатели состоят из неподвижной части – статора, вращающейся части - ротора и двух подшипниковых щитов. Статор состоит из станины (корпуса), сердечника и трехфазной обмотки. Сердечник статора изготавливается шихтованным, т.е. набирается из изолированных пластин электротехнической стали. Трехфазная обмотка располагается в пазах сердечника. При протекании трехфазного тока по трехфазной обмотке в машине создается вращающееся магнитное поле.

Ротор состоит из вала, напрессованного на него сердечника, набранного из пластин, штампованных из листов электротехнической стали, в пазах которого размещена обмотка ротора. Вал ротора опирается на подшипники качения, которые в свою очередь с помощью подшипниковых щитов сопрягаются со станиной.

В короткозамкнутых двигателях обмотка ротора выполнена в виде беличьего колеса. Её изготавливают путем заливки под давлением пазов расплавленным алюминием или его сплавами. По торцам ротора все стержни соединяют

между собой короткозамыкающими кольцами, давшими название двигателю. Такая конструкция обмотки ротора предложена М.О. Доливо-Добровольским.

Перед началом испытаний необходимо записать паспортные данные исследуемого асинхронного двигателя. Особое внимание необходимо обратить на запись  $\Delta/Y$  220/380 В, которая означает, что данный двигатель может использоваться при подключении к источнику питания с линейным напряжением 220 или 380 В. Схема соединения обмотки статора в первом случае должна быть «треугольник», в другом – «звезда». При соединении звездой и подключении к источнику 220 В такой двигатель окажется в ненормальном режиме при пониженном в  $\sqrt{3}$  раз напряжении, что используется в лабораторной работе для выполнения опытов, требующих понижения напряжения питания двигателя.

Далее, необходимо определить число пар полюсов и частоту вращения магнитного поля статора, номинальное скольжение и номинальный момент, рассчитав их по следующим формулам:

$$\Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} \left( \frac{pad}{c} \right) \quad - \text{угловая частота вращения}$$

магнитного поля статора,

$$\Omega_{2H} = \frac{\pi n_H}{30}, \quad (pad/c) \quad - \text{номинальная угловая частота}$$

вращения ротора;

$$s_H = \frac{\Omega_1 - \Omega_{2H}}{\Omega_1} \quad - \text{номинальное скольжение;}$$

$$M_H = \frac{P_{2H}}{\Omega_{2H}} \quad (\text{Нм}) \quad - \text{номинальный момент;}$$

где  $f_1, p$  - частота тока и число пар полюсов обмотки статора соответственно.

### **Выполнение работы**

## Характеристики при номинальном напряжении и частоте 50 Гц

Для опытного исследования асинхронного двигателя при номинальном напряжении собирается схема рис.5.2.а.

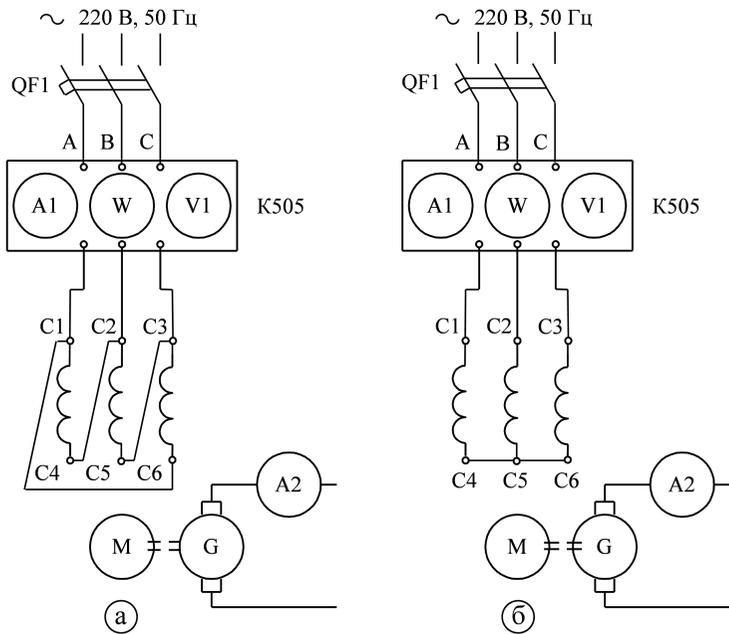


Рис. 5.2. Схема исследования короткозамкнутого асинхронного двигателя при питании от сети 50 Гц : а) - при номинальном напряжении на фазе; б) - при пониженном напряжении

Механические и электромеханические характеристики снимают путём непосредственной нагрузки асинхронного двигателя. Нагрузка создаётся генератором постоянного тока независимого возбуждения  $G$  и изменяется нагрузочным сопротивлением в цепи якоря (на схеме не показан). Для определения момента на валу записывается ток якоря нагрузочного генератора  $I_2$ . Величина момента на валу определяется по току нагрузочной машины с помощью тарировочной кривой  $M = f(I_2)$ .

Частота вращения ротора определяется по показаниям тахометра или другим способом, описанным в главе 1. При измерении частоты вращения  $n$  в об/мин., пересчет в рад/с осуществляют по формуле

$$\Omega = \pi n / 30.$$

Измерения напряжения  $U_{1\phi}$ , тока  $I_{1\phi}$  и активной мощности  $P_{\phi}$  производят измерительным комплектом К-505 или аналогичным.

Запуск исследуемого двигателя М осуществляют включением автоматического выключателя QF1. Далее включают нагрузочный генератор G и увеличивают нагрузку двигателя до тех пор, пока ток статора двигателя не достигнет значения  $I_1 = 1,2I_{1ном}$ . При этом через приблизительно одинаковые интервалы тока  $I_1$  снимают показания приборов и заносят их в таблицу 10.1.

Таблица 10.1. Данные опытов нагружения двигателя при питании от сети 50 Гц

№ п/п	$U_{1\phi}$	$I_{1\phi}$	$P_{\phi}$	$n$	$\otimes_{\frac{\pi}{6}}$	$I_2$	М
	В	А	Вт	об/мин	рад/с	А	Нм
Соединение обмоток треугольником (номинальное напряжение)							
1 · 6						0	
Соединение обмоток звездой (пониженное напряжение)							
1 · 7						0	

Первый отсчет по приборам делают в режиме холостого хода ( $I_2 = 0$ ). Всего необходимо снять 5-6 показаний, из них одно должно соответствовать номинальному режиму ( $I_1 = I_{1ном}$ ). Данные опыта, соответствующие номинальному току, сравнить с паспортными данными двигателя.

Из-за особенности конструкции прибора К-505, для определения фазных значений напряжения  $U_{1\phi}$  и тока  $I_{1\phi}$  при соединении обмоток треугольником, необходимо показания вольтметра умножать на  $\sqrt{3}$ , а показания амперметра разделить на  $\sqrt{3}$ . При соединении статора звездой такие вычислительные операции не проводятся, амперметр и вольтметр дают фазные значения этих величин.

### **Характеристики при пониженном напряжении и частоте 50 Гц**

Понижение напряжения на фазах обмотки статора осуществляется путем соединения обмоток звездой и подключением их к той же электрической сети (рис.5.2.б). В результате изменения соединения обмоток напряжение на фазах двигателя уменьшается в  $\sqrt{3}$  раз по сравнению соединением обмоток треугольником.

Механическая и электромеханическая характеристики снимаются путем непосредственной нагрузки при изменении скорости двигателя от скорости холостого хода до нуля. При проведении опыта необходимо зафиксировать точки соответствующие холостому ходу, номинальной скорости, критическому моменту (или близкому к нему) и короткого замыкания. Точке критического момента будет соответствовать максимальный ток якоря нагрузочного генератора ( $I_2$ ), а точке короткого замыкания – остановка двигателя ( $\Omega_2=0$ ).

Первый отсчет по приборам делают в режиме холостого хода ( $I_2 = 0$ ). Необходимо снять 3-4 точки до критического момента и 3-4 после него (всего 7-9 точек). Данные опытов заносятся в таблицу 10.1. Данные режима короткого замыкания заносят также в таблицу 10.3 для последующего выполнения расчетов.

### **Снятие характеристик при пониженной частоте источника**

Для снятия механических и электромеханических характеристик при ненормальной частоте необходимо двигатель переключить к источнику регулируемой частоты (рис.5.3) и ознакомиться с органами управления источника.

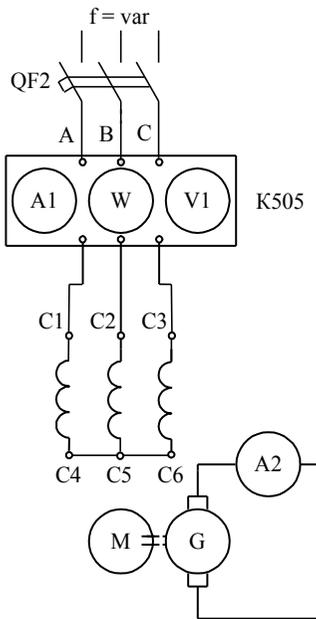


Рис.5.3. Схема исследования короткозамкнутого двигателя при питании его от источника регулируемой частоты

Характеристики снимаются от скорости холостого хода до полной остановки с фиксированием критического момента. Показания приборов для 7-9 (можно 5-6) точек каждой частоты заносятся в таблицу 10.2.

Для снятия данных режима короткого замыкания ротор асинхронного двигателя затормаживается с помощью тормозного устройства (см. главу 1). Данные этого режима записываются в таблицу 10.2 и в таблицу 10.3.

Таблица 10.2. Данные опытов при питании асинхрон-

При регулировании частоты одновременно необходимо регулировать напряжение по закону  $U/f = const$ . Для предыдущего опыта  $U_n = 220$  В,  $f = 50$  Гц,  $U/f = 4,4$  [В/Гц].

Поддерживая частоту постоянной, путем непосредственной нагрузки снимают механические и электромеханические характеристики для частот 35 Гц и 20 Гц. При заданном законе регулирования частоты, напряжение на выходе преобразователя во время эксперимента поддерживается: для частоты 35 Гц - 154 В; для 20 Гц - 88 В. Методика снятия характеристик аналогична опыту при пониженном напряжении и частоте 50 Гц. Характери-

ного двигателя от источника регулируемой частоты

№, п/п	$f_1$	$U_{1\phi}$	$I_{1\phi}$	$P_\phi$	$n$	$\Omega_2$	$I_2$	$M$
	Гц	В	А	Вт	об/мин	рад/с	А	Нм

Таблица 10.3 предназначена для последующего расчета сопротивления короткого замыкания двигателя.

Таблица 10.3. Данные опытов короткого замыкания

$f$	$U_{1\phi\kappa}$	$I_{1\phi\kappa}$	$P_{\phi\kappa}$	$Z_{\kappa f}$	$R_{\kappa f}$	$X_{\kappa f}$	$R'_2$	$X'_2$	$s=f/50$
Гц	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	-
50	127								1
35	89								0,7
20	51								0,4
10	26								0,2

Для частоты 10 Гц (44 В) необходимо выполнить только опыт короткого замыкания двигателя, данные которого заносятся в таблицу 10.3. Опыт проводят аналогично предыдущему опыту при заторможенном роторе.

Опытные данные для частот 50, 35 и 20 Гц берут из предыдущих опытов, табл. 10.1 и 10.2, используя данные режимов короткого замыкания двигателя.

### Расчёт сопротивлений короткого замыкания

Сопротивления короткого замыкания двигателя рассчитываются по следующим формулам:

$$Z_{\kappa f} = \frac{U_{1\phi\kappa}}{I_{1\phi\kappa}} - \text{полное сопротивление короткого замы-$$

кания при заданной частоте источника;

$$R_{\kappa f} = \frac{P_{\phi\kappa}}{I_{1\phi\kappa}^2} - \text{активное сопротивление короткого}$$

замыкания при заданной частоте;

$X_{kf} = \sqrt{Z_{kf}^2 - R_{kf}^2}$  - индуктивное сопротивление короткого замыкания при данной частоте.

### **Расчёт приведённых активных и индуктивных сопротивлений обмотки ротора и построение характеристик зависимости этих сопротивлений от скольжения**

Приведённые сопротивления ротора рассчитываются по формулам:

$$R_2' = R_{kf} - R_1; \quad X_2' \approx \frac{X_{kf}}{2} s = \frac{X_{kf}}{2} \frac{50}{f},$$

где  $R_1$  – активное сопротивление обмотки статора, которое необходимо измерить или определить по справочнику (получить его значение у преподавателя).

Зависимости сопротивлений обмотки ротора от скольжения  $R_2' = f(s)$  и  $X_2' = f(s)$  строятся по данным табл. 10.3.

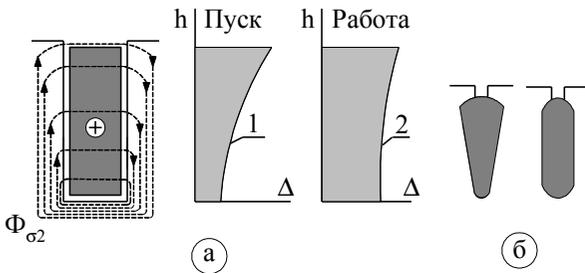
### **Комментарий к определению сопротивления короткого замыкания**

Стремление повысить пусковой момент асинхронных короткозамкнутых двигателей без увеличения активного сопротивления обмотки ротора (а, следовательно, и без увеличения потерь энергии в роторе) привело к появлению специальных конструкций обмоток ротора. К ним относятся роторы с двойной беличьей клеткой и роторы с глубокими пазами. Такие двигатели называют двигателями с повышенным пусковым моментом и глубокопазными двигателями.

Принцип действия глубокопазных двигателей основан на явлении вытеснения тока в обмотке к поверхности ротора. В начальный момент пуска при  $s \approx 1$  частота тока в роторе большая ( $f_1 \approx f_2$ ) и происходит вытеснение тока в верхние слои обмотки, имеющие меньшее индуктивное сопротивление (плотность тока  $\Delta$  по высоте проводника

распределяется согласно кривой 1, рис.5.4.a). Это равно-

сильно снижению эффективного сечения проводника и увеличению его активного сопротивления. В результате увеличения



активного сопротивления ротора пусковой момент

двигателя увеличивается.

При  $s \approx s_{ном}$  частота тока

в роторе мала (напри-

Рис.5.4. Разрез паза ротора (а) глубокопазного двигателя и разновидности пазов ротора двигателя нормального исполнения (б)

мер, при  $f_1=50$  Гц и  $s \approx 0,02$  частота  $f_2 = f_1 s = 1$  Гц). Вытеснение тока в этом случае не происходит; распределение его по высоте стержня (рис. 5.4.a, кривая 2) происходит равномерно. При этом уменьшается активное сопротивление

ротора и потери мощности в роторе  $\Delta P_{эл2}$ .

Одновременно увеличивается поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 2}$ , а следовательно, и сопротивление  $X_2'$  (рис.5.5).

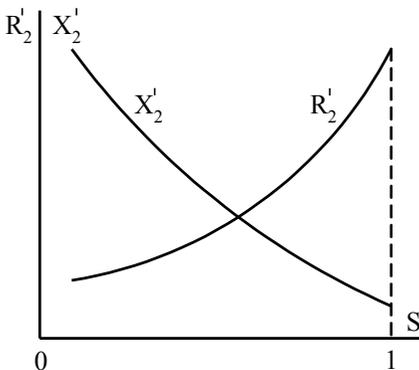


Рис. 5.5. Зависимости приведенных активного и индуктивного сопротивлений от скольжения при пуске

Явление вытеснения тока при пуске и связанное с этим увеличение активного и уменьшение индуктивного сопротивления наблюдается и у

двигателей с короткозамкнутым ротором нормального исполнения, но в меньшей степени. Чтобы усилить эффект

вытеснения тока в короткозамкнутых двигателях мощностью до 100 кВт, пазам ротора и стержням придают специальную, вытянутую в радиальном направлении форму (рис. 5.4.б). Их называют углубленными. В микродвигателях размеры пазов ротора обычно настолько малы, что эффект вытеснения тока оказывается незаметным.

Особенностью используемого в работе опыта по определению зависимости  $R_2' = f(s)$  и  $X_2' = f(s)$  является то, что изменение частоты тока ротора, происходящее при изменении скольжения, имитируется режимом заторможенного ротора при изменении частоты тока статора двигателя. Известно, что в заторможенном роторе частота тока равна частоте тока статора, и регулируя частоту тока статора, мы, тем самым изменяем частоту тока ротора.

### **Содержание отчёта**

1. Паспортные данные исследуемого двигателя, нагрузочной машины и технические характеристики используемых приборов.
2. Схема установки.
3. Таблицы измерений и расчетов.
4. Механические характеристики  $\Omega = f(M)$  для схем треугольник и звезда при частоте 50 Гц и для частот 35 и 20 Гц, построенные на одном графике.
5. Электромеханические характеристики  $\Omega = f(I_{1\phi})$  для схем треугольник и звезда при частоте 50 Гц и для частот 35 и 20 Гц, построенные на одном графике.
6. Приведённые к статору и частоте сети активные и индуктивные сопротивления ротора в зависимости от скольжения  $R_2' = f(s)$  и  $X_2' = f(s)$ , построенные на одном графике.
7. Дать оценку результатам испытаний.

### **Контрольные вопросы**

1. Разъясните назначение каждого из элементов схемы экспериментального исследования двигателя.

2. Объясните устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

3. Как влияет напряжение на механическую характеристику асинхронного двигателя?

4. Как влияет частота питающего напряжения на механическую характеристику асинхронного двигателя?

5. Как изменяется частота тока в роторе при пуске (разбеге) двигателя?

6. Как изменяется приведённое активное сопротивление  $R_2'$  ротора при пуске асинхронного двигателя?

### **РАБОТА № 11. Трёхфазная асинхронная машина в режиме индукционного регулятора и регулируемого индуктивного сопротивления.**

**Цель работы:** исследовать регулировочные свойства асинхронной машины в режимах индукционного регулятора и регулируемого индуктивного сопротивления.

#### **Содержание работы:**

1. Ознакомиться с паспортными данными асинхронной машины и обозначением выводных клемм.

2. Собрать схему испытания индукционного регулятора.

3. Снять и построить зависимость вторичного напряжения от угла поворота ротора.

4. Собрать схему испытания асинхронной машины в режиме регулируемого индуктивного сопротивления.

5. Снять и построить зависимость тока от угла поворота ротора.

6. Дать оценку результатам испытаний.

#### **Выполнение работы**

#### **Режим индукционного регулятора**

Индукционный регулятор представляет собой асинхронную машину с фазным ротором, работающую при заторможенном роторе. Применяется в качестве трехфазного регулятора напряжения. Важным достоинством является высокое качество регулируемого напряжения, его симметрия и синусоидальность.

При использовании машины в режиме индукционного регулятора, трехфазные обмотки статора и ротора электрически соединены, как показано на рис.5.6. Ротор машины заторможен червячной передачей, позволяющей плавно проворачивать его относительно статора. Одна из обмоток

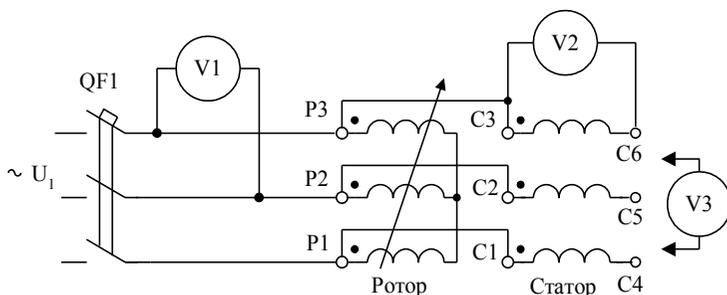


Рис.5.6. Схема испытания индукционного регулятора.

индукционного регулятора, называемая первичной или питающей, соединяется звездой и присоединяется к сети, а другая, называемая вторичной или проходной, включается между сетью и нагрузкой, требующей плавного регулирования напряжения. Поскольку у первичной обмотки достаточно иметь три вывода, а у проходной обмотки должно быть шесть выводов, в качестве первичной обычно используют обмотку ротора, а в качестве вторичной – обмотку статора.

Таким образом, трехфазное напряжение подается на обмотку ротора как на первичную. Намагничивающий ток обмотки ротора создает магнитный поток  $\Phi$ , вращающийся с частотой  $\Omega_l = f/p$  [с<sup>-1</sup>]. Если пренебречь падением напряжения в обмотке, то этот поток индуцирует в обмотках

статора и ротора фазные ЭДС: в обмотке ротора  $E_1 = U_{1\phi} = U_{1л} / \sqrt{3}$  и в обмотке статора  $E_2$ . При изменении углового положения обмотки ротора магнитный поток  $\Phi$ , ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  не изменяются по величине. Изменяется начальная фаза ЭДС  $\underline{E}_2$  (статора), благодаря чему изменяется напряжение  $\underline{U}_2 = \underline{U}_{1\phi} - \underline{E}_2$  на выходе индукционного регулятора. В некоторых случаях необходимо учитывать, что с изменением величины напряжения  $U_2$  одновременно изменяется его начальная фаза.

На лабораторном стенде вольтметр V1 измеряет линейное напряжение сети  $U_{лн}$ ; вольтметр V2 - ЭДС проходной обмотки (статора)  $E_2$ ; вольтметр V3 - выходное (вторичное) напряжение индукционного регулятора  $U_2$ .

*Проверка симметричности первичных и вторичных напряжений* производится при произвольном положении ротора. Измеряют линейные выходные напряжения на клеммах C4, C5 и C6 и сравнивают их между собой, производя качественную оценку.

*Снятие зависимости выходного напряжения от углового положения ротора  $U_2 = f(\alpha)$ .* Предварительно необходимо определить цену деления шкалы диска в электрических градусах, т.е. соотношение между электрическими и геометрическими углами. Для машины с числом пар полюсов  $p$  один геометрический градус угла поворота ротора равен  $p$  электрических градусов ( $1^\circ \text{ геом.} = p^\circ \text{ эл.}$ ).

Индукционный регулятор подключается к источнику автоматом QF1 (рис.5.6). При помощи поворотного устройства устанавливают ротор в положение, соответствующее наибольшему значению вторичного напряжения  $U_{2\text{max}}$ . В этом случае векторы напряжения  $\underline{U}_1$  и ЭДС  $\underline{E}_2$  совпадают по фазе и угол  $\alpha$ , определяемый по укрепленной на корпусе машины шкале, принимается равным нулю. Это исходная точка для проведения опыта. Изменяя угол поворота ротора  $\alpha$  в одном направлении в пределах  $0^\circ$  до  $360^\circ$  эл., с шагом в  $30^\circ$  эл., заносят в таблицу 11.1 значения угла

$\alpha$  и вторичного напряжения  $U_2$ . Затем зависимость  $U_2=f(\alpha)$  представляют в графической форме.

Таблица 11.1. Данные измерения индукционного регулятора

$U_1=\dots В; U_{1\phi}=U_1/\sqrt{3}=\dots В; E_2=\dots В.$													
$\alpha^\circ$ эл.	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
$U_2,$ В													

### Режим регулируемого индуктивного сопротивления

Асинхронная машина с заторможенным ротором может работать в качестве регулируемой индуктивной нагрузки. При этом обмотки статора и ротора соединяются последовательно или параллельно. Выбор схемы определяется номинальным напряжением обмоток и требуемым диапазоном регулирования тока. Чаще используют последовательное соединение обмоток, позволяющее получить минимально возможный ток при заданном напряжении пита-

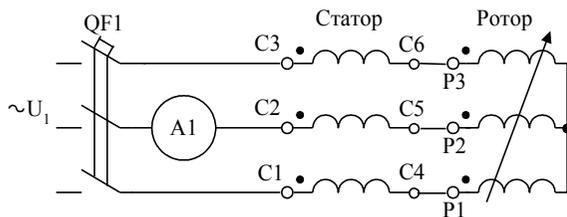


Рис.5.7. Схема испытания регулируемого индуктивного сопротивления.

тания.

Опыт проводят с использованием схемы по рис.5.7 в следующем порядке.

Предварительно устанавливают

ротор в положение, при котором в предыдущем опыте угол  $\alpha$  принимался равным нулю. Затем подключают регулятор к сети автоматом QF1 и изменяя угол поворота ротора в диапазоне от  $\alpha=0^\circ$  эл. до  $\alpha=\pm 180^\circ$  эл. с интервалом  $30^\circ$  эл.,

записывают в таблицу 11.2 значения угла  $\alpha$  и тока. По экспериментальным данным таблицы 11.2 строят зависимость  $I_1=f(\alpha)$ .

Таблица 11.2. Данные опыта регулируемого индуктивного сопротивления

$\alpha^\circ$ эл.	0	30	60	90	120	150	180	-30	-60	-90	-120	-150	-180
$I_1, A$													

### Содержание отчёта

1. Паспортные данные исследуемого регулятора и технические характеристики используемых измерительных приборов.

2. Схема экспериментальной установки.

3. Таблицы результатов измерений.

4. Зависимость вторичного напряжения от угла поворота ротора  $U_2=f(\alpha)$  в графической форме.

5. Зависимость тока от угла поворота ротора  $I_1=f(\alpha)$  в графической форме.

6. Оценка результатов испытаний.

### Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия индукционного регулятора?

2. Почему в качестве первичной обмотки обычно используют обмотку ротора, а в качестве вторичной обмотку статора?

3. Объясните принцип действия регулируемого индуктивного сопротивления?

## РАБОТА № 12. Исследование режимов работы асинхронной машины

**Цель работы:** исследовать механические и электромеханические характеристики асинхронной машины в двигательном, генераторном режимах и в режиме противовключения.

**Содержание работы:**

1. Ознакомиться с испытательной установкой и записать паспортные данные исследуемого двигателя, вспомогательной машины постоянного тока и измерительных приборов.
2. Снять и построить механические и электромеханические характеристики для режимов: двигательного, генераторного и противовключения.
3. Для заданных преподавателем точек механической характеристики построить энергетические диаграммы машины для каждого из этих режимов.
4. Дать оценку результатам испытаний.

**Выполнение работы**

Асинхронный двигатель кроме *двигательного* режима может работать в *генераторном* режиме и в режиме *противовключения*. Для исследования этих режимов используется схема рис.5.8. Машина М1 – исследуемый асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Для создания разных режимов работы машины М1 применяется вспомогательная машина постоянного тока М2. Блок управления машиной М2 обеспечивает её работу в качестве двигателя с двумя направлениями вращения (реверсирование) и регулированием скорости, а также в качестве генератора с регулируемой нагрузкой.

Для измерения токов, напряжений и активной мощности исследуемого двигателя используется комплект К-505. Скорость вращения измеряется тахометром. Момент на валу определяется по току якоря  $I_2$  тарированной нагрузочной машины М2.

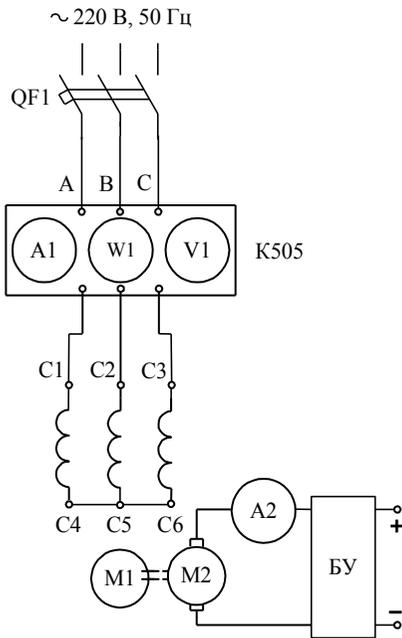


Рис.5.8. Схема исследования режимов работы асинхронного двигателя.

Испытания машины М1 необходимо проводить при пониженном напряжении. Снижение напряжения предотвращает перегрев двигателя М1 и позволяет машине М2 выступать в качестве ведущей машины в паре машин М1 и М2, задавая направление и частоту вращения общего вала. Для асинхронного двигателя с напряжением 380/220 В, Y/Δ,

обмотку статора соединяют звездой и подключают к сети 220 В. Это снижает напряжение на фазных обмотках в  $\sqrt{3}$  раз по сравнению с номинальным.

Перед проведением опытов необходимо определить направление и частоту вращения магнитного поля в исследуемой асинхронной машине. Для этого производят пробное включение машины М1 при холостом ходе и определяют направление вращения ротора, которое совпадает с направлением вращения магнитного поля. Частота вращения ротора  $\Omega_2$  при холостом ходе близка к частоте вращения поля  $\Omega_1$ . Частоту вращения поля определяют округлением частоты вращения ротора до стандартной частоты вращения ротора поля, которая для частоты тока 50 Гц при числе пар полюсов  $p = 1; 2; 3; 4; 5$  соответственно равна  $\Omega_1 = 3000, 1500, 1000, 750, 600$  об/мин.

Направление вращения магнитного поля машины М1 сопоставляют с указателями направлений вращения нагру-

зочной машины М2 для определения согласного и встречного включения обеих машин.

### Механические характеристики $\Omega_2=f(M)$

Их целесообразно снимать в такой последовательности: двигательный режим, генераторный режим (рекуперативное торможение) и режим противовключения. Одновременно с механическими характеристиками снимаются данные для построения электромеханических характеристик  $\Omega_2=f(I_1)$ .

При исследовании *двигательного* режима асинхронной машины М1 ( $\Omega_1 > \Omega_2$ ) нагрузочная машина М2 должна работать в режиме торможения вала, т.е. в генераторном режиме. Опыт начинают с режима холостого хода ( $I_2=0$ ). Результаты измерений заносят в таблицу 12.1.

Таблица 12.1. Результаты испытаний асинхронной машины

№ п/п	Измерения					Расчет			По указ. препод.	
	U <sub>1</sub> В	I <sub>1</sub> А	P <sub>1</sub> Вт	n <sub>2</sub> об/мин	I <sub>2</sub> А	$\Omega_2$ , рад/с	M, Нм	s	P <sub>2</sub> Вт	$\Delta P_{\Sigma}$ Вт
а) Двигательный режим										
1										
...										
7										
б) Генераторный режим										
1										
...										
6										
в) Режим противовключения										
1										
...										
4										

Затем, используя приборы управления машины М2, нагружают вал и последовательно увеличивают нагрузку, снижая тем самым скорость до минимальной, близкой к

нулю. Обязательно фиксируются измерения при максимальном значении тока  $I_2$ .

В области малых частот вращения ротора опыт нужно выполнять быстро и контролировать нагрев машины М1.

*Генераторный* режим машины М1 имеет место при частоте вращения ротора, превышающей частоту вращения магнитного поля  $\Omega_2 > \Omega_1$ . Частота вращения поля не изменяется с изменением режима работы машины; изменяется лишь частота вращения ротора. Чтобы ротор машины М1 опережал поле, необходимо нагрузочную машину М2 перевести в двигательный режим при согласном направлении вращения с полем машины М1. Вначале производят измерения при равенстве частот вращения поля и ротора  $\Omega_2 = \Omega_1$  ( $s=0$ ). Этот режим является граничным между двигательным и генераторным режимом и называется режимом *идеального холостого хода*. Затем увеличивают частоту вращения ротора, производят измерения переменных величин и результаты измерений заносят в таблицу 12.1.б. При этом необходимо обратить внимание на направление (знак) активной мощности  $P_1$  и записывать мощность в таблицу с соответствующим знаком.

Режим *противовключения* имеет место при вращении ротора в сторону, противоположную направлению вращения поля. Для получения этого режима необходимо перевести нагрузочную машину М2 в двигательный режим с встречным направлением вращения по отношению к полю машины М1 (напомним, что направление вращения поля машины М1 во всех выше проведённых опытах не меняется).

Проведение опыта начинают с нагружения вала машины М1 до её полной остановки  $\Omega_2 = 0$  ( $s=1$ ). Этот режим ( $\Omega_2 = 0$ ) называется *режимом короткого замыкания* асинхронного двигателя и является граничным между режимами двигательным и противовключения. Показания измерительных приборов записывают в таблицу 12.1.в.

первой строкой. В режиме короткого замыкания определяют пусковой момент и пусковой ток двигателя. Далее опыт проводится при последовательном увеличении частоты вращения. При этом частоту вращения машины записывают в таблицу со знаком «минус», показывающим, что направление вращения ротора машины противоположно направлению вращения поля.

Момент  $M$  определяют по значению тока  $I_2$ , используя тарифовочный график  $M=f(I_2)$ .

Расчет частоты вращения  $\Omega_2$  в рад/с при известной частоте вращения  $n_2$  в об/мин., производится по формуле:

$$\Omega_2 = \frac{\pi n_2}{30} \text{ [рад/с]},$$

скольжение  $s$  машины М1 рассчитывается по формуле:

$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1}.$$

### **Построение упрощенных энергетических диаграмм**

Расчет мощности  $P_2$  на валу машины М1 и расчет суммарных потерь энергии в ней  $\Delta P_\Sigma$  производят для отдельных строк таблицы 12.1, указанных преподавателем индивидуально для каждого студента. Эти расчеты выполняют для построения упрощенных энергетических диаграмм. Диаграммы строятся для всех исследуемых режимов работы машины (рис.5.9).

Переменные  $P_2$  и  $\Delta P_\Sigma$  вычисляются по формулам:

$$P_2 = M\Omega;$$

$$\Delta P_\Sigma = |3P_\Phi - P_2|.$$

### **Оценка результатов испытаний**

Механические характеристики машины М1 для разных режимов строятся совмещенными на одной координатной плоскости  $\Omega_2=f(M)$  в виде непрерывной линии, занимающей первый, второй и четвертый квадранты. На графике следует сделать поясняющие надписи, указывающие режимы работы машины: генераторный, двигательный, идеального холостого хода и короткого замыкания.

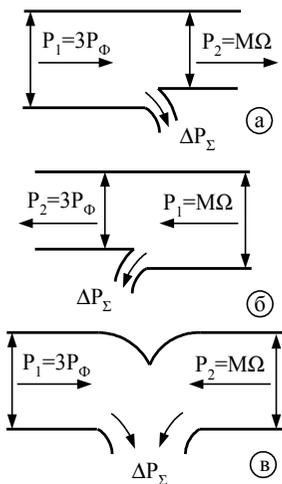


Рис.5.9. Энергетические диаграммы асинхронного двигателя: а) двигательный режим; б) генераторный режим; в) противовключение

Электромеханические характеристики машины М1 для всех режимов также строят совмещенными и занимают первый и четвертый квадранты координатной плоскости  $\Omega_2=f(I_1)$ . Энергетические диаграммы показывают направления потоков мощности и эти направления разные у разных режимов работы машины. Следует обратить особое внимание на то, что в режиме противовключения (рис. 5.9.в) вся электрическая и вся механическая мощность преобразуются в тепло (потери), в результате чего машина интенсивно нагревается. Длительная работа машины в режиме противовключения допускается только при принятии специальных мер предотвращения перегрева. В лабораторной работе такой мерой безопасности является понижение напряжения питания машины.

## Содержание отчёта

1. Паспортные данные асинхронного двигателя, машины постоянного тока и технические характеристики используемых измерительных приборов.
2. Схема испытательной установки.
3. Таблицы результатов измерений и расчётов.
4. Механические характеристики асинхронной машины в двигательном, генераторном и режиме противовключения.
5. Электромеханические характеристики для двигательного, генераторного и режима противовключения.
6. Энергетические диаграммы.
7. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Как перевести асинхронную машину из двигательного режима в рекуперативный (генераторный) режим?
2. В каких границах изменяется скольжение при рекуперативном режиме?
3. Как осуществить режим противовключения асинхронного двигателя?
4. Какое значение имеет скольжение в режиме противовключения?
5. Почему при снятии режима противовключения желательно уменьшать напряжение на статоре?
6. Почему при равенстве скоростей вращения поля статора и ротора ток в статоре не равен нулю?
7. Почему в режиме противовключения двигатель сильно нагревается?

## **РАБОТА № 13. Исследование однофазного асинхронного двигателя**

**Цель работы:** исследовать рабочие и пусковые свойства однофазного асинхронного двигателя.

### **Содержание работы:**

1. Ознакомиться с конструкцией и паспортными данными однофазного асинхронного двигателя.
2. Для схемы конденсаторного однофазного двигателя снять рабочие характеристики.
3. Определить пусковой момент двигателя при использовании различных фазосдвигающих элементов.
4. Дать оценку полученных результатов.

### **Предварительные замечания**

Однофазные асинхронные двигатели получают питание от однофазных источников переменного тока. Ротор двигателя обычно выполняется короткозамкнутым в виде беличьей клетки. На статоре размещается две обмотки: рабочая и пусковая.

Чтобы однофазный асинхронный двигатель имел пусковой момент, необходимо создать в нём вращающееся магнитное поле. Этой цели служит пусковая обмотка, смещенная в пространстве машины относительно главной (рабочей) обмотки на половину полюсного деления. Главная обмотка обычно занимает  $1/2 \dots 2/3$  числа пазов статора. В остальных пазах размещают пусковую обмотку. Для обеспечения сдвига фаз токов этих обмоток, в цепь пусковой обмотки включают фазосдвигающее устройство. Обычно это конденсатор или резистор (активное сопротивление). Однофазные асинхронные двигатели с вспомогательной обмоткой на статоре можно подразделить на следующие типы:

- 1) конденсаторные – с постоянно включенным конденсатором в цепь пусковой обмотки;
- 2) с пусковым конденсатором – с включением конденсатора в цепь пусковой обмотки лишь на время пуска двигателя;

3) с реостатным пуском – с включением добавочного активного сопротивления в цепь пусковой обмотки на время пуска;

4) двигатели с расщепленными или экранированными полюсами, у которых фазосдвигающим устройством является короткозамкнутый виток, охватывающий часть полюса. Такие двигатели имеют сосредоточенную статорную обмотку.

Для улучшения пусковых свойств конденсаторного двигателя иногда на время пуска параллельно рабочему конденсатору включают пусковой конденсатор, который после разгона двигателя отключается.

## Выполнение работы

Перед началом испытаний следует ознакомиться с

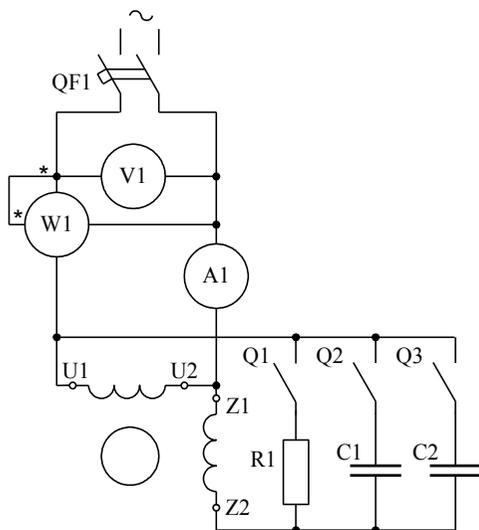


Рис.5.10. Схема экспериментального исследования однофазного асинхронного двигателя

паспортными данными двигателя и рассчитать номинальный момент  $M_H = P_{2H}/\Omega_H$ , где  $P_{2H}$  - номинальная мощность однофазного двигателя, Вт;  $\Omega_H$  - номинальная угловая скорость вращения двигателя, рад/с.

Исследования однофазного асинхронного двигателя проводятся по схеме рис.5.10. Главной (рабочей) обмоткой является

обмотка  $U1-U2$ , вспомогательной (пусковой) обмотка  $Z1-Z2$ . С помощью выключателей  $Q1, Q2, Q3$  можно выбирать разные пусковые элементы: активное сопротивление  $R1$ , рабочую ёмкость  $C1$ , пусковую ёмкость  $C2$  соответственно. Нагрузка двигателя и измерение вращающего момента производится с помощью электромагнитного тормоза. Частота вращения двигателя измеряется строботометром или иным способом, описанным в разделе 1.8.

Для изменения направления вращения однофазного асинхронного двигателя необходимо поменять местами выводные концы рабочей или пусковой обмотки.

### Рабочие характеристики

Рабочие характеристики однофазного двигателя представляют собой зависимость переменных величин от момента на валу при  $U=U_H$ :  $I_1, P_1, P_2, n, \cos\varphi, \eta = f(M)$ . Снимаются при постоянно включенном конденсаторе  $C1$  (выключатель  $Q2$  замкнут).

Автоматом  $QF1$ напряжение подаётся на схему. С помощью электромагнитного тормоза момент на валу двигателя изменяется от нуля (холостой ход) до максимального (опрокидывающего) момента, соответствующего максимальному отклонению стрелки тормоза. Опытные и расчетные данные для исследования рабочих характеристик двигателя сводятся в таблицу 13.1.

Таблица 13.1. Рабочие характеристики однофазного двигателя.

№ п.п	Опытные данные					Расчётные величины			
	$U_1$	$I_1$	$P_1$	$n$	$M$	$P_2$	$\Omega$	$\cos\varphi$	$\eta$
	В	А	Вт	об/мин	Нм	Вт	рад/с	-	-

Расчёты производятся по следующим формулам:

частота вращения:  $\Omega = \pi n/30$ , рад/с;

мощность на валу:  $P_2 = M\Omega$ , Вт;

коэффициент полезного действия:  $\eta = P_2/P_1$ ;  
 коэффициент мощности:  $\cos\varphi = P_1/(U_1I_1)$ .

### Пуск однофазного двигателя

Пусковые свойства однофазного двигателя характеризуются его пусковым моментом  $M_{\text{п}}$  и пусковым током  $I_{\text{п}}$ . Для двигателей малой мощности, при условии быстрого проведения опыта, можно измерить  $M_{\text{п}}$  и  $I_{\text{п}}$  при номинальном напряжении.

Эксперимент по определению пусковых свойств однофазного двигателя первоначально проводится при подаче номинального напряжения на рабочую обмотку при отключённых выключателях Q1, Q2, Q3. Пусковой момент равен нулю, стрелка электромагнитного тормоза не отклоняется.

После этого в цепь пусковой обмотки включается активное сопротивление R1 (выключатель Q1 включается) и включением автомата QF1 на двигатель подаётся напряжение. По отклонению стрелки электромагнитного тормоза определяют величину пускового момента  $M_{\text{п}}$ , а амперметром А1 измеряют величину пускового тока  $I_{\text{п}}$ . Значения измеренных величин заносят в таблицу 13.2.

Таблица 13.2. Пусковые свойства однофазного двигателя.

Фазос- двигающий элемент	$U_1$ В	$I_{\text{п}}$ А	$M_{\text{п}}$ Нм	$I_{\text{п}}/I_{\text{н}}$	$M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$
Активное сопротивле- ние R1=					
Рабочая ём- кость C1=					
Рабочая и пусковая ём- кости C1+C2=					

Следующий эксперимент по определению пусковых свойств проводится при отключенном выключателе Q1 и включенном Q2.

Для исследования влияния пускового конденсатора C2 на  $M_{\Pi}$  и  $I_{\Pi}$  включаются выключатели Q3 и Q2. Данные измерений заносятся в таблицу 13.2.

Для оценки и сравнения различных пусковых элементов, вычисляется кратность пускового момента  $k_M = M_{\Pi}/M_H$  и кратность пускового тока  $k_I = I_{\Pi}/I_H$ , где  $M_H$  и  $I_H$  – номинальные данные однофазного асинхронного двигателя.

### **Содержание отчёта**

1. Паспортные данные однофазного асинхронного двигателя и технические характеристики используемых приборов.

2. Схема экспериментальной установки.

3. Таблицы результатов измерений.

4. Рабочие характеристики однофазного асинхронного двигателя.

5. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните назначение всех элементов, входящих в схему экспериментального исследования однофазного асинхронного двигателя.

2. Как изменить направление вращения асинхронного конденсаторного двигателя?

3. При каком пусковом элементе в однофазном асинхронном двигателе пусковой ток имеет меньшую величину при одинаковой величине пускового момента?

4. Какая схема однофазного асинхронного двигателя обеспечивает наибольший пусковой момент?

5. Чем отличается однофазный двигатель от конденсаторного?

## ГЛАВА ШЕСТАЯ

### СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

#### **РАБОТА № 14. Исследование трёхфазного синхронного генератора**

**Цель работы:** изучить конструкцию синхронного генератора, экспериментальное определение основных характеристик автономного синхронного генератора при независимом возбуждении.

#### **Содержание работы:**

1. Ознакомиться с конструкцией синхронного генератора по демонстрационным макетам.
2. Ознакомиться с электрооборудованием испытательной установки и записать номинальные данные генератора, приводного электродвигателя и измерительных приборов.
3. Собрать схему экспериментальной установки по рис.6.1.
4. Выполнить опыты по определению основных характеристик синхронного генератора: холостого хода, индукционной нагрузочной, внешней, регулировочной, короткого замыкания. Построить указанные характеристики по экспериментальным данным.
5. По характеристикам холостого хода, индукционной нагрузочной и трехфазного короткого замыкания определить параметры реактивного треугольника, сопротивление Потье  $x_p$ , намагничивающую силу реакции якоря  $F_a$ , а также индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора  $x_\sigma$ .
6. Для заданной индивидуально каждому студенту точки регулировочной характеристики построить векторную диаграмму ЭМДС.
7. Дать оценку результатам испытаний.

## Выполнение работы

Демонстрационный макет представляет собой разобранный синхронный генератор или разрез генератора. Для генератора нормального исполнения статор составляют корпус (станина), в котором закреплен шихтованный сердечник. В пазах сердечника размещена трехфазная распределенная обмотка. Явнополюсный ротор (индуктор) имеет вал, напрессованный на него шихтованный сердечник, полюсы с полюсными башмаками и обмоткой возбуждения. Постоянный ток к обмотке возбуждения передается от возбuditеля через вращающиеся контактные кольца и неподвижные щетки. Конструктивная схема генератора может быть обращенной: с неподвижным индуктором и трехфазной распределенной обмоткой на роторе.

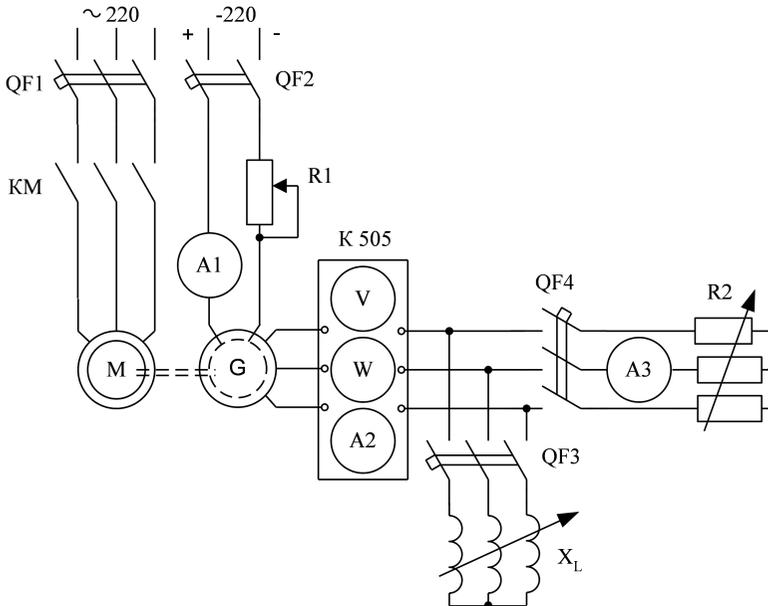


Рис. 6.1. Схема исследования синхронного генератора

Схема лабораторной испытательной установки представлена на рис.6.1.

Генератор G приводится во вращение асинхронным короткозамкнутым двигателем M, который обеспечивает вращение генератора с постоянной частотой вращения, практически равной номинальной. Управление двигателем M осуществляется автоматическим выключателем QF1 и коммутатором KM для прямого или ступенчатого пуска (переключением со «звезды» на «треугольник»). Схема управления коммутатором KM предварительно собрана. Первоначальный пуск приводного двигателя производится включением автоматического выключателя QF1 и последующим нажатием кнопки «Пуск» управления магнитного пускателя KM (при ступенчатом пуске последовательно нажимают две кнопки «Пуск 1» и «Пуск 2»). Остановка и последующие пуски двигателя производятся нажатием кнопок «Стоп» и «Пуск». При окончании опытов выключается автоматический выключатель QF1.

### **Характеристика холостого хода**

Она представляет собой зависимость ЭДС генератора  $E_0$  (вольтметр комплекта К 505) от тока возбуждения  $I_1$  при отсутствии тока статора и при постоянной скорости генератора т.е.  $E_0=f(I_1)$  при  $I_2=0$ ,  $\Omega=const$ .

Опыт проводится в следующей последовательности.

Включается автомат QF1, и при отключенных автоматах QF2, QF3, QF4 нажатием кнопки "Пуск" (или двух кнопок) генератор приводится во вращение. Переносным вольтметром измеряется остаточное напряжение на трехфазной статорной обмотке генератора. Если это напряжение имеет величину более 5 В, то целесообразно размагнитить генератор, что делают в присутствии преподавателя. Затем, установив максимальное сопротивление R1 в цепи возбуждения, включают автомат QF2. Монотонно увеличивая ток возбуждения, снимают восходящую ветвь характеристики холостого хода. Ток возбуждения увеличивают до значения ЭДС 1,2-1,3 от номинального напряже-

ния генератора. Далее, монотонно уменьшая ток возбуждения, снимают нисходящую ветвь характеристики холостого хода. В конце опыта отключают автомат QF2 ( $I_1=0$ ) и измеряют остаточное напряжение на трехфазной обмотке.

*Изменять ток возбуждения нужно плавно, небольшими ступенями и только в одном направлении: только увеличивать при снятии восходящей ветви и только уменьшать при снятии нисходящей ветви. При невыполнении этого условия, вследствие влияния гистерезиса, характеристика окажется искаженной.*

Для построения характеристики холостого хода достаточно иметь 7-8 точек на каждую ветвь. Показания приборов заносятся в таблицу 14.1.

Таблица 14.1. Характеристика холостого хода

восходящая ветвь								
$I_1, A$	0							
$E_0, B$							$U=U_n$	
нисходящая ветвь								
$I_1, A$								
$E_0, B$	$U=U_n$							0

Характеристика холостого хода строится в физических единицах. За практическую характеристику принимается средняя кривая, проведенная между восходящей и нисходящей ветвями.

### **Индукционная нагрузочная характеристика**

Она представляет собой зависимость напряжения генератора  $U$  от тока возбуждения  $I_1$  при номинальном или заданном преподавателем токе генератора ( $I_2=I_n$ ) и  $\cos\varphi=0$  (ток индуктивный) т.е.  $U = f(I_1)$  при  $\cos\varphi=0$ ,  $I_2 = const$ ,  $\Omega = const$ .

Она является частным случаем нагрузочной характеристики, которая определяется для произвольного значения коэффициента мощности.

Опыт проводится в следующей последовательности. Генератор при холостом ходе возбуждается до напряжения 1,1-1,3 от номинального. После этого автоматом QF3 включается регулируемая индуктивная нагрузка  $X_L$ . Изменяя индуктивную нагрузку, устанавливают номинальный ток генератора. Это первая точка индукционной нагрузочной характеристики. Далее, уменьшая нагрузку  $X_L$ , поддерживая ток генератора  $I_2$  неизменным соответствующим регулированием тока возбуждения  $I_1$  снижают напряжение генератора до нуля, фиксируя показания в таблицу 14.2. Для построения характеристики достаточно иметь 5-6 точек.

Таблица 14.2. Индукционная нагрузочная характеристика

$I_1, A$							
$U_{\phi}, B$	$U > U_n$	$U = U_n$					
$I_2, A$							

### Внешняя характеристика

Внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения генератора  $U$  от тока нагрузки  $I_2$  при постоянных токе возбуждения и коэффициенте мощности, т.е.  $U=f(I_2)$  при  $\cos\varphi=const$ ,  $I_1=const$ ,  $\Omega=const$ . Опыт проводят при активной нагрузке ( $\cos\varphi=1$ ) и активно-индуктивной, при коэффициенте мощности, заданном преподавателем.

Порядок действий следующий. Сначала возбуждают генератор при холостом ходе до номинального напряжения. Это первая точка характеристики. Затем подключают к генератору нагрузку включением автоматов QF3 и QF4 и при неизменном токе возбуждения увеличивают ток нагрузки до номинального значения, контролируя постоянство коэффициента мощности. Нагрузку с  $\cos\varphi=1$  создают реостатом R2, нагрузку с  $\cos\varphi < 1$  – совместно реостатом R2 и индуктивным сопротивлением  $X_L$ . Контроль за постоянством  $\cos\varphi$  осуществляется путем проверки заданного

отношения активной составляющей тока нагрузки  $I_3$  к общему току  $I_2$  ( $I_3/I_2 = \cos\varphi = \text{const}$ ). Показания приборов для 5-6 точек заносятся в таблицу 14.3.

Таблица 14.3. Внешняя характеристика

а) активная нагрузка $\cos\varphi=1$						
$I_2, A$	0				$I=I_n$	
$U_{\phi}, B$	$U=U_{нф}$					
$I_1, A$						
б) активно-индуктивная нагрузка						
$I_2, A$	0				$I=I_n$	
$I_3, A$	0					
$U_{\phi}, B$	$U=U_{нф}$					
$I_1, A$						
$\cos\varphi$						

### Регулировочная характеристика

Она представляет собой зависимость тока возбуждения  $I_1$  от тока нагрузки  $I_2$  при постоянных напряжении генератора  $U$  и коэффициенте мощности ( $\cos\varphi$ ) нагрузки, т.е.  $I_1 = f(I_2)$  при  $\cos\varphi = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$ ,  $\Omega = \text{const}$ .

Опыт проводится следующим образом. При холостом ходе устанавливают номинальное напряжение генератора. Это первая точка характеристики. Далее включаются автоматы QF3 и QF4 и, увеличивая ток нагрузки, изменением тока возбуждения поддерживают номинальное напряжение. Нагрузку увеличивают до номинального тока генератора. Коэффициент мощности поддерживают постоянным так же, как и при снятии внешней характеристики. Показания приборов (5-6 точек одного  $\cos\varphi$ ) заносят в таблицу 14.4.

Таблица 14.4. Регулировочная характеристика

$I_1, A$						
----------	--	--	--	--	--	--

$I_2, A$						
$I_3, A$						
$U, B$						
$\cos\varphi$						

### Характеристика короткого замыкания

Она представляет собой зависимость тока в замкнутой накоротко обмотке статора  $I_{2к}$  от тока возбуждения  $I_1$  при  $U=0$  (признак к.з.), т.е.  $I_{2к}=f(I_1)$  при  $U=0, \Omega=const$ .

Опыт проводится следующим образом. При отключенных автоматах QF1 и QF2 выходные клеммы трех фаз измерительного комплекта закорачиваются и устанавливается максимальное сопротивление R1 в цепи возбуждения. Затем генератор приводится во вращение с номинальной скоростью. Снимается первая точка характеристики. Далее включается автомат QF2 и, изменяя ток возбуждения генератора, снимают характеристику  $I_{2к}=f(I_1)$  трехфазного короткого замыкания. Ток к.з. не должен превышать 1,2-1,3 номинального тока статора. Одно из измерений должно соответствовать току  $I_{2к} = I_{2н}$ . Для построения характеристик достаточно снять для каждой характеристики 3-5 точек. Показания приборов заносятся в таблицу 14.5.

Таблица 14.5. Опытные данные короткого замыкания.

Трехфазное к.з.	$I_1, A$	0				
	$I_{2к}, A$				$I_{2к}= I_{н}$	
Двухфазное к.з.	$I_1, A$	0				
	$I_{2к}, A$				$I_{2к}= I_{н}$	

Характеристика двухфазного короткого замыкания снимается по аналогичной методике, но на измерительном комплекте накоротко замыкаются две фазы.

### Обработка результатов экспериментов

1. При построении характеристик генератора рекомендуется следующая компоновка их по отдельным рисункам. Характеристика холостого хода и нагрузочная индукционная строятся в одной координатной плоскости. Также совмещаются на одном рисунке характеристики трехфазного и двухфазного короткого замыкания. Регулировочные и внешние характеристики совмещаются для разных значений  $\cos\phi$ . Все характеристики строятся в именованных (физических) единицах.

2. Экспериментальные данные опытов холостого хода и короткого замыкания позволяют определить важную для синхронных машин величину – отношение короткого замыкания (ОКЗ), которая, согласно ГОСТу, представляет собой отношение тока короткого замыкания  $I_k$  при возбуждении, соответствующем номинальному напряжению при холостом ходе, к номинальному току статора. Численно его значение равно отношению

$$OKЗ = I_{BOH} / I_{BKH},$$

где  $I_{BOH}$  – значение тока возбуждения, соответствующее номинальному напряжению генератора в опыте холостого хода;

$I_{BKH}$  – ток возбуждения генератора в опыте трехфазного короткого замыкания, соответствующий номинальному току статора.

3. Внешние характеристики позволяют приблизительно определить изменение напряжения при сбросе нагрузки генератора  $\Delta U$

$$\Delta U \% = \frac{U_0 - U}{U} 100,$$

где  $U_0$  – напряжение при  $I=0$ ,  $U$  – напряжение при  $I=I_n$ .

4. Изменение тока возбуждения  $\Delta I_s$  определяют из регулировочной характеристики:

$$\Delta I_s \% = \frac{I_{BH} - I_{BO}}{I_{BO}} 100,$$

где  $I_{BH}$  – ток возбуждения генератора при номинальном токе;

$I_{B0}$  – при токе нагрузки  $I=0$ .

5. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора  $x_\sigma$  и МДС реакции якоря  $F_a$  определяются из реактивного треугольника, построенного на основании характеристик холостого хода, индукционной нагрузочной и трехфазного короткого замыкания.

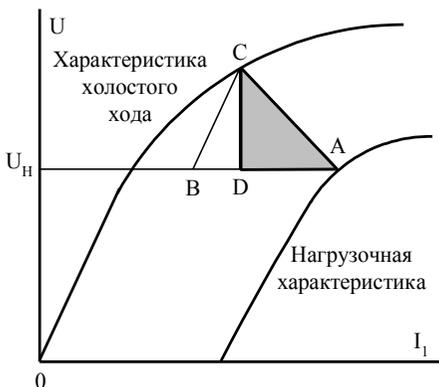


Рис.6.2 Построение реактивного треугольника

Для построения реактивного треугольника (рис.6.2) на индукционной нагрузочной характеристике откладывается точка **А**, соответствующая номинальному напряжению генератора. Через точку **А** проводится горизонталь, на которой откладывается точка **В**. Отрезок **АВ** равен току возбуждения при

номинальном токе из характеристики трехфазного короткого замыкания. Через точку **В** проводят отрезок прямой, параллельный прямолинейной начальной части характеристики холостого хода. При пересечении этого отрезка характеристики холостого хода получают точку **С**. Из точки **С** опускают перпендикуляр **СД** на линию **АВ** (точка **Д** на линии **АВ**) и строят реактивный треугольник **АДС**. Сторона **СД** в масштабе напряжения представляет падение напряжения в индуктивном сопротивлении Потье  $x_p$ . Разделив напряжение, соответствующее длине отрезка **СД**, на ток при котором снята индукционная нагрузочная характеристика, получим значение  $x_p$ , выраженное в именованных единицах (Ом). Сторона **АД** в масштабе тока возбуждения

есть МДС реакции якоря  $F_a$ , которая для явнополюсной машины равна продольной реакции  $F_{ad}$ .

Для неявнополюсных машин индуктивное сопротивление рассеяния трехфазной обмотки  $x_\sigma = x_p$ , для явнополюсных машин  $x_\sigma = x_p/1,2$ .

6. Векторная диаграмма ЭМДС (Потье) (рис.6.3) строится для номинального напряжения генератора  $U_n$ , заданного преподавателем тока нагрузки  $I$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$ .

Диаграмму начинают строить, откладывая вектор напряжения генератора  $\underline{U}_n$ . Под углом  $\varphi$  откладывается вектор тока генератора  $\underline{I}$ . Активным сопротивлением обмотки статора можно пренебречь. Из конца вектора напряжения под прямым углом к вектору тока в сторону опережения откладывается вектор падения напряжения в сопротивле-

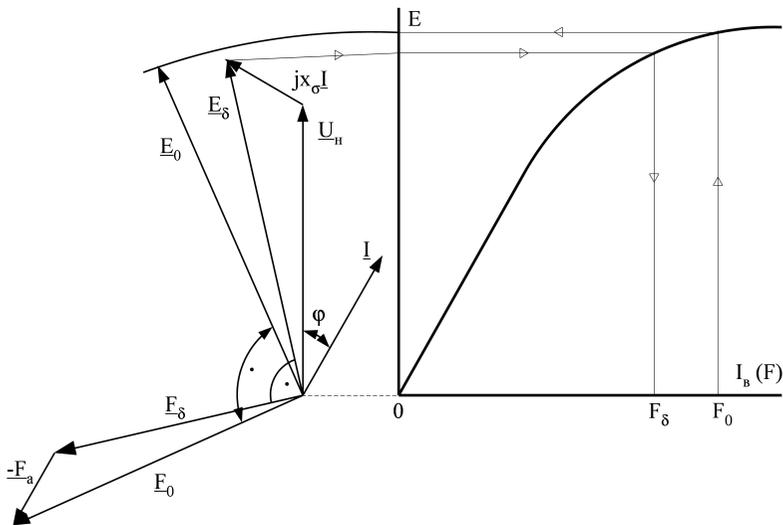


Рис.6.3. Построение диаграммы ЭМДС синхронного генератора.

нии рассеяния статорной обмотки  $jx_\sigma I$ , в результате получают вектор ЭДС генератора от результирующего магнитного потока  $\underline{E}_\delta$ .

По величине  $\underline{E}_\delta$  из характеристики холостого хода следует определить результирующую МДС машины  $F_\delta$  (приведенную к току возбуждения), которую откладывают перпендикулярно вектору  $\underline{E}_\delta$  в сторону опережения.

Поскольку результирующая МДС машины  $F_\delta$  представляет сумму МДС возбуждения  $F_0$  и МДС реакции якоря  $F_a$ , то для определения  $F_0$  из  $F_\delta$  необходимо вычесть  $F_a$ , совпадающую по фазе с током нагрузки  $I$ , или, выражаясь иначе, сложить векторы  $\underline{E}_\delta$  и  $-\underline{F}_a$ . Магнитодвижущая сила реакции якоря  $F_a$  в масштабе тока возбуждения определяется из реактивного треугольника, пропорциональным изменением его величины на отношение  $I/I_{ун}$  (заданного тока генератора по векторной диаграмме  $I$  к току индукционной нагрузочной характеристики  $I_{ун}$ ), т.е.

$$F_a = F_{арт} \frac{I}{I_{ун}},$$

где  $F_{арт}$  - МДС реакции якоря из реактивного треугольника (отрезок **AD** на рис.6.2 в масштабе тока возбуждения).

В результате сложения векторов  $\underline{E}_\delta$  и  $-\underline{F}_a$  определяется величина и направление вектора МДС возбуждения  $F_0$ . Перпендикулярно вектору  $\underline{E}_0$  откладывается линия вектора ЭДС возбуждения  $E_0$ . Длина вектора  $E_0$  определяется по характеристике холостого хода как величина ЭДС трехфазной обмотки, соответствующая току возбуждения, равному  $F_0$ .

### Содержание отчёта

1. Паспортные данные генератора, приводного двигателя и технические характеристики используемых измерительных приборов.

2. Схема установки.

3. Таблицы результатов измерений.

4. Характеристики холостого хода и нагрузочная индукционная построенные в одной координатной плоскости. Совмещены на одном графике характеристики трехфазного и двухфазного короткого замыкания. Регулировочные и

внешние характеристики совмещаются для разных значений  $\cos\varphi$ . Все характеристики строятся в именованных (физических) единицах.

5. По характеристикам холостого хода, индукционной нагрузочной и трехфазного короткого замыкания определяются параметры реактивного треугольника, сопротивление Потье  $x_p$ , намагничивающая сила реакции якоря  $F_a$ , а также индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора  $x_\sigma$ .

6. Векторная диаграмма ЭМДС для заданной индивидуально каждому студенту точки регулировочной характеристики.

7. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Объясните конструкцию явнополюсного синхронного генератора.

2. Почему при снятии характеристики холостого хода синхронного генератора изменение тока возбуждения производят плавно и только в одном направлении?

3. Почему в синхронном генераторе ток 2-х фазного короткого замыкания больше тока 3-х фазного при одном и том же токе возбуждения?

4. Почему при изменении тока статора синхронного генератора необходимо регулировать ток возбуждения?

5. Можно ли регулировать напряжение синхронного генератора изменением частоты вращения ротора?

## **РАБОТА №15. Опытное определение параметров синхронной машины**

**Цель работы:** Освоение методов опытного определения параметров синхронной машины.

**Содержание работы:**

1. Ознакомиться с конструкцией синхронной машины и ее паспортными данными.
2. Измерить сопротивление постоянному току обмоток статора и возбуждения.
3. Определить синхронные индуктивные сопротивления по продольной  $x_d$  и поперечной  $x_q$  осям.
4. Определить сопротивления обратной последовательности.
5. Определить переходные индуктивные сопротивления обмоток статора по продольной  $x_d'$  и поперечной  $x_q'$  осям.
6. По найденному значению переходного индуктивного сопротивления по продольной оси  $x_d'$  рассчитать ударный ток короткого замыкания генератора.
7. Дать оценку результатам испытаний и расчета.

### **Выполнение работы**

Знакомясь с конструкцией синхронной машины, необходимо установить расположение обмоток возбуждения и трехфазной обмотки, ознакомиться с конструкцией обмоток ротора и статора, магнитных сердечников и других участков магнитной цепи, устройством токосъема на роторе, возбуждителя заводского исполнения (при его наличии), выводного устройства и маркировкой выводов обмоток.

В отчете привести паспортные данные исследуемой синхронной машины и приводного двигателя.

### **Измерение омических сопротивлений обмоток статора и возбуждения**

Сопротивление обмоток статора и возбуждения постоянному току определяется методом амперметра и вольтметра по методике, изложенной в главе 1.6.

## Определение синхронных индуктивных сопротивлений по продольной $x_d$ и поперечной $x_q$ осям

Синхронные индуктивные сопротивления по продольной  $x_d$  и поперечной  $x_q$  осям определяются методом скольжения.

Для проведения опыта собирается схема по рис.6.4. Схема включения приводного двигателя М собрана предвари-

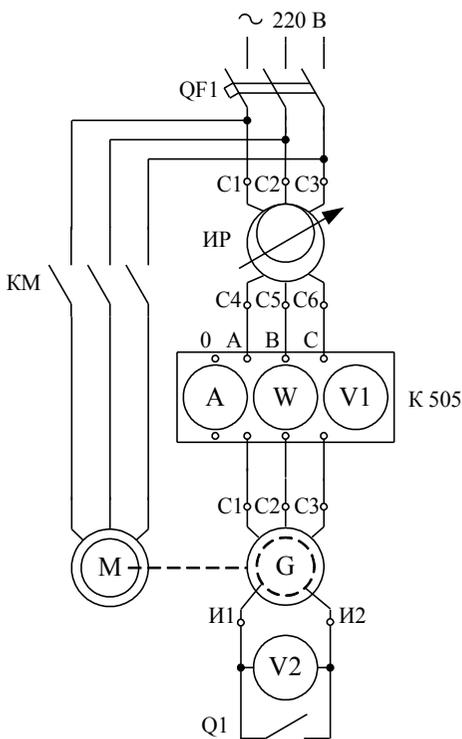


Рис. 6.4. Схема для опытного определения индуктивных сопротивлений прямой ( $X_d$ ,  $X_q$ ) и обратной ( $X_2$ ) последовательностей

тельно. Двигатель М включается нажатием кнопки "Пуск" управления магнитным пускателем КМ. Сборка схемы генератора G производится при отключенном приводном двигателе в следующем порядке.

Сначала собирается электрическая цепь индукционного регулятора ИР и измерительного комплекта. После разрешения преподавателя индукционный регулятор автоматически выключателем QF1 подключается к сети. Производится тарировка индукционного регулятора, т.е. установка ротора в

положение, соответствующее минимальному выходному

напряжению. Контроль напряжения производится по вольтметру измерительного комплекта К505. Положение, соответствующее минимальному выходному напряжению, фиксируется на указателе угла поворота ротора.

После установки индукционного регулятора на минимальное выходное напряжение автомат QF1 отключается и заканчивается сборка схемы рис.6.4. Обмотка статора синхронной машины соединяется звездой.

Наладка схемы заключается в обеспечении совпадения направления вращения ротора и магнитного поля трехфазной обмотки синхронной машины при мало отличающейся их скоростей вращения. Для этого включением автомата QF1 и нажатием кнопки "Пуск" машина приводится во вращение. При разомкнутом рубильнике Q1 на трехфазную обмотку подается минимальное напряжение. По показаниям вольтметра V2, подключенного к обмотке возбуждения, судят о совпадении направления вращения ротора и магнитного поля статора. При совпадающих направлениях вращения вольтметр V2 фиксирует малое напряжение (близкое к нулю). При противоположном направлении вращения ротора и поля в обмотке возбуждения наводится большая ЭДС, фиксируемая вольтметром V2. В последнем случае необходимо отключить машину от сети и поменять местами два проводника на клеммах С1 и С2 (или в другом удобном месте изменить порядок чередования фаз на трехфазной обмотке).

Близкое совпадение частот вращения ротора и поля достигается при одинаковом числе полюсов исследуемой синхронной машины и приводного асинхронного двигателя. Разность частот вращения ротора и поля пропорциональна скольжению асинхронного двигателя.

При малых скольжениях ротора относительно поля статора стрелки приборов в цепи статора будут совершать колебания вследствие периодического изменения взаимного расположения осей МДС обмотки статора и полюсов.

При совпадении оси поля статора с продольной осью (т.е. с осью полюсов) проводимость для магнитного потока получается максимальной, вследствие чего намагничивающий ток имеет минимальное значение. Падение напряжения в регулирующем устройстве (индукционном регуляторе) при минимальном значении тока будет наименьшим и напряжение на зажимах синхронной машины имеет максимальное значение.

Если ось поля статора совпадает с поперечной осью машины, то проводимость для магнитного потока резко уменьшается и намагничивающий ток достигает максимального значения. С увеличением тока статора возрастает падение напряжения в регулирующем устройстве и напряжение на зажимах генератора становится минимальным.

Для увеличения точности показаний приборов опыт необходимо проводить при возможно малых скольжениях (1-2 колебания в секунду) и пользоваться приборами, обладающих малой инерцией.

Опыт определения сопротивлений  $x_d$  и  $x_q$  проводится в такой последовательности. После приведения генератора во вращение повышают напряжение на обмотке статора до такого значения, чтобы ток статора составлял около 20 % от номинального. Наблюдают периодическое изменение тока и напряжения и фиксируют по измерительным приборам максимальный и минимальный токи и соответствующие им напряжения обмотки статора. Значения напряжений и токов записывают в табл. 15.1.

Таблица 15.1 Данные опыта скольжения

№ п/п	$U_{\text{фмин}}$ , В	$I_{\text{фмак}}$ , А	$x_q$ , Ом	$U_{\text{фмак}}$ , В	$I_{\text{фмин}}$ , А	$x_d$ , Ом
1						
2						
3						
Среднее значение $x_q$				Среднее значение $x_d$		

Опыт проводят для нескольких значений максимального тока. Ориентировочно - 20, 30, 40 % от номинального.

При пренебрежении активным сопротивлением обмотки статора, значение синхронных индуктивных сопротивлений  $x_d$  и  $x_q$  при соединении статорной обмотки звездой определяют по формулам

$$x_d = \frac{U_{\Phi_{\max}}}{I_{\Phi_{\min}}}; \quad x_q = \frac{U_{\Phi_{\min}}}{I_{\Phi_{\max}}}.$$

### **Определение сопротивлений обратной последовательности**

Для определения сопротивлений обратной последовательности  $z_2$ ,  $r_2$ ,  $x_2$  в работе используется метод вращения ротора против поля. Опыт проводится после окончания предыдущего по схеме рис.6.5 в следующей последовательности. Регулятором ИР снижают напряжение на генераторе до минимального значения. Затем отключают автомат QF1 и изменяют подключение двух фаз обмотки статора для изменения направления вращения магнитного поля генератора. После этого включаются рубильник Q1, автомат QF1 и приводной двигатель. Установив на обмотке статора напряжение около 10 % номинального, фиксируют по приборам напряжение  $U$ , ток  $I$  и активную мощность  $P$ .

Данные измерений записывают в табл. 15.2. Затем подобные измерения производят при напряжении около 20 и 30 % от номинального тока и записывают результаты в табл. 15.2.

Расчет сопротивлений обратной последовательности производят по формулам:

$$z_2 = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}}; \quad r_2 = \frac{P_{\phi}}{I_{\phi}^2}; \quad x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2}.$$

Таблица 15.2. Данные опыта определения

### сопротивлений обратной последовательности

№ п/п	$U_{\phi},$ В	$I_{\phi},$ А	$P_{\phi},$ Вт	$Z_2,$ Ом	$\Gamma_2,$ Ом	$X_2,$ Ом
1						
2						
3						
Среднее значение сопротивлений						

### Переходные индуктивные сопротивления

Переходные индуктивные сопротивления определяются статическим методом. Для этого две фазы обмотки статора питаются однофазным током, а обмотка возбуждения замыкается накоротко (рис.6.5). В этом опыте синхронная машина работает в режиме статического трансформатора, у которого трансформаторная связь первичной и вторичной цепей изменяется с изменением положения ротора. Опыт проводят следующим образом.

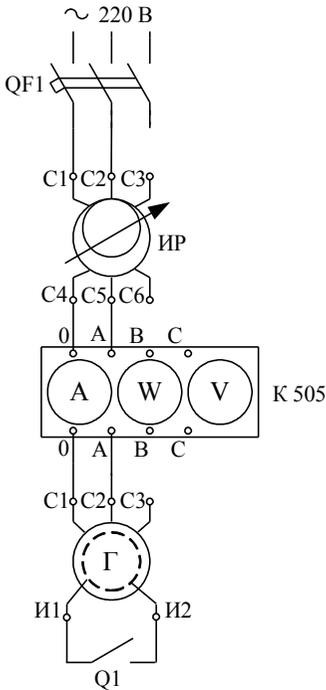


Рис. 6.5. Схема определения переходных индуктивных сопротивлений синхронного генератора

Перед включением автомата QF1 регулятор ИР устанавливается в положение минимального напряжения. Затем включаются автомат QF1 и рубильник Q1.

Медленно вручную поворачивая ротор, добиваются такого его положения, при котором ток в цепи статора достигает максимального значения. При этом ось результирующего потока

обмотки статора совпадает в пространстве с осью полюса, и короткозамкнутые обмотки ротора оказывают максимальное экранирующее воздействие на первичную цепь. Отчет показаний приборов для данного положения ротора соответствует продольному переходному  $x_d'$  сопротивлению.

Если оси результирующего потока обмотки статора и полюсов взаимно-перпендикулярны, то ток в цепи статора становится минимальным, что соответствует поперечному переходному  $x_q'$  сопротивлению.

Данные измерений токов и соответствующих им напряжений для обоих положений ротора записывают в табл. 15.3. Далее опыты повторяют для напряжений около 10 и 15 % от номинального тока и данные измерений записывают в табл. 15.3.

Таблица 15.3. Данные измерений переходных индуктивных сопротивлений

№ п/п	$U_{\text{фмак}}$ , В	$I_{\text{фмин}}$ , А	$x_q'$ , Ом	$U_{\text{фмин}}$ , В	$I_{\text{фмак}}$ , А	$x_d'$ , Ом
1						
2						
3						
Среднее значение сопротивлений						

Сопротивления  $x_d'$  и  $x_q'$  определяют делением соответствующих фазных напряжений на фазные токи:

$$x_q' = \frac{U_{\text{фмак}}}{2I_{\text{фмин}}}; \quad x_d' = \frac{U_{\text{фмин}}}{I_{\text{фмак}}}.$$

### Ударный ток короткого замыкания

По известному значению переходного индуктивного сопротивления статора  $x_d'$  можно рассчитать ударный ток короткого замыкания  $i_{\text{уд}}$ . Он представляет наибольшее возможное при данном возбуждении вращающейся маши-

ны мгновенное значение тока статора, получающееся при внезапном трёхфазном коротком замыкании непосредственно на зажимах генератора в той фазе, ЭДС которой в момент короткого замыкания проходит через нулевое значение.

Для генератора без успокоительной обмотки

$$i_{y0} = 1,8 \frac{\sqrt{2} * 1,05 * U_n}{x'_d} \text{ А,}$$

где 1,8 – ударный коэффициент;

1,05  $U_n$  – величина результирующей ЭДС статора при нагрузке, близкой к номинальной.

### **Оценка результатов испытаний и расчетов**

Сравните величину сопротивления постоянному току и индуктивные сопротивления обмотки переменного тока. Во сколько раз индуктивное сопротивление по продольной оси больше активного сопротивления?

Установите, во сколько раз индуктивное сопротивление  $x_d$  по продольной оси больше индуктивного сопротивления  $x_q$  по поперечной оси.

Сравнить между собой активные сопротивления обмотки статора для токов прямой и обратной последовательности.

Сравнить переходные индуктивные сопротивления по различным осям между собой и индуктивными сопротивлениями установившегося режима прямой и обратной последовательностей.

### **Содержание отчёта**

1. Паспортные данные синхронной машины, приводного двигателя и технические характеристики используемых измерительных приборов.
2. Схема испытательной установки.
3. Таблицы результатов измерений.
4. Расчёты всех сопротивлений.
5. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните назначение всех элементов, входящих в схему экспериментального исследования синхронной машины.

2. Почему для явнополусных синхронных машин индуктивные сопротивления по продольной  $x_d$  и по поперечной  $x_q$  осям имеют разные значения?

3. Как проводится опыт по определению сопротивлений по продольной  $x_d$  и по поперечной  $x_q$  осям синхронной машины?

4. Как проводится опыт по определению сопротивлений обратной последовательности  $r_2$  и  $x_2$  синхронной машины?

### **РАБОТА №16. Исследование трёхфазного синхронного двигателя.**

**Цель работы:** изучить конструкции синхронного двигателя, приобрести навыки пуска двигателя, исследовать электромеханические свойства, а также электрических свойств двигателя при регулировании возбуждения.

#### **Содержание работы:**

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя, установить тип и устройство системы возбуждения, записать паспортные данные синхронной машины.

2. Собрать схему экспериментального исследования синхронного двигателя.

3. Осуществить асинхронный пуск двигателя.

4. Установить влияние сопротивления в цепи обмотки возбуждения на процесс пуска. Наблюдать эффект «застревания» двигателя на полусинхронной скорости.

5. Снять и построить зависимости тока статора от тока возбуждения при отсутствии нагрузки на валу и

при нагрузке 0,5 номинальной, а также  $\cos\varphi=f(I_B)$  при  $P=0,5 P_n$ .

6. Снять и построить рабочие характеристики синхронного двигателя.

### **Выполнение работы**

При изучении конструкции синхронного двигателя необходимо ознакомиться с конструкцией ротора и статора, магнитопроводов статора и ротора. Установить расположение трехфазной обмотки (обмотки якоря), обмотки возбуждения (индуктора), пусковой (демпферной) обмотки. Ознакомиться с устройством передачи электроэнергии от возбудителя к вращающейся обмотке возбуждения (контактных колец и щеток), устройством клеммной коробки (борно) и маркировкой выводов обмоток двигателя, конструкцией возбудителя.

В связи с тем, что промышленность России не выпускает трехфазные синхронные двигатели мощностью 1÷70 кВт, в качестве такого двигателя может использоваться синхронный генератор с усиленной пусковой (демпферной) обмоткой. Нелишне вспомнить принцип обратимости электрических машин, предполагающий возможность использования любой электрической машины, как в качестве генератора, так и в качестве двигателя.

В отчете привести паспортные данные синхронной машины и возбудителя.

### **Пуск в ход синхронного двигателя**

Наиболее часто на практике применяется асинхронный пуск синхронного двигателя с прямым подключением к сети или с применением устройств снижения пускового тока, аналогичных применяемым для пуска асинхронных короткозамкнутых двигателей.

Для экспериментального исследования работы синхронного двигателя собирается схема по рис.6.6

Асинхронный пуск двигателя заключается в подключении трехфазной обмотки к источнику электроэнергии и разбегу двигателя под действием асинхронного момента,

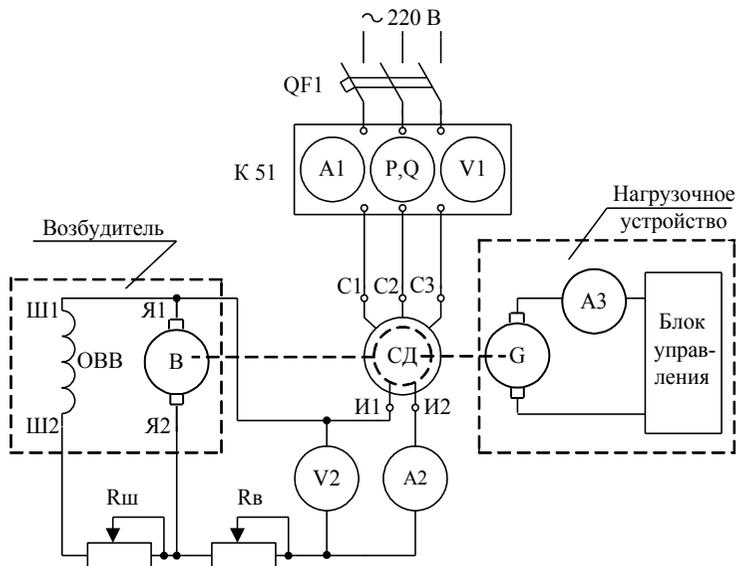


Рис. 6.6. Схема исследования синхронного двигателя

образованного взаимодействием вращающегося магнитного поля и короткозамкнутой пусковой обмоткой, аналогично асинхронному электродвигателю. В результате ротор разгоняется до скорости, соответствующей скольжению 2-6 %.

На втором этапе пуска в обмотку возбуждения подается ток возбуждения, который образует собственное магнитное поле, превращающее ротор в электромагнит постоянного тока, и ротор сцепляется с вращающимся магнитным полем статора, обеспечивая втягивание двигателя в синхронизм и последующее вращение ротора со скоростью вращения магнитного поля, т.е. синхронное вращение.

На заключительном третьем этапе пуска устанавливается заданный (рациональный) ток возбуждения и двигатель работает в длительном синхронном режиме.

На первом этапе пуска (асинхронный разбег) обмотка возбуждения не принимает активного участия в работе двигателя. Вместе с тем она расположена в зоне действия рабочего магнитного поля двигателя. При асинхронной скорости двигателя эта обмотка пересекается силовыми линиями вращающегося магнитного поля, которое наводит в обмотке возбуждения ЭДС вращения  $E_{2s} = E_2 \cdot s$  с частотой  $f_2 = f_1 \cdot s$ . Эта ЭДС имеет наибольшую величину в начальный период разбега  $E_{2s} = E_2$  ( $s=1$ ) и представляет опасность для целостности изоляции. На этом этапе не следует оставлять обмотку возбуждения разомкнутой во избежание пробоя изоляции обмотки возбуждения и появления в цепях возбуждения высокого потенциала, опасного для обслуживающего персонала.

При обтекании обмотки возбуждения током возбуждения (постоянным по роду) появляется знакопеременный электромагнитный момент, препятствующий разбегу двигателя и являющийся вредным. Поэтому обмотка возбуждения на первом этапе не должна обтекаться током возбуждения.

Замыкание обмотки возбуждения на себя также не применяется, поскольку вызывает эффект Гёргеса (застревание ротора на полусинхронной скорости) вследствие наличия на роторе несимметричного электрического контура, аналогичного эффекту, возникающему в асинхронном двигателе с фазным ротором при обрыве цепи одной из фазных обмоток ротора. Застревание ротора на полусинхронной скорости следует пронаблюдать, выведя перед включением двигателя реостат  $R_B$  в нулевое сопротивление ( $R_B=0$ ). Пронаблюдав застревание двигателя, следует полностью ввести реостат  $R_B$  ( $R_B = R_{\text{макс}}$ ) и наблюдать продолжение разгона двигателя до подсинхронной скорости.

Решением вопроса управления обмоткой возбуждения на этапе асинхронного разбега является её подключение к резистору  $R_B$  с сопротивлением в 8-10 раз большим, чем собственное активное сопротивление обмотки возбуждения. Подключение обмотки возбуждения к источнику постоянного тока (возбудителю) производят, когда двигатель достигнет подсинхронной скорости. В этом случае ЭДС скольжения  $E_{2s}$  в обмотке возбуждения имеет малую величину вследствие малого скольжения  $s$ .

Включение возбуждения вызывает синхронизацию двигателя, сопровождающуюся несколькими качаниями ротора. Эти качания вызывают характерный шум машины и всплески переменной составляющей напряжения в обмотке возбуждения, наблюдаемые по вольтметру  $V_2$  в цепи возбуждения. Прекращение качаний стрелки вольтметра означает окончание этапа синхронизации и начало работы двигателя в синхронном режиме.

### ***U-образные характеристики***

Так называется зависимость тока статора  $I_1$  от тока возбуждения  $I_2$  двигателя  $I_1=f(I_2)$  при постоянной механической нагрузке (нагрузке на валу) и постоянном напряжении питания двигателя.

Опыт проводят в следующем порядке. При полностью введенных сопротивлениях  $R_B$  и  $R_{III}$  включением автомата QF1 двигатель запускается. При достижении двигателем подсинхронной скорости резистор  $R_B$  полностью выводится ( $R_B=0$ ). Не включая тормозное устройство (опыт при отсутствии нагрузки), резистором  $R_{III}$  устанавливают ток возбуждения, который вызовет минимальный ток статора  $I_{1min}$ . Варметром прибора К-51 необходимо измерить реактивную мощность двигателя и обратить внимание, что эта мощность имеет нулевое значение. Это будет точка характеристики, которую следует записать под номером 4.

Далее, снижая ток возбуждения, записывают новые значения переменных величин в таблицу 16.1, соответственно под номерами 3, 2, 1. После этого увеличивают ток возбуждения и фиксируют значения величин в пп. 5, 6, 7. При измерении реактивной мощности необходимо обратить внимание на её характер – индуктивный или ёмкостный.

Таблица 16.1.  $U$ -образные характеристики синхронного двигателя.

№ п/п	Измерения						Расчет
	$U_{1ф},$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$U_2,$ В	$P_1,$ Вт	$Q,$ вар	$\cos\varphi$
а) холостой ход							
1		...	$I_{2мин}$	...	...	$Q_{макс1(инд.)}$	...
...		...	...	...	...	...	...
4		$I_{1мин}$	...	...	...	0	1,0
...		...	...	...	...	...	...
7		$(1,0-1,2) I_n$	$I_{2макс}$	...	...	$Q_{макс2(ёмк.)}$	...
б) нагрузка $0,5 P_n$ .							
1		...	$I_{2мин}$	...	...	$Q_{макс1(инд.)}$	...
...		...	...	...	...	...	...
4		$I_{1мин}$	...	...	...	0	1,0
...		...	...	...	...	...	...
7		$(1,0-1,2) I_n$	$I_{2макс}$	...	...	$Q_{макс2(ёмк.)}$	...

Нагрузку  $0,5 P_n$  устанавливают с помощью нагрузочного устройства. Для этого расчетом определяют ток нагрузочного устройства, соответствующий нагрузке  $0,5 P_n$ . Установив нужный ток нагрузочного устройства, в дальнейшем поддерживают его постоянным, что обеспечивает постоянство механической нагрузки (на валу) двигателя. Опыт повторяют по методике, аналогичной предыдущему опыту.

При малом токе возбуждения синхронный двигатель может выйти из синхронизма и перейти в асинхронное вращение. Это проявляется в появлении переменной составляющей в напряжении возбуждения и характерном

изменении шума двигателя и вращению отметки стробоскопа (отметки на валу двигателя при освещении стробоскопической лампой). Ток выпадения из синхронизма необходимо зафиксировать в табл. 16.1, разгрузить двигатель и увеличить ток возбуждения до вхождения двигателя в синхронизм.

Для опыта с  $P=0,5 P_n$  необходимо рассчитать значение коэффициента мощности, который определяется по одной из формул:

$$\begin{aligned} \cos\varphi &\approx \frac{I_{1\min}}{I_1}; & \cos\varphi &= \cos \operatorname{arctg} \frac{Q}{P_1}; \\ \cos\varphi &= \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q^2}}; & \cos\varphi &= \frac{P_1}{3U_\phi I_1}. \end{aligned}$$

В первой формуле считают, что активная составляющая тока статора при постоянной мощности на валу и изменении тока возбуждения остается постоянной и равной  $I_{1\min}$ , а изменение тока статора происходит за счет изменения реактивной составляющей тока. Остальные формулы общеизвестны.

$U$ -образные характеристики  $[I_1=f(I_2)]$  при  $P=0$  и  $P=0,5 P_n$  следует построить совмещенными на одной координатной плоскости и на ней же строится график зависимости  $\cos\varphi=f(I_2)$  при  $P=0,5 P_n$ .

### **Рабочие характеристики**

Это зависимость активной мощности  $P_1$ , мощности на валу  $P_2$ , тока статора  $I_1$ , КПД  $\eta$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi$  и внутреннего угла  $\Theta$  от момента на валу  $M$  при постоянном возбуждении. Используется схема по рис.6.6.

Ток возбуждения синхронного двигателя устанавливается в начале опыта на минимум тока статора или задается преподавателем.

Характеристики снимаются при нагружении синхронного двигателя нагрузочным устройством. Двигатель нагружается от холостого хода до нагрузки 1,2 от номинальной. Данные измерений 6-7 точек записываются в табл. 16.2.

Таблица 16.2. Рабочие характеристики синхронного двигателя

№ п/п	Измерения							Расчет				
	Возбуждение		Статор			Нагрузка						
	I <sub>2</sub> А	U <sub>2</sub> В	U <sub>φ</sub> В	I <sub>1</sub> А	P <sub>1</sub> Вт	Q вар	Θ гр. эл.	I <sub>3</sub> А	M Нм	P <sub>2</sub> Вт	cosφ	η
1								0	0	0		0
...												
7												

Момент на валу синхронного двигателя определяется по току нагрузочного устройства НУ с помощью тарировочной кривой  $M = f(I_3)$ .

Мощность  $P_2$  определяется по формуле

$$P_2 = M\Omega,$$

где  $\Omega$  – угловая частота вращения двигателя [рад/с], определяется по формуле

$$\Omega = \frac{\pi n}{30},$$

где  $n$  – скорость вращения двигателя в об/мин.

Коэффициент полезного действия двигателя  $\eta$  определяется как отношение мощностей  $\eta = P_2/P_1$ . Формулы для определения коэффициента мощности двигателя приведены выше (кроме первой).

### Анализ результатов испытания.

При изучении пусковых свойств двигателя необходимо установить влияние сопротивления в цепи обмотки возбуждения на характер разбега двигателя, определить

причину «застревания» двигателя на полусинхронной скорости при малых значениях сопротивления разрядного реостата.

Анализ  $U$ -образных характеристик заключается в установлении причин изменения тока статора при изменении тока возбуждения двигателя, а также в определении рациональных значений тока возбуждения для двигателя, работающего с различной механической нагрузкой, качественно оценить целесообразность регулирования тока возбуждения при изменении нагрузки двигателя.

При анализе рабочих характеристик следует установить их соответствие типовым характеристикам, приведенным в учебниках, и установить причину изменения переменных величин при изменении нагрузки двигателя.

### **Содержание отчёта**

1. Паспортные исследуемого синхронного двигателя, нагрузочной машины и технические характеристики используемых приборов.

2. Схема установки.

3. Таблицы результатов измерений.

4.  $U$ -образные характеристики  $[I_1=f(I_2)]$  при  $P=0$  и  $P=0,5 P_n$  совмещенные на одной координатной плоскости и на ней же график зависимости  $\cos\varphi=f(I_2)$  при  $P=0,5 P_n$ .

5. Рабочие характеристики синхронного двигателя.

6. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните назначение всех элементов, входящих в схему экспериментального исследования синхронного двигателя.

2. Назовите главные достоинства синхронного двигателя в сравнении с асинхронным двигателем?

3. Как осуществляется асинхронный пуск синхронного двигателя?

4. Почему при асинхронном пуске синхронного двигателя обмотку возбуждения необходимо замыкать на сопротивление?

5. Как изменяется активная и реактивная мощности синхронного двигателя при увеличении тока возбуждения?

### **РАБОТА № 17. Исследование самовозбуждающегося синхронного генератора с фазовым компаундированием**

**Цель работы:** ознакомиться с конструкцией синхронного генератора с встроенной системой возбуждения и автоматического регулирования тока возбуждения (фазовым компаундированием) серии ЕСС, приобретение опыта начального возбуждения генератора и исследование электромеханических свойств синхронного генератора.

#### **Содержание работы:**

1. Ознакомиться с конструктивным выполнением синхронного генератора, расположением его обмоток, устройством и принципом действия статического возбудителя (см. приложение к описанию работы).
2. Собрать схему экспериментального исследования синхронного генератора.
3. Запустить синхронный генератор, возбудить его и довести напряжение до номинального значения.
4. Снять и построить внешние характеристики и зависимости тока возбуждения и компаундирующего элемента от тока нагрузки генератора с заданным коэффициентом мощности ( $\cos\varphi$ ) при минимальном и максимальном фазовом компаундировании.
5. Настроить систему фазового компаундирования для работы с номинальным напряжением для заданного коэффициента мощности.

6. Снять и построить внешнюю характеристику и зависимость тока возбуждения и компаундирующего элемента от тока нагрузки для заданного  $\cos\varphi$  при нормальном компаундировании.
7. Произвести пуск от синхронного генератора с фазовым компаундированием короткозамкнутого асинхронного двигателя соизмеримой мощности при минимальном и максимальном компаундировании.
8. Дать оценку результатам испытаний.

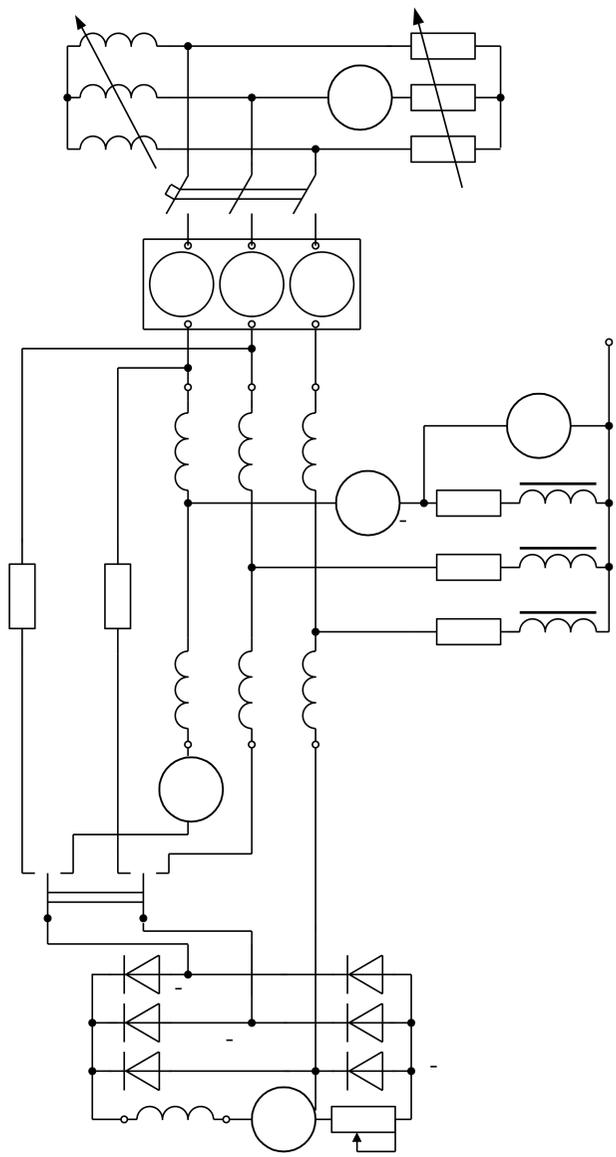
### **Выполнение работы**

При знакомстве с конструкцией синхронного генератора необходимо обратить внимание на конструкцию ротора и статора, конструкцию и расположение обмоток, а также устройство системы возбуждения. Подробно изучить схему соединения обмоток и компаундирующего устройства, уяснить принцип действия системы автоматического регулирования тока возбуждения.

Генераторы ЕСС5 имеют специфическую систему автоматического регулирования тока возбуждения, включающую основную и дополнительную трехфазные обмотки, размещенные на статоре, обмотку возбуждения, расположенную на роторе и блок компаундирования, состоящий из трехфазного регулируемого дросселя и резисторов. Регулирование внешней характеристики генератора производится изменением вольтамперной характеристики дросселя регулированием воздушного зазора между его стержнями и ярмом (изменением магнитного сопротивления магнитопровода). Принцип действия регулятора приведен в приложении 17.1.

Паспортные данные генератора записываются в протокол испытаний.

Экспериментальное исследование синхронного генератора проводится по схеме рис.6.7. На этой схеме: «ОО» –



основная трехфазная обмотка статора генератора; «ДО» – дополнительная трехфазная обмотка, размещенная в тех же

пазах статора, что и основная; VD1-VD6 - трехфазный выпрямитель; R1 – реостат, задающий напряжение генератора; И1-И2 – выводы обмотки возбуждения ОВ (индуктор); Др – трехфазный компаундирующий дроссель с регулируемым воздушным зазором; R2, R3, R4 – резисторы компаундирования; R5, R6 – резисторы начального возбуждения; SA1 – трехпозиционный переключатель цепи возбуждения: 0-«возбуждение отключено», 1-«стационарное возбуждение», 2-«начальное возбуждение». В качестве нагрузки генератора используется регулируемый реостат R7 и регулируемое индуктивное сопротивление  $X_L$ , выполненное на базе заторможенной асинхронной машины с фазным ротором. Переменные величины ток, напряжение и активная мощность генератора (нагрузки) измеряются комплектом измерительных приборов ИК.

### **Самовозбуждение генератора**

Перед тем, как возбудить генератор, необходимо измерить остаточное напряжение на основной и дополнительной обмотках. Для этого перед включением приводного двигателя переключатель SA1 необходимо поставить в положение 0 (нейтральное), автомат нагрузки QF1 отключить, затем включением приводного двигателя привести генератор во вращение и переносным вольтметром (на схеме не показан) измерить напряжение на клеммах 2-2 и 1-1 переключателя SA1. При выборе предела вольтметра необходимо иметь в виду, что дополнительная обмотка имеет напряжение меньше одного вольта, а основная обмотка несколько вольт. Результаты измерений записать в протокол.

Для возбуждения синхронного генератора необходимо вывести реостат R1 до нуля, переключатель SA1 поставить в положение 1 и наблюдать за вольтметром прибора ИК. Если напряжение не увеличивается (генератор не возбуждается), то начальное напряжение дополнительной

обмотки недостаточно для самовозбуждения. В этом случае кратковременно на вход выпрямителя VD1-VD6 необходимо подать более высокое начальное напряжение от основной обмотки. Для этого переключатель SA1 надо перевести в положение 2 и снова следить за вольтметром генератора. После того, как вольтметр зафиксирует увеличение напряжения примерно до половины от номинального, необходимо быстро перевести переключатель SA1 в положение 1. При этом напряжение генератора сначала несколько понизится, а затем его рост продолжится. При недостаточно быстром переключении переключателя SA1 возможен срыв процесса самовозбуждения. В этом случае необходимо повторить операцию переключения переключателя SA1 в положение 2 и 1.

При успешном самовозбуждении регулированием сопротивления реостата R1 в цепи обмотки возбуждения, устанавливают номинальное напряжение генератора. Генератор готов для работы с нагрузкой и снятия внешних характеристик. Значения переменных при холостом ходе генератора записываются в табл. 17.1.

### **Внешние характеристики**

Снятие внешних характеристик и зависимостей токов возбуждения и компаундирующего элемента проводится следующим образом. Установка максимального воздушного зазора дросселя Др соответствует минимальному компаундированию генератора. Сопротивление нагрузки устанавливается на максимальное значение (минимальная нагрузка). Далее включается коммутационный аппарат QF1, подключая нагрузку к генератору. Регулированием активного R7 и индуктивного сопротивления нагрузки  $X_L$  увеличивают нагрузку генератора при постоянном  $\cos\varphi$  до номинального тока генератора. Контроль за величиной  $\cos\varphi$  ведут по одной из формул:

Таблица 17.1. Характеристики генератора от степени

### компаундирования

№ п п	Показатели нагрузки					Цепь дросселя			Цепь возбуждения		Степень компаун- дирова- ния
	U <sub>1</sub> В	I <sub>1</sub> А	P <sub>1</sub> Вт	I <sub>5</sub> А	Cosφ	U <sub>2</sub> В	I <sub>2</sub> А	Z <sub>др</sub> Ом	I <sub>3</sub> А	I <sub>4</sub> А	
1	U <sub>н</sub>	0	0	0	0	...	...	...	...	...	Ми- нималь- ное
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
1	U <sub>н</sub>	0	0	0	0	...	...	...	...	...	Мак- сималь- ное
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
1	U <sub>н</sub>	0	0	0	0	...	...	...	...	...	Нормаль- ное
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	

$$\cos\varphi = \frac{I_5}{I_1}; \quad \cos\varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1},$$

где  $I_5$ - ток резистора R7 (активного сопротивления);  
 $I_1$ - полный ток нагрузки, измеряемый комплектом ИК;  
 $P_1$ - активная мощность одной фазы нагрузки;  
 $U_1$ - фазное напряжение генератора.

Показания приборов для 6-7 точек записываются в табл. 17.1.

Далее, предельно уменьшив воздушный зазор дросселя, устанавливают максимальную степень компаундирования и повторяют предыдущий опыт.

### **Настройка нормального компаундирования**

Настройка нормального компаундирования синхронного генератора производится следующим образом.

При холостом ходе генератора устанавливают заданное напряжение генератора (номинальное или заданное преподавателем). Затем включают нагрузку и устанавливают номинальный ток генератора при заданном  $\cos\varphi$ . Далее, поддерживая эту нагрузку постоянной, регулированием воздушного зазора дросселя устанавливают напряже-

ние генератора, равное напряжению при холостом ходе. Это и будет нормальное компаундирование. Воздушный зазор дросселя фиксируют крепежным винтом.

Установив нормальную степень компаундирования, снимают внешнюю характеристику по методике, описанной выше в п. 2.

### **Пуск асинхронного двигателя соизмеримой мощности**

Для выяснения влияния степени компаундирования генератора на запуск на холостом ходу асинхронного двигателя соизмеримой мощности проводят опыт в следующем порядке. Вместо статической нагрузки R7, X<sub>L</sub> подключается асинхронный короткозамкнутый двигатель. Затем устанавливается минимальное компаундирование и включается приводной двигатель генератора. После возбуждения генератора и установки номинального напряжения автомат QF1 подключается пускаемый на холостом ходу асинхронный двигатель. Значения напряжения и тока в начальный момент пуска заносятся в протокол. После пуска отключается автомат QF1, останавливается приводной двигатель генератора и устанавливается максимальное компаундирование. Пуск асинхронного двигателя повторяется как описано выше.

### **Методические указания к построению характеристик**

В отчете на одном рисунке необходимо построить все внешние характеристики, т.е. зависимости  $U_1=f(I_1)$  по таблице 17.1. На другом рисунке - регулировочные характеристики, т.е. зависимости тока возбуждения от тока нагрузки  $I_4=f(I_1)$ , а на третьем - зависимости тока компаундирующего дросселя от тока нагрузки генератора  $I_2=f(I_1)$ .

### **Оценка результатов испытаний**

Оцените величину остаточного напряжения основной и дополнительной обмоток в процентах от номинального напряжения генератора.

Укажите причину отсутствия самовозбуждения синхронного генератора при нормальной схеме включения его обмоток. Укажите причину того, что самовозбуждение происходит успешно при кратковременном переключении переключателя SA2 в положение 2.

Установите, как зависит внешняя характеристика и напряжение генератора от степени компаундирования.

Оцените характер изменения тока возбуждения генератора при изменении тока нагрузки при различных степенях компаундирования.

Установите, как связаны между собой степень компаундирования и величина сопротивления компаундирующего дросселя.

Оцените снижение напряжения и время пуска асинхронного двигателя соизмеримой мощности при различных степенях компаундирования.

### **Содержание отчёта**

1. Паспортные данные генератора, приводного двигателя и технические характеристики используемых измерительных приборов.

2. Схема установки.

3. Таблицы результатов измерений.

4. Внешние характеристики  $U_1=f(I_1)$  для всех режимов, построенные на одном графике.

5. Регулировочные характеристики  $I_4=f(I_1)$  для всех режимов, построенные на одном графике.

6. Зависимости тока компаундирующего дросселя от тока нагрузки генератора  $I_2=f(I_1)$  для всех режимов, построенные на одном графике.

7. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие основные задачи решает устройство автоматического регулирования возбуждения генератора?
2. Объясните принцип действия устройства возбуждения генератора, исследуемого в лабораторной работе.
3. Объясните назначение элементов системы возбуждения синхронного генератора.
4. Что такое фазовое компаундирование?
5. Как осуществляется самовозбуждение синхронного генератора?

## Приложение 17.1

### Конструкция генератора ЕСС5

Генератор изготавливается в горизонтальном, защищенном исполнении с двумя подшипниковыми щитами, на лапах.

Генераторы серии ЕСС5 выпускаются на напряжения 230, 400 и 440В и частоты 50 и 60 Гц. Эти генераторы предназначены только для автономной работы и не должны включаться для параллельной работы, имеют четыре варианта комплектации по аппаратуре управления и регулирования. Здесь приведено описание одного из вариантов, отличительной чертой которого является максимальное использование компаундирующих свойств электромагнитной системы самого генератора, что позволяет обходиться предельно простым дополнительным оборудованием системы компаундирования (автоматического регулирования возбуждения).

Генератора состоит из следующих узлов (рис.6.8).

1 - Станина – чугунная, литая, форма цилиндрическая, с кольцевыми фланцами на торцах. В верхней части на проеме закреплен блок компаундирования.

2 - Сердечник статора набирается из штампованных, изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. После опрессовки, набранный пакет сердеч-

ника крепится шестью продольными скобами, которые на торцах привариваются к нажимным кольцам.

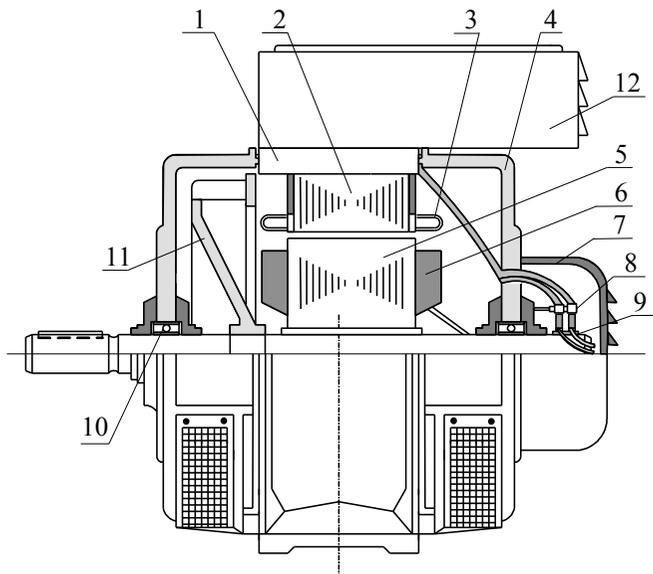


Рис. 6.8. Общий вид генератора ECC5

Пазы сердечника статора имеют скос на одно зубцовое деление, что необходимо для повышения качества напряжения генератора и уменьшения магнитного шума.

Сердечник статора впрессовывается в станину и укрепляется в ней от проворачивания винтом.

3 - Обмотка статора насыпная, состоит из мягких секций, выполненных круглым медным проводом. Изоляция обмотки соответствует классу В. Схема соединения обмотки – «звезда с нулем» (нулевой проводник от нейтрали компаундирующего дросселя).

4 - Подшипниковые щиты – чугунные, литые. В их нижней части расположены окна для прохождения охлаждающего воздуха. Эти окна защищены сетками, штампованными из листовой стали.

5 - Сердечник ротора прессуется на стальном валу из штампованных листов электротехнической стали толщиной

0,5 мм. Листы имеют форму четырехполусной звезды. Крайние листы для увеличения жесткости пакета выполнены из стали толщиной 2 мм.

При сборке ротора, на сердечник устанавливаются катушки обмотки возбуждения и крепятся сегменты полюсных башмаков. Сегменты с сердечником скрепляются посредством двух продольных шпилек, проходящих через отверстия сегментов.

6 - Обмотка возбуждения выполняется последовательным соединением всех четырех катушек полюсов.

Катушки наматываются из прямоугольной меди и после наложения изоляции полюсов сердечника надеваются на них.

Выводные провода обмотки возбуждения пропускаются через вал, конец которого со стороны контактных колец полый (сверленный), и соединяются с этими кольцами.

7 - Кожух служит для предохранения траверсы, щеток и контактных колец от прикосновения и повреждения. В кожухе предусмотрены жалюзи и отверстия для прохождения охлаждающего воздуха.

8 - Щеточное устройство выполнено из чугунного кольца, которое стягивает крышку подшипника. В кольцо ввинчивается шпилька, покрытая изоляционным материалом. На шпильке крепятся две траверсы, имеющие по два щеткодержателя со щетками марки ЭГ-14 (сечение щеток 10×12,5 мм). Щетки одной траверсы соединены между собой перемычками.

9 - Контактные кольца изготавливаются из латуни. Кольца насаживаются на стальную втулку запрессовываются в изоляционный материал и насаживаются на конец вала.

Предохранителем от осевого смещения контактных колец служит закрепленное на валу пружинное кольцо, а от проворачивания – призматическая шпонка.

10 - Подшипники. Вал генератора опирается на шарикоподшипники № 309. Камеры подшипников на 2/3 объема заполняются жировой смазкой 1-13.

11 - Вентилятор – литой, из алюминиевого сплава, отливается совместно с чугунной втулкой и крепится на валу при помощи призматической шпонки. Вентиляция генератора – аксиальная, вытяжная. Воздух забирается центробежным вентилятором со стороны контактных колец генератора. Вентилятор установлен на валу со стороны привода.

12 - Блок компаундирования крепится над проемом станины генератора. В нем установлены селеновые выпрямители цепи возбуждения, компаундирующий трехфазный дроссель с воздушным зазором и компаундирующие резисторы.

В коробке имеются отверстия для прохождения охлаждающего воздуха, засасываемого вентилятором генератора.

Выводные провода генератора выводятся наружу через резиновую втулку, установленную с левой стороны верхнего проема станины, если смотреть со стороны привода двигателя.

## Приложение 17.2

### **Принцип работы генератора и статической системы автоматического регулирования напряжения**

Постоянный ток возбуждения протекает по обмотке возбуждения И1-И2 и создает основной магнитный поток генератора (поток возбуждения), жестко связанный с индуктором (ротором) и вращающийся вместе с ним. При вращении этот поток наводит ЭДС в трехфазной обмотке статора. Вследствие пространственного смещения фазных обмоток начальные фазы ЭДС в фазных обмотках смещены на 120 град.эл.

Частота тока определяется скоростью вращения поля и числом полюсов магнитной системы.

Величина ЭДС обмотки статора при холостом ходе зависит от параметров обмотки (числа витков, обмоточного коэффициента, числа полюсов), величины и скорости вращения магнитного потока.

При нагружении генератора в статорной обмотке протекает ток нагрузки, вызывающий собственное магнитное поле, называемое полем реакции якоря. Это поле вращается синхронно с полем возбуждения, образуя совместно результирующее поле генератора.

Действие поля реакции якоря на поле возбуждения определяется не только величиной, но и начальной фазой трехфазного тока, зависящей от характера нагрузки, характеризуемой коэффициентом мощности ( $\cos\varphi$ ). При чисто активной нагрузке ( $\cos\varphi=1$ ) имеет место поперечный поток реакции якоря, который в ненасыщенном генераторе вызывает искажение конфигурации магнитного поля (искривление силовых линий поля), но не изменяет величину магнитного потока, а в насыщенном вызывает небольшое уменьшение результирующего потока по сравнению с потоком возбуждения (холостого хода). Это уменьшение потока вызывает уменьшение ЭДС и напряжения генератора.

При чисто индуктивной нагрузке ( $\cos\varphi=0$ ) поток реакции якоря будет продольно размагничивающим, т.е. направленным противоположно потоку возбуждения, вызывая значительное снижение напряжения генератора.

В наиболее часто имеющем место в практической электротехнике случае активно-индуктивной нагрузки ( $0 < \cos\varphi < 1$ ) реакция якоря имеет как поперечную, так и продольную размагничивающую составляющие, что приводит к снижению результирующего потока, ЭДС и напряжения промежуточной величины в сравнении с чисто активной и чисто индуктивной нагрузкой.

Стабилизация напряжения генератора достигается регулированием тока возбуждения и, следовательно, магнитного потока возбуждения. У генератора ЕСС5 это регулирование производится автоматически статической системой возбуждения с компаундирующим дросселем. Эти генераторы выполнены с самовозбуждением, когда часть энергии трехфазного тока генератора отбирается системой возбуждения, преобразуется в энергию постоянного тока и используется для питания обмотки возбуждения. Система возбуждения реализует принцип фазового компаундирования, суть которого в сложении двух составляющих тока возбуждения: составляющей, пропорциональной напряжению генератора и составляющей, пропорциональной току генератора, сдвинутых друг относительно друга на угол, зависящий от характера нагрузки. Обе составляющие суммируются геометрически. Фаза компаундирования представляет собой угол между составляющими тока возбуждения по стороне переменного тока, пропорциональными напряжению и току нагрузки генератора.

Составляющая тока возбуждения, пропорциональная напряжению, обеспечивается дополнительной обмоткой ДО и компаундирующим дросселем Др. При холостом ходе ток возбуждения циркулирует в контуре, составленном обмоткой возбуждения И1-И2, реостатом R1, выпрямителем VD1-VD6, обмоткой ДО, дросселем Др и резисторами R2-R4. Ток возбуждения и напряжение генератора регулируются реостатом R1.

Эквивалентная схема замещения системы возбуждения для одной фазы при холостом ходе генератора представлена на рис.6.9, где  $E_{до}$  – ЭДС дополнительной обмотки,  $R_{экв}$  – активное сопротивление указанного контура, приведенное к стороне переменного тока,  $X_{др}$  – индуктивное сопротивление дросселя Др.

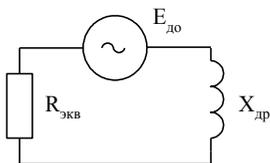


Рис. 6.9. Эквивалентная схема замещения системы возбуждения синхронного генератора

При работе генератора под нагрузкой возникает необходимость в увеличении тока возбуждения для стабилизации напряжения генератора. Такое увеличение обеспечивает последовательное включение обмотки возбуждения с обмоткой статора. Ток нагрузки (ток основной обмотки статора) разветвляется в узле  $O_1-O_3$ . Часть этого тока замыкается через обмотку возбуждения, другая часть – через дроссель. Соотношение токов в этих ветвях и требуемое соотношение между током нагрузки и током возбуждения определяется сопротивлениями дросселя и контура обмотки возбуждения и регулируется изменением индуктивного сопротивления дросселя. Индуктивное сопротивление регулируется изменением воздушного зазора магнитной цепи дросселя. При этом система регулирования позволяет стабилизировать напряжение при чисто активной нагрузке или активно-индуктивной при  $\cos\varphi > 0,5$  (другие по характеру нагрузки бывают крайне редко). Точность поддержания напряжения находится в пределах  $\pm 5\%$  от среднего значения напряжения.

Качество регулирования напряжения генератора определяется параметрами обмоток статора и ротора. Определение необходимого угла пространственного смещения основной и дополнительной статорных обмоток, определение чисел витков и сечений обмоток, параметров дросселя и др., осуществляется на базе математического описания электромагнитных процессов в генераторе. Эта задача выходит за рамки изучения конструкции и принципа действия генератора.

## **РАБОТА № 18. Параллельная работа синхронного генератора с сетью**

**Цель работы:** приобрести практические навыки включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации и изучить его свойства при этой работе.

### **Содержание работы:**

1. Ознакомиться с испытательным оборудованием и измерительными приборами, используемыми в работе.
2. Включить синхронный генератор на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации.
3. Снять и построить U-образные характеристики генератора при постоянной активной мощности и регулировании тока возбуждения.
4. Снять и построить характеристики генератора, работающего параллельно с сетью, при постоянном токе возбуждения и изменении момента на валу.
5. Дать оценку результатам испытаний.

### **Выполнение работы**

#### **Схема испытательной установки**

Для проведения исследования собирается схема по рис.6.10. В качестве приводного двигателя используется двигатель постоянного тока параллельного возбуждения Д. Двигатель предварительно тарирован при заданном токе возбуждения и регулируемом напряжении на якоре, при скорости вращения, равной синхронной скорости генератора, что позволяет определять момент на валу М по величине тока двигателя, измеряемого амперметром А1. Реостат R1 используется как пусковой для снижения пускового тока, реостат R2 используется для регулирования момента на валу двигателя Д и генератора СГ (в установившемся

режиме моменты на общем валу двигателя и генератора уравниваются друг друга, т.е. всегда равны по величине и противоположно направлены).

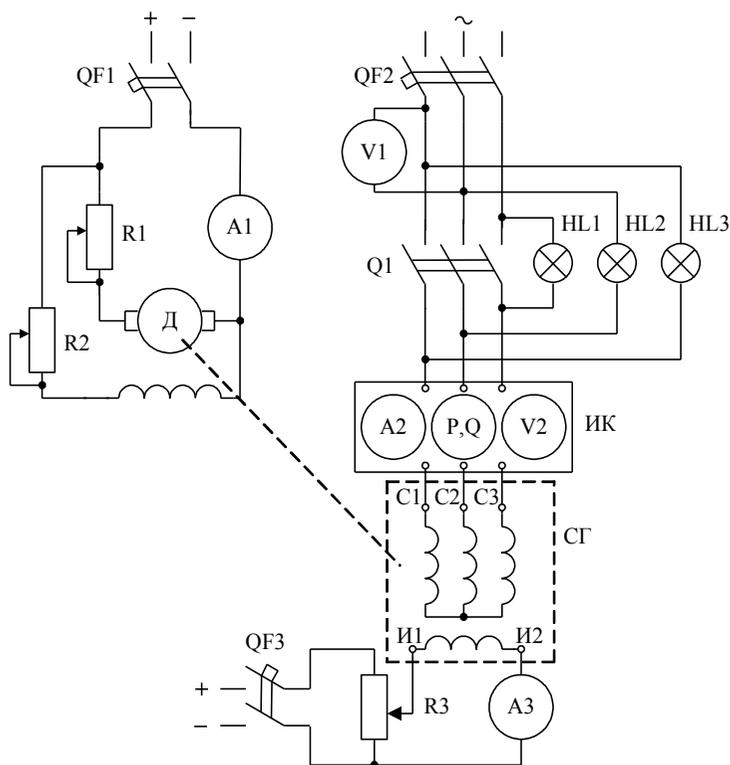


Рис. 6.10. Схема включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью

В качестве измерительного комплекта ИК целесообразно использовать комплект К-51 (К-506), который позволяет измерять реактивную мощность генератора с учетом её знака (индуктивная или ёмкостная).

В работе удобно использовать синхронный генератор обращенной конструкции, имеющего малый ток возбуждения и напряжение возбуждения порядка 220 В. В этом слу-

чае в качестве источника тока возбуждения может использоваться сеть 220 В постоянного тока.

В работе используется ламповый синхроскоп HL1...HL3, включенный на погасание.

### **Включение генератора на параллельную работу**

Для включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации необходимо соблюсти следующие условия: 1) равенство напряжений генератора и сети; 2) частота генератора должна равняться частоте сети; 3) напряжения сети и генератора должны совпадать по фазе; 4) совпадение чередования фаз генератора и сети. Приведение генератора в такое состояние является важнейшим этапом *синхронизации*.

При отключенных электрических цепях генератора (Q1, QF2, QF3 выключены) включают приводной двигатель (QF1), приведя генератор во вращение. Пуск двигателя постоянного тока производят при максимальной величине сопротивления пускового реостата R1 ( $R1 = \text{макс.}$ ) с последующим уменьшением сопротивления по мере разгона якоря. После завершения пуска устанавливают скорость максимально близкую к номинальной скорости генератора регулированием тока возбуждения двигателя реостатом R2.

Включают QF3 и потенциометром R3 устанавливают такой ток возбуждения  $I_B$  (контролируется амперметром A3), который обеспечивает напряжение генератора ( $U_2$ ), равное напряжению сети ( $U_1$ ).

Затем включают QF2, приведя в действие синхроскоп HL1-HL3. Если порядок чередования фаз генератора и сети одинаков, лампы при таком включении одновременно загораются и одновременно гаснут. В тот момент, когда напряжение генератора уравнивается напряжению сети, лампы гореть не будут. Регулируя скорость двигателем Д, доводят частоту загораний и потуханий до 10-15 погасаний в минуту. Регулированием током возбуждения синхронного

генератора (реостат R3) окончательно уравнивают напряжение сети и генератора и в середине периода погасания лам синхроскопа включают рубильник Q1. Синхронизация завершена.

Если при включении ламп по схеме «на погасание» они дают «бегающий свет», это указывает на несовпадение порядка чередования фаз сети и подключаемого генератора. Чтобы получить совпадение, необходимо поменять местами два провода на зажимах генератора или сети (обычно удобнее первое) либо изменить направление вращения подключаемого генератора.

### **Регулирование активной мощности генератора**

После включения генератора на параллельную работу его нагружают активной мощностью. Для этого необходимо увеличить вращающий момент первичного двигателя. Если первичным двигателем является двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, то увеличение его вращающего момента производится путем некоторого уменьшения тока возбуждения или увеличения напряжения на зажимах якоря двигателя.

Уменьшая вращающий момент первичного двигателя, можно перевести синхронную машину из генераторного режима в двигательный. Момент перехода можно заметить по мощности, измеряемой ваттметром, которая становится отрицательной.

### **Регулирование реактивной мощности**

Генератору с помощью первичного двигателя сообщают некоторую активную нагрузку, сохраняемую в дальнейшем неизменной. Затем начинают увеличивать или уменьшать ток возбуждения синхронного генератора.

При некотором токе возбуждения ток в обмотке статора достигает минимального значения и затем увеличивается при изменении тока возбуждения в любую сторону. Ми-

нимум тока соответствует коэффициенту мощности, равном единице. При недовозбуждении генератор потребляет из сети реактивную мощность, при перевозбуждении – отдает её в сеть. Так как мощность первичного двигателя сохраняется почти неизменной, о чем можно судить по показаниям приборов, а ток обмотки статора генератора изменяется, то это означает, что изменяется реактивная мощность генератора.

### ***U-образные характеристики***

Это представленная графически зависимость тока якоря от тока возбуждения  $I_2=f(I_6)$  при постоянной активной мощности генератора  $P_2$ . Обычно это зависимость определяется для 2-3 разных значений  $P_2$ , причем в одном случае  $P_2=0$ .

Опыт проводят в следующем порядке. Включив генератор на параллельную работу, с помощью приводного двигателя устанавливают требуемый момент на валу генератора и, сохраняя этот момент, изменяют ток возбуждения генератора. Фиксируются регулируемый ток возбуждения  $I_B$  и ток трехфазной обмотки генератора  $I_2$  активная  $P_2$  и реактивная  $Q$  мощности, напряжение  $U$ , причем у реактивной мощности фиксируют как величину, так и характер, ёмкостный или индуктивный. Постоянство активной мощности генератора поддерживается первичным двигателем и контролируется по ваттметру измерительного комплекта ИК. Необходимо занести в таблицу точку, соответствующую минимальному току в статоре ( $\cos\varphi = 1$ ). Результаты измерений заносят в таблицу 18.1.

Коэффициент мощности определяют по одной из формул:

$$\cos\varphi \approx \frac{I_{2\text{МИН}}}{I_2}; \quad \cos\varphi = \cos \arctg \frac{Q}{P_2}; \quad \cos\varphi = \frac{P_2}{\sqrt{3}UI_2},$$

где  $I_{2\text{МИН}}$  - минимальный ток генератора при заданной активной мощности (при  $\cos\varphi = 1$ ).

Таблица 18.1. U-образные характеристики генератора

№ п/п	$I_B,$ А	$I_2,$ А	U, В	Q, вар, (ха- рак.)	$\cos\varphi$
а) $P_2 = 0$					
1 ... 7					
б) $P_2 = 0,25 P_{2н}$					
1 ... 7					
в) $P_2 = 0,5 P_{2н}$					
1 ... 7					

При построении U-образных характеристик  $I_2=f(I_\theta)$  следует отметить на графике линию  $\cos\varphi = 1$ , соединив пунктиром точки с минимальным током при разных  $P_2$ , а также выделить область работы генератора с отстающим и опережающим током по отношению к начальной фазе напряжения генератора.

Для  $P_2 = 0,5P_{2н}$  построить характеристику  $\cos\varphi=f(I_\theta)$  на общей координатной плоскости с U-образными характеристиками.

### Работы генератора при постоянном возбуждении

Если при неизменном токе возбуждения параллельно работающего генератора изменять активную мощность, то вместе с ней будет изменяться реактивная мощность  $Q$ .

Опыт проводится в следующем порядке.

В обмотке возбуждения устанавливают ток, равным току при точной синхронизации генератора или заданным преподавателем. Сохраняя этот ток возбуждения неизменным, генератор постепенно нагружается активной мощностью от режима холостого хода до выпадения из синхронизма, и записывают показания в таблицу 18.2.

Таблица 18.2. Характеристики синхронного генератора при постоянном токе возбуждении  $I_B$

№ п/п	$I_B$ , А	$U_n$ , В	$I_2$ , А	$P_2$ , Вт	$Q$ , вар	$I_1$ , А	$M$ , нм	$P_1$ , Вт	$\eta$	$\cos\varphi$
1										
...										
6										

Сами характеристики представляют собой зависимость активной  $P_2$  и реактивной  $Q$  мощностей, тока статора  $I$ , момента  $M$ , КПД  $\eta$ ,  $\cos\varphi$  от мощности на валу  $P_1$ .

При постоянной частоте вращения  $\Omega$ , свойственной синхронным генераторам, мощность на валу пропорциональна моменту

$$P_1 = \Omega M,$$

где  $\Omega$  - частота вращения генератора в рад./с;

( $\Omega = \pi n / 30$ ,  $n$  - скорость в об/мин).

Момент и механическая мощность регулируются двигателем Д, и для их увеличения действуют так же как в случае, когда хотят увеличить скорость двигателя, т.е. снижают ток возбуждения двигателя реостатом R2 (скорость при этом не изменяется вследствие особого характера механической характеристики синхронного генератора, а ток якоря двигателя возрастает).

Мощности  $P_2$ ,  $Q$  и ток  $I_2$  измеряются ваттметром, ваттметром и амперметром комплекта ИК.

Коэффициент полезного действия  $\eta$  определяется упрощенным способом как отношение мощностей  $\eta = P_2/P_1$ .

Коэффициент мощности  $\cos\varphi$  определяется расчетом по одной из формул:

$$\cos\varphi = \frac{P_2}{\sqrt{3}UI}; \quad \cos\varphi = \frac{P_2}{\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}}.$$

### **Анализ результатов экспериментов**

Необходимо обратить внимание на способы регулирования нагрузки генератора по активной и по реактивной мощности.

Проанализировать изменение переменных величин (тока, активной мощности, КПД) рабочих характеристик синхронного генератора и установить общие закономерности с соответствующими характеристиками изученных ранее электрических машин (постоянного тока, асинхронного двигателя, синхронного двигателя).

Для  $U$ -образных характеристик необходимо дать объяснение характеру зависимости величины трехфазного тока от тока возбуждения и причину увеличения тока возбуждения, соответствующего  $\cos\varphi = 1$ , при увеличении активной мощности генератора.

### **Содержание отчёта**

1. Паспортные данные генератора, приводного двигателя и технические характеристики используемых измерительных приборов.
2. Схема установки.
3. Таблицы результатов измерений.
4.  $U$ -образные характеристики генератора при постоянной активной мощности.

5. Зависимость активной  $P_2$  и реактивной  $Q$  мощностей, тока статора  $I$ , момента  $M$ , КПД  $\eta$ ,  $\cos\varphi$  от мощности на валу  $P_1$ .

6. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите условия включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью.

2. Поясните суть метода точной синхронизации. Объясните последовательность действий при включении синхронного генератора на параллельную работу с сетью способом точной синхронизации.

3. Как регулируется активная мощность синхронного генератора при параллельной работе с сетью?

4. Как регулируется реактивная мощность синхронного генератора при параллельной работе с сетью?

## **ГЛАВА СЕДЬМАЯ**

### **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Применение компьютерного моделирования электромеханических объектов является современным средством организации учебного процесса при подготовке инженеров-электриков, позволяющим проводить виртуальные испытания электрических машин с целью изучения их свойств. Теория математического моделирования электрических машин имеет в последние десятилетия значительные достижения. В настоящее время получили широкое применение математические модели наиболее распространенных электромеханических объектов в составе больших комплексных программных пакетов моделирования, таких как “MatLab 6.0”.

Математическому моделированию могут быть подвержены самые разнообразные процессы в электрической машине: электрические, магнитные, механические, тепловые, аэродинамические и др. Для настоящего лабораторного практикума практический интерес представляют электромеханические и электромагнитные процессы, раскрывающие основные свойства электрических машин, позволяющие определить их параметры и характеристики, и пре-

жде всего, те из них, которые являются предметом исследования в традиционном лабораторном практикуме при испытаниях реальных электрических машин. Вместе с тем, виртуальные испытания позволяют производить испытания, невозможные с реальными машинами, например, по соображениям безопасности.

Виртуальные испытания электрических машин особенно полезны при дистанционном и заочном обучении, самостоятельном изучении электрических

машин или отдельных вопросов теории электрических машин, при отсутствии в распоряжении пользователей реальных испытательных установок и как дополнительное средство изучения электрических машин. Вместе с тем, они не должны заменять, а только дополнять в учебном процессе испытания реальных электрических машин.

Для реализации виртуальных лабораторных работ настоящего практикума необходимо наличие в распоряжении пользователя компьютера с установленной версией пакета “MatLab 6.0”, с расширениями “Simulink”, “Toolboxes” и “Power System Blockset”, а также знание пользователем учебных дисциплин «Вычислительная техника» (Информатика), «Алгоритмы и решение прикладных задач в электротехнике», в рамках которых пользователь (студент) изучил основы использования названных программных продуктов.

Здесь приведем краткие напоминания об особенностях использования названных программ.

Пакет “MatLab 6.0” (от словосочетания Matrix Laboratory –матричная лаборатория) предполагает использование при моделировании электромеханических объектов специализированных блоков различного функционального назначения. Эти блоки обеспечивают управление вычислительным процессом, задают исходные значения переменных физических величин, производят математические операции и придают наглядность результатам вычислений. Блоки могут представлять в завершённом виде математическую модель стандартного электротехнического устройства, такого как трансформатор, электрическая машина, пассивные элементы электрических цепей (активные, индуктивные и ёмкостные сопротивления), источников напряжения или тока и др., содержащихся в библиотеке Simulink. Здесь мы коротко перечислим блоки, используемые при выполнении

предложенных настоящим практикумом виртуальных лабораторных испытаний электрических машин и трансформаторов.

Вся библиотека Simulink содержит восемь разделов: Continuous (непрерывные линейные блоки), Discrete (дискретные блоки), Functions & Tables (функции и таблицы), Math (блоки математических операций), Nonlinear (нелинейные блоки), Signals & Systems (сигналы и системы), Sinks (Виртуальные приборы регистрации и наблюдения процессов), Sources (источники сигналов), Subsystems (блоки подсистем). При выделении одного из разделов в правом поле окна библиотеки раскрывается содержание раздела, т.е. набор блоков этого раздела с необходимыми комментариями к ним.

Раздел линейных блоков Continuous содержит, в частности, следующие блоки: Integrator – аналоговый интегратор, совершающий математическое интегрирование сигнала, подаваемого на его вход; Derivate – звено аналогового дифференцирования; Transfer Fcn – линейное аналоговое звено, заданное своей передаточной функцией.

Раздел Functions & Tables (функции и таблицы) содержит универсальный вычислительный блок Fcn, где в качестве параметра настройки можно ввести любое вычисляемое математическое выражение, аргументом которого выступает подаваемый на вход блока сигнал.

Библиотека математических операций Math содержит: Sum – аналоговый сумматор двух или нескольких сигналов, позволяющий реализовывать операции их сложения и вычитания; Product – вычислительный блок умножения и деления двух и более сигналов, подаваемых на его вход; Gain – аналоговый усилитель, т.е. блок умножения входного сигнала на постоянную величину; Mat Function – блок преобразования входного сигнала по одной из элементарных функций, выбираемой в поле настройки этого блока; Trigonometric Function – блок преобразования

входного сигнала как аргумента по одной из тригонометрических функций.

Блок регистрирующих устройств Sinks содержит: Score – осциллограф для наблюдения за переменными во времени процессами; XY Graph - графопостроитель в системе полярных координат; Display – устройство для вывода результатов вычисления на экран дисплея.

Блок источников сигналов Sources содержит устройства задания входных сигналов различной формы. Signal Generator задает периодические сигналы, в том числе синусоидальные различной амплитуды и частоты. Step генерирует постоянный сигнал задаваемой величины с заданного момента времени. Ramp задает линейную функцию в качестве входного сигнала и используется для задания независимой переменной величины X при графическом построении характеристик  $Y=f(X)$ .

Особого внимания заслуживает библиотека электрических машин (Machines), которая содержит синхронные, асинхронные машины и машины постоянного тока. Параметры и переменные величины состояния машин могут быть представлены как в абсолютных, так и в относительных величинах (единицах измерения). Универсальный блок измерения (Measurement demultiplexer) позволяет измерять переменные состояния машины (ток, напряжение, ЭДС, мощность, частоту вращения, момент и др.).

Все разделы библиотеки Simulink имеют функциональные блоки, позволяющие решать широкий круг задачи моделирования электромеханических и электромагнитных процессов в электрических машинах. Для создания модели в среде Simulink необходимо выполнить следующие действия:

- создать новый файл с помощью команды File/New/Model или с помощью знака «Открыть новый файл» панели инструментов;

- выделить в библиотеке Simulink требуемые блоки;
- переместить эти блоки на поле (окно) построения модели;
- присвоить наименование каждому блоку (эту операцию компьютер выполняет автоматически, но названия блоков можно при желании изменять);
- рационально разместить блоки на поле модели;
- соединить отдельные блоки между собой соответствующими линиями связи, создав собственно блок-схему;
- установить параметры настройки каждого из блоков;
- после выполнения предшествующих операций приступить к операции моделирования процесса.

Рассмотрим подробнее наиболее востребованные операции, выполняемые с названными блоками при построении блок-схем. Чтобы выделить отдельный объект нужно подвести к нему курсор и щелкнуть левой кнопкой мыши один раз. В результате по углам выделяемого блока или на концах выделяемой линии появятся маленькие квадратные черные метки.

Чтобы выделить несколько объектов, необходимо нажать клавишу [Shift] и, удерживая её нажатой, выполнить щелчки на каждом из выделяемых объектов. После такого выделения клавишу [Shift] отпустить.

Группу компактно расположенных объектов можно выделить с помощью рамки. Для этого необходимо установить курсор в точку, которая будет являться одним из углов прямоугольника, нажать левую кнопку мыши и, удерживая её нажатой, переместить курсор в направлении противоположного угла выделяемого прямоугольника. Отпустив кнопку мыши, выделяют все объекты в пределах прямоугольника.

Для выделения всей блок-схемы следует использовать команду Select All (выделить все) из меню Правка (Edit) или комбинацией клавиш [Ctrl+A].

Копировать блоки из одного окна в другое можно с помощью нескольких алгоритмов действий. Их можно копировать из библиотеки или модели-прототипа перемещением в нужный блок удержанием мышью. Нужный блок выделяется, подхватывается мышью нажатием левой кнопки и, не отпуская кнопку, перемещается в рабочее окно.

Блоки можно копировать при помощи стандартных команд меню:

- в окне библиотеки или модели-прототипа выделяется блок или несколько блоков, подлежащих копированию;

- выбирается команда Копировать (Copy) в меню Правка (Edit) активного окна;

- активизируется рабочее окно, куда нужно скопировать выделенные блоки, и выполняется команда Вставить (Paste) из меню Правка.

Каждому скопированному блоку Simulink присваивает собственное имя, которое может быть изменено пользователем. Чтобы изменить имя блока нужно сделать щелчок на имени этого блока, а затем в появившемся окне имени блока произвести необходимые текстовые изменения. При копировании блока сохраняются значения его настраиваемых параметров.

Перестановка блоков внутри модели осуществляется путем перемещения мышью. При этом Simulink автоматически переносит линии, связывающие этот блок с другими блоками.

Установка параметров блока осуществляется в окне настройки, которое вызывается двойным щелчком левой кнопки мыши на изображении блока в блок-схеме.

Для удаления ненужных блоков из блок-схемы нужно выделить эти блоки и нажать клавишу Delete.

Блоки объединяются в модель с помощью соединительных линий. Чтобы соединить выходной порт

одного блока с входным портом другого блока нежно выполнить следующие команды: установить курсор на выходной порт первого блока, при этом курсор принимает форму перекрестия; нажать левую кнопку мыши и, удерживая её в этом положении, передвинуть курсор к входному порту второго блока; после чего кнопка мыши отпускается.

Для создания линии ответвления нужно установить курсор в точку ответвления, нажать правую кнопку мыши и, удерживая её нажатой, перевести курсор к нужному порту блока. Затем отпустить кнопку мыши.

Чтобы отсоединить блок от линии, нужно нажать клавишу Shift и, не отпуская её, переместить блок в другое место.

Блок-схему можно вставить в документ текстового редактора Word. Для этого следует использовать команду [Копируй модель (Copy Model)] из меню [Правка (Edit)] окна модели, а затем, перейдя в окно текстового редактора, нажать комбинацию клавиш [Shift+Ins].

В решении задач лабораторного практикума можно выделить четыре уровня построения математической модели электрической машины:

- моделирование отдельной характеристики машины по частным уравнениям этой характеристики или расчет переменной по частному уравнению машины;
- моделирование различных характеристик по основным уравнениям статического режима электрической машины;
- моделирование характеристик по основным уравнениям динамических режимов электрической машины, т.е. дифференциальным уравнениям;
- использование специальных и универсальных моделей электрических машин, содержащихся в библиотеке пакета “MatLab 6.0 – Simulink”.

Модель каждого из представленных уровней имеет свои достоинства и недостатки, свою область применения. Модель по частному уравнению (или нескольким уравнениям) характеристики как правило наиболее проста для понимания и предпочтительна в начальный период изучения электрических машин. Однако такие модели решают узкий круг задач.

В качестве примера рассмотрим модель для исследования скоростной характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Характеристика представляет зависимость частоты вращения двигателя  $\Omega$  от тока якоря  $I_a$  при постоянном напряжении на якоре и постоянном токе возбуждения и описывается уравнением

$$\Omega = \frac{U_a - R_a I_a}{C\Phi} = \frac{U_a - R_a I_a}{KC \frac{U_\epsilon}{r_\epsilon}}, \quad (7.1)$$

где  $U_a$ ,  $U_\epsilon$  – напряжение соответственно на якоре и обмотке возбуждения,  $I_a$ , – токи якоря,  $\Phi$  – магнитный поток полюса,  $K$  и  $C$  – конструктивные постоянные машины (коэффициенты),  $R_a$ ,  $r_\epsilon$  – сопротивления цепи обмоток якоря и возбуждения.

Вычислительная модель по уравнению (7.1) представлена на рис.7.1.

Задавая различные значения тока  $I_a$ , получаем расчетные значения частоты вращения  $\Omega$  (на схеме W). По расчетным точкам строим характеристику  $\Omega=f(I_a)$ .

После небольшой корректировки модель может быть использована для исследования регулировочных характеристик ДПТ, т.е. зависимости частоты вращения

двигателя от напряжения на якоре или напряжения на

Рис. 7.1. Математическая модель по частному уравнению скоростной характеристики ДПТ

обмотке возбуждения при заданном токе якоря. В этом случае задают различные значения одного из напряжений, имитируя его регулирование, и фиксируют частоту вращения. Другое напряжение, а также ток якоря остаются постоянными величинами.

Модель можно усовершенствовать заданием тока  $I_a$  как переменной величины и автоматическим построением характеристики в ортогональных координатах  $[I_a, \Omega]$ . С этой целью независимую переменную величину (аргумент)  $I_a$  задают виде монотонно возрастающей функции, используя вместо блока  $I_a$  блок *Ramp* из библиотеки Sources программы Simulink, а также дополнительный графопостроитель Graph. Получим модель по рис. 7.2.

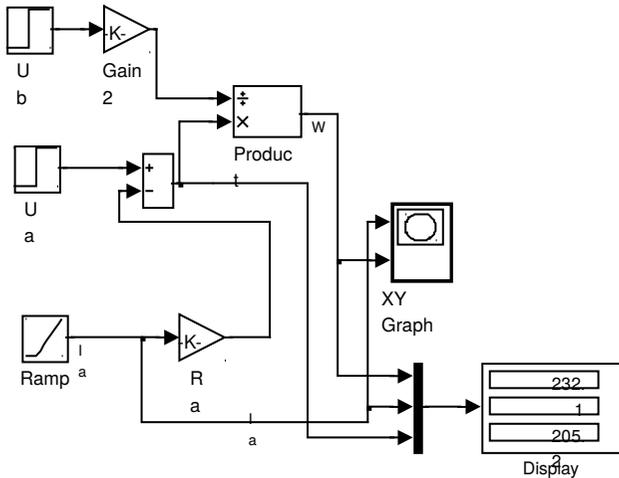


Рис. 7.2. Модель скоростной характеристики с графопостроителем

Более сложные модели, как правило, являются и более универсальными, позволяют исследовать несколько разных характеристик или относительно сложные процессы. Рассматриваемая скоростная характеристика может моделироваться по основным уравнениям статического режима ДПТ. Эти уравнения имеют вид:

$$U_6 = r_e I_6; C\Phi = kI_6;$$

$$U_a = E_a + R_a I_a;$$

$$E_a = C\Phi\Omega;$$

$$M = C\Phi I_a;$$

$$P_1 = U_a I_a + U_6 I_6;$$

$$P_{эм} = M\Omega = E_a I_a;$$

$$P_2 = P_{эм} - (\Delta p_{маг} + \Delta p_{мех});$$

$$M_2 = M - (\Delta p_{маг} + \Delta p_{мех})/\Omega = P_2/\Omega;$$

$$\eta = P_2/P_1;$$

$$\Delta p_{маг} + \Delta p_{мех} = P_{эмн} - P_n = (U_n - R_a I_n) I_n - P_n,$$

где  $E_a$  - ЭДС якоря,  $I_6$  - ток возбуждения,  $M$  - электромагнитный момент,  $M_2$  - момент на валу;  $P_1$ ,  $P_{эм}$  и  $P_2$  - электрическая (потребляемая), электромагнитная и

механическая (отдаваемая) мощность двигателя,  $\Delta p_{\text{маг}}$  и  $\Delta p_{\text{мех}}$  – мощность потерь магнитных и механических, которые могут быть приближенно приняты постоянными величинами,  $\eta$  – коэффициент полезного действия двигателя.

Составленная по этим уравнениям модель представлена на рис. 7.3.

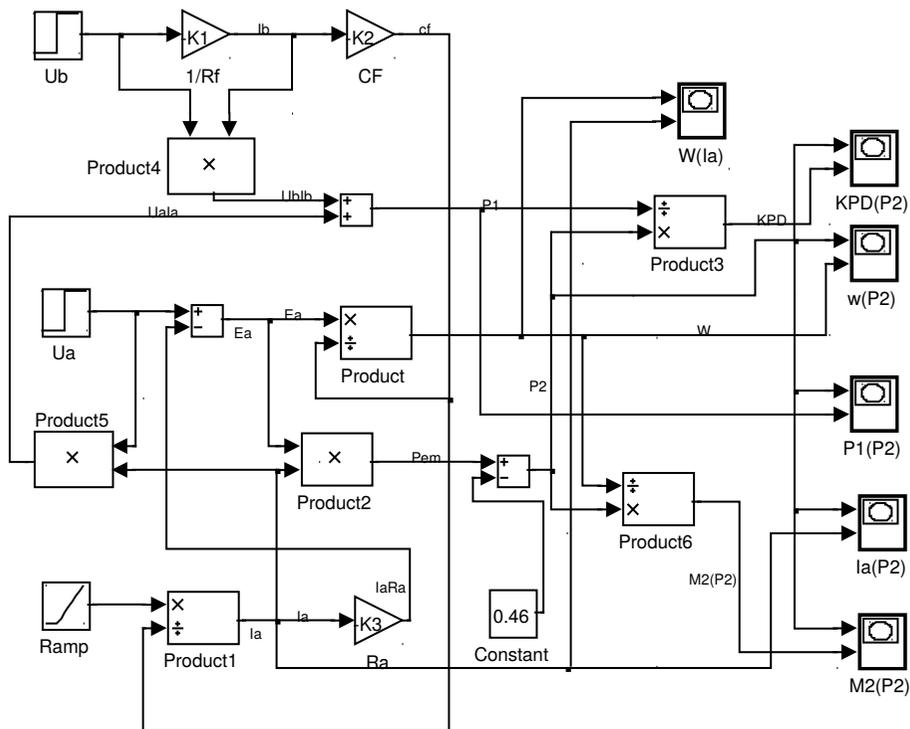


Рис 7.3. Математическая модель ДПТ по основным уравнениям статического режима

Вывод на дисплей или графопостроитель переменных  $I_a$  и  $\Omega$  при изменяемой величине момента, позволит фиксировать скоростную характеристику ДПТ. Вывод других переменных величин позволит получить и другие

характеристики двигателя, что делает модель более универсальной в сравнении с моделью первого типа.

Уравнения динамических электромагнитных и электромеханических процессов ДПТ имеют вид:

$$\begin{aligned}
 u_b &= L_b \frac{di_b}{dt} + r_b i_b; \\
 u_a &= L_a \frac{di_a}{dt} + r_a i_a + e_a; \\
 J \frac{d\omega}{dt} &= M - M_c; \\
 \Phi &= k_\phi i_b; \\
 e_a &= k_E \omega \Phi; \\
 M &= k_M i_a \Phi,
 \end{aligned}$$

где  $L_a$ ,  $L_b$  – индуктивности обмоток якоря и возбуждения,  $M_c$  – момент сопротивления на валу двигателя,  $J$  – момент инерции вращающихся частей,  $\omega$  – частота вращения двигателя. Выраженные в относительных единицах и приведенные в операторную форму эти уравнения принимают вид [5]

$$\begin{aligned}
 U_b &= (sT_b + 1)i_b; \\
 U_a &= (sT_a + 1)i_a + \omega \Phi; \\
 sT_m \omega &= \Phi i_a - M_c; \\
 \Phi &= k_\phi i_b,
 \end{aligned}$$

которым соответствует модель на рис. 7.4.

Модель имеет три входа управления:  $U_a$  – по цепи якоря,  $U_b$  – по цепи возбуждения и  $M$  – по моменту нагрузки. Блок Transfer Fcn моделирует цепь возбуждения (постоянная времени цепи возбуждения принята 0,01 с). Блок Transfer Fcn1 моделирует цепь якоря (постоянная времени 0,01 с). Блоки Sum1, Gain, Integrator реализуют третье уравнение системы. Влияние производных,

отражающих переходные электромагнитные и электромеханические процессы в машине и не, целесообразно минимизировать заданием малых значений  $T_i$  (коэффициентов при  $s$ ).

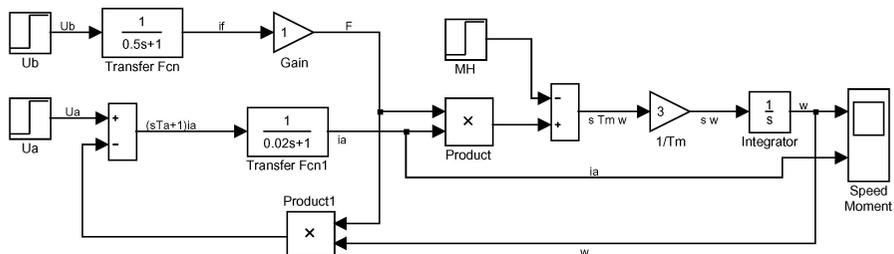


Рис. 7.4. Модель двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Наконец, скоростную характеристику можно исследовать на базе модели двигателя постоянного тока (DC Machine) библиотеки Simulink, расположенной в блоке Machines. Модель такого вида представлена на рис. 7.5.

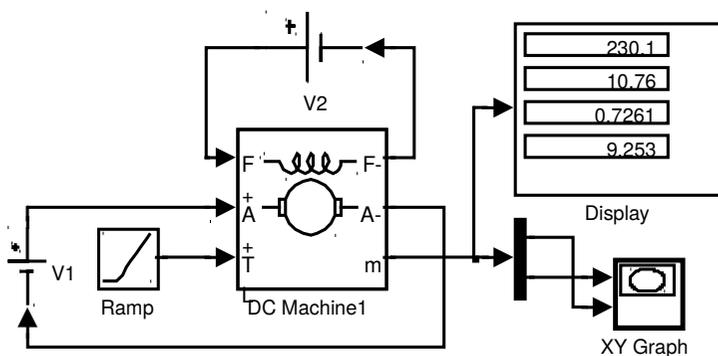


Рис. 7.5. Модель машины постоянного тока независимого возбуждения

Эта модель, несмотря на развитую внутреннюю структуру, требует осуществления дополнительных вычислительных операций для определения ряда переменных, таких как мощность на валу, электромагнитная мощность, потребляемая мощность, КПД и другие. Эти вычисления могут выполняться как дополнительные операции «вручную», или осуществляться автоматически использованием вычислительных блоков, дополняющих математическую модель.

Выбор метода моделирования и базовой математической модели для исследования каждой из характеристик или процесса является важной самостоятельной задачей исследования, и определяется целесообразностью, а также уровнем подготовленностью пользователя. В виртуальных лабораторных работах настоящего пособия используются модели разного уровня, поскольку ставится задача изучения и освоения различных методов моделирования электрических машин. При этом модель для исследования машины или трансформатора задается пособием.

## ГЛАВА ВОСЬМАЯ

### ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

#### **РАБОТА № 19. Исследование характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения**

**Цель работы:** исследование статических характеристик и способов регулирования скорости двигателя постоянного тока (ДПТ).

**Содержание работы:**

1. Снять скоростную характеристику двигателя при номинальном напряжении на якоре и обмотке возбуждения. Снять скоростную характеристику двигателя при ненормальных значениях напряжении на якоре и обмотке возбуждения.
2. Снять регулировочную характеристику при изменении напряжения на якоре.
3. Снять регулировочную характеристику при изменении напряжения на обмотке возбуждения.
4. Снять рабочие характеристики ДПТ независимого возбуждения.

#### **Подготовка к работе**

Для выполнения работы пользователю необходимо иметь ПК с пакетом «MatLab 6.0 – Simulink». Необходимо изучить теоретический материал: принцип действия двигателя постоянного тока [1, 4], основные схемы возбуждения ДПТ, основные уравнения статического режима ДПТ, уравнение скоростной характеристики, регулирование частоты вращения ДПТ, рабочие и регулировочные характеристики ДПТ.

Принципиальная схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения с регулируемыми напряжениями на якоре и на обмотке возбуждения приведена на рис.8.1.

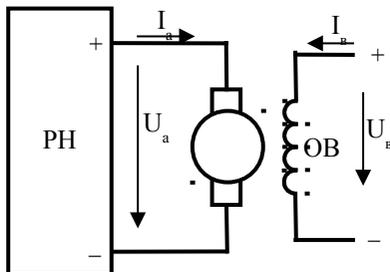


Рис.8.1. Схема включения ДПТ независимого возбуждения: РН – регулятор напряжения, Д – якорная обмотка двигателя, ОВ – обмотка возбуждения

По справочной литературе [8] или заданию преподавателя необходимо выбрать тип двигателя постоянного тока, подвергаемого виртуальным испытаниям, и записать в отчет его паспортные данные. При отсутствии справочной литературы можно использовать паспортные данные, приведенные в табл. 19.1.

Таблица 19.1. Паспортные данные двигателя постоянного тока

Тип двигателя	$P_n$ , кВт	$U_n$ , В	$n_n$ , об/мин	$\eta_n$ , %	$R_a + R_{доб}$ , Ом	$U_{вн}$ , В	$R_v$ , Ом	$L_a$ , мГн
2ПБ112Л	1,5	220	2240	80	1,48	220	303	12

На основании паспортных данных необходимо вычислить дополнительные номинальные величины:

$P_{I_n} = P_n / \eta_n$  - электрическая мощность двигателя в номинальном режиме;

$I_n = P_{I_n} / U_n$  - номинальный ток двигателя;

$\Omega_n = \pi n_n / 30$  - номинальная частота вращения двигателя;

$M_n = P_n / \Omega_n$  - номинальный момент;

$E_a = U_n - I_n (R_a + R_{доб})$  - ЭДС якоря в номинальном режиме;

$C\Phi_n = E_a / \Omega_n$  - магнитный поток  $\Phi_n$  (с коэффициентом  $C$ );

$M_{эм} = C\Phi I_n$  - электромагнитный момент в номинальном режиме;

$P_{эм} = E_a I_n$  - электромагнитная мощность в номинальном режиме;

$I_{вн} = U_{вн} / R_e$  - номинальный ток возбуждения;

$k = C\Phi_n / I_{вн}$  - коэффициент;

$\Omega_0 = U_n / C\Phi_n$  - частота вращения при идеальном холостом ходе.

### Выполнение работы

Для исследования скоростной характеристики необходимо собрать блок-схему математической модели по рис. 8.2. Блок-схема содержит блоки задания входных напряжений на якорь и на обмотке возбуждения в виде постоянных величин, задания тока якоря в виде линейной возрастающей функции. Используются вычислительные блоки сложения (Sum) и умножения переменных (Product), умножения на постоянную величину (усилитель Gain2). Результаты вычислений представляются в графической форме графопостроителем XY Graph.

Задание значений входных величин и вычисление переменных величин производится в именованных единицах. Численное значение напряжений задается из таблицы 19.1. Значение «плиты» блока  $I_a$  задается равным 1, а время начала и исходного выхода задать равными нулю. Величина коэффициента усиления блока Gain2 равна  $k = C\Phi_n / U_{вн}$ . Коэффициент усиления блока  $R_a$  равен величине  $R_a + R_{доб}$ . При настройке блока XY Graph значения X (ток якоря) за-

даются от нуля до  $1,2I_n$ , а  $\gamma$  (частота вращения) от нуля до  $1,5\Omega_n$ .

После установки значений параметров блоков дать команду «start» в блоке Simulation на выполнение расчетов. Полученную в поле XY Graph характеристику ДПТ представить в отчете по лабораторной работе. Характеристика получается в виде прямой линии, слабо наклоненной вниз и проходящей через точку с координатами  $[0; \Omega_0]$ .

Далее следует изменить значение задаваемого напряжения  $U_a$ , приняв его в диапазоне  $(0,5 \dots 0,8)U_n$ , и повторить моделирование характеристики. Результаты представить в отчете.

Затем следует установить прежнее значение напряжения на якоре  $U_a = U_n$  и изменить напряжение блока  $U_b$ , приняв его равным  $(0,5 \dots 0,8)U_{вн}$ . Результат моделирования также нужно привести в отчете.

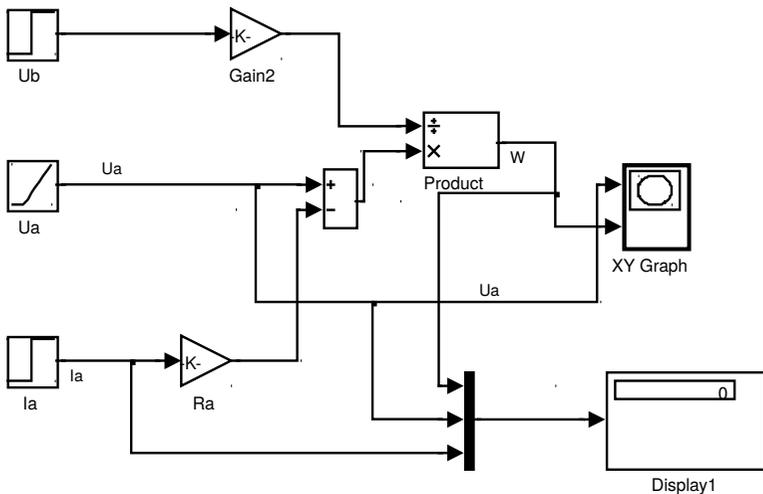


Рис. 8.2. Блок-схема исследования регулировочной характеристики при регулировании напряжения на якоре

Для снятия регулировочных характеристик при изменении напряжения на якоре или на обмотке возбуждения схема изменяется, как показано на рис.8.2. и рис.8.3. Независимой переменной становится одно из указанных напряжений, а ток якоря задается постоянным, равным номинальному или его значение выбирают в диапазоне  $(0,5 \dots 1,0) I_n$ .

Регулируемое напряжение изменяется от 0 до номинального, для чего в блоке Ramp (см. рис.8.18) блока задания напряжения устанавливают параметры: плита – 1; время начала – 0; исходный выход – 0.

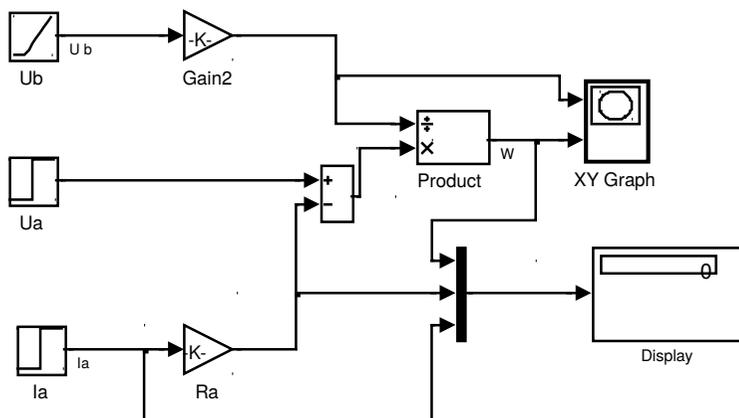


Рис. 8.3. Блок-схема исследования регулировочной характеристики при регулировании напряжения возбуждения (магнитного потока)

Рабочие характеристики представляют зависимость переменных величин машины: потребляемой мощности  $P_1$ , момента  $M$ , тока якоря  $I_a$ , частоты вращения  $\Omega$  или скорости  $n$ , КПД  $\eta$  от мощности нагрузки (механической мощности) на валу  $[P_1, M, I_a, \Omega \text{ (или } n), \eta = f(P_2)]$ . Для снятия рабочих характеристик необходимо собрать блок-схему по рис. 7.3 предыдущей главы. Блок XY Graph  $W(I_a)$  можно не устанавливать.

Входными величинами являются напряжения на якоре и возбуждения (блоки  $U_a$  и  $U_b$ ), постоянные потери в двигателе (Constant); изменяемой независимой величиной (Ramp) является момент на валу.

Блокам входных напряжений  $U_a$  и  $U_b$  следует задать номинальное значение напряжений. Блоку Constant задается значение, равное  $(0,02...0,05)P_n$ . Блок Ramp изменяет входной сигнал в диапазоне от нуля до  $1,2M_n$ . Коэффициент усиления блока К1 равен  $1/R_{\phi}$ , блока К2  $k = C\Phi_n/I_{\phi n}$ , блока К3  $R_a + R_{\text{доб}}$ .

Схема предполагает вывод результатов моделирования в графической форме блоками XY Graph. Блок КРД(P2) выводит на экран зависимость КПД от механической мощности [ $\eta = f(P_2)$ ]; блок  $\omega$ (P2) - зависимость частоты вращения от этой мощности [ $\Omega = f(P_2)$ ]; нижние блоки соответственно выводят на экран электрическую мощность  $P_l$ , ток якоря  $I_a$ , момент на валу  $M_2$  в функции механической мощности.

Минимальные и максимальные величины по оси X (переменная  $P_2$ ) всех блоков XY Graph устанавливаются соответственно нулевое и  $P_2 = 1,2P_n$ . По оси Y блока КРД(P2) от 0 до 1, блока  $\omega$ (P2)  $0,5\Omega_n$  и  $1,4\Omega_n$  (или иной по подбору опытным путем), P1(P2) – нулевое и  $1,4P_n$ ,  $I_a$ (P2) - нулевое и  $1,4I_n$ , M2(P2) - нулевое и  $1,4M_n$ .

Результаты моделирования рабочих характеристик приводятся в отчете.

### **Содержание отчета**

1. Название и цель работы.
2. Схема включения ДПТ независимого возбуждения.
3. Паспортные данные двигателя, принятого для виртуального моделирования.
4. Результаты расчетов дополнительных номинальных величин двигателя.
5. Блок-схема исследования скоростной характеристики ДПТ.

6. Скоростные характеристики ДПТ при номинальных и ненормальных напряжениях на якоре и обмотке возбуждения.

7. Блок-схемы исследования регулировочных характеристик.

8. Регулировочные характеристики при регулировании напряжения на якоре и на обмотке возбуждения.

9. Блок-схема исследования рабочих характеристик.

10. Рабочие характеристики.

11. Выводы по работе. В выводах отразить диапазон изменения скорости при изменении тока нагрузки, возможность регулирования скорости двигателя, изменение КПД при изменении механической нагрузки и иные обстоятельства по усмотрению студента.

### **Контрольные вопросы**

1. Разъясните назначение каждого из элементов блок-схем исследования характеристик двигателя.

2. Какой вид имеет скоростная характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения? Укажите причину изменения частоты вращения двигателя при изменении тока якоря.

3. Как изменяют направление вращения ДПТ?

4. Где располагается обмотка возбуждения в конструкции двигателя независимого возбуждения?

5. Как изменяется частота вращения двигателя при уменьшении напряжения на якоре?

## **РАБОТА № 20. Исследование двигателя постоянного тока последовательного возбуждения**

**Цель работы:** исследование статических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения на основе стандартной математической модели машины библиотеки Simulink.

### Содержание работы:

1. Снять скоростную характеристику двигателя при номинальном напряжении питания.
2. Снять рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения.
3. Снять скоростную характеристику двигателя при ненормальном напряжении питания.
4. Снять регулировочную характеристику при изменении напряжения на двигателе.

### Подготовка к работе

Для выполнения работы пользователю необходимо иметь ПК с пакетом «MatLab 6.0 – Simulink».

Необходимо изучить теоретический материал: принцип действия двигателя постоянного тока, основные схемы возбуждения ДПТ, основные уравнения статического режима ДПТ, уравнение скоростной характеристики, регулирование частоты вращения ДПТ, рабочие и регулировочные характеристики.

Принципиальная схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с регулируемым напряжением питания приведена на рис.8.4.

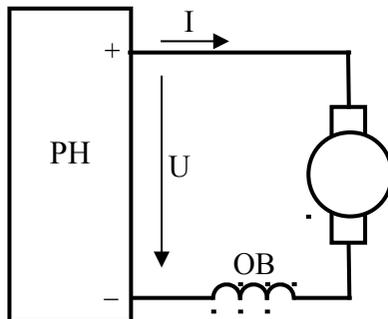


Рис. 8.4. Схема включения ДПТ последовательного возбуждения

По справочной литературе [8] или заданию преподавателя необходимо выбрать тип двигателя постоянного тока, подвергаемого виртуальным испытаниям, и записать в отчет его паспортные данные. При отсутствии справочной литературы можно использовать паспортные данные, приведенные в табл. 20.1.

Таблица 20.1. Паспортные данные двигателя постоянного тока

Тип двигат еля	$P_n$ , кВт	$U_n$ , В	$I_n$ , А	$n_n$ , об/мин	$\eta_n$ , %	$R_a+R_{доб}$ , Ом	$R_b$ , Ом	$L_a$ , мГн
ДП-12	3,0	200	19	960	78,95	1,13	0,59	12

На основании паспортных данных вычислить номинальные величины:

- электрическую мощность двигателя в номинальном режиме  $P_{In}=P_n/\eta_n$ ;

- номинальный ток двигателя  $I_n = P_{In}/U_n$ ;

- номинальную частоту вращения двигателя

$$\Omega_n = \pi n_n / 30;$$

- номинальный момент  $M_n = P_n / \Omega_n$ ;

- ЭДС якоря в номинальном режиме

$$E_a = U_n - I_n (R_a + R_{доб} + R_b);$$

- магнитный поток  $\Phi_n$  (с коэффициентом  $C$ )

$$C\Phi_n = E_a / \Omega_n;$$

- электромагнитный момент в номинальном режиме

$$M_{эм} = C\Phi I_n;$$

- электромагнитную мощность в номинальном режиме  $P_{эм} = E_a I_n$ ;

- коэффициент  $k = C\Phi_n / I_{бн}$ .

Виртуальная установка испытания ДПТ последовательного возбуждения представлена на рис. 8.5.

Она включает собственно машину постоянного тока DC Machine из библиотеки Power System Blockset/Machines, источник постоянного напряжения V из библиотеки

Power System Blockset/Electrical Sources, блок Moment задания момента на валу двигателя (блок Constant из библиотеки Simulink/Sources), блок измерения переменных состояния машины Display библиотеки Simulink/Sinks.

### Выполнение работы

Составляется модель испытания двигателя по рис. 8.4.

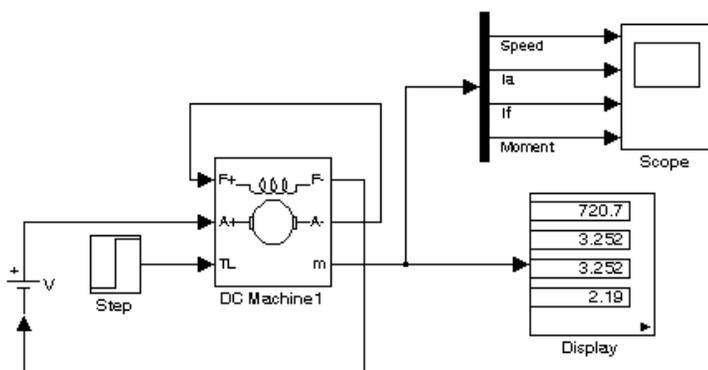


Рис. 8.5. Модель испытания двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

В окне настройки параметров МПТ необходимо задать параметры, указанные на рис. 8.6.

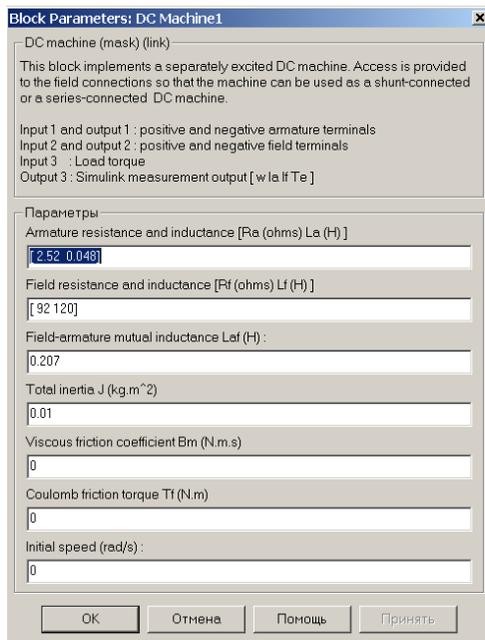


Рис. 8.6. Окно настройки параметров ДПТ

В окне задания напряжения источника задается напряжение 200 В (окно настройки не показано). Окно задания параметров моделирования показано на рис. 8.7.

Для снятия скоростной характеристики при номинальном напряжении необходимо последовательно задавать разные значения момента  $M$  в диапазоне  $(0,2 \dots 1,2)M_n$  и заполнить результатами измерения и вычисления таблицу 20.2.

Таблица 20.2. Характеристики ДПТ последовательного возбуждения при регулировании нагрузки

Момент на валу	Измерения		Расчет		
	$M, \text{ Нм}$	$\Omega, \text{ рад/с}$	$I, \text{ А}$	$P_1, \text{ Вт}$	$P_2, \text{ Вт}$
0,2					
...					
1,2 $M_n$					

Расчеты выполняются по формулам:

$$P_1 = UI; \quad P_2 = M \Omega; \quad \eta = P_2 / P_1.$$

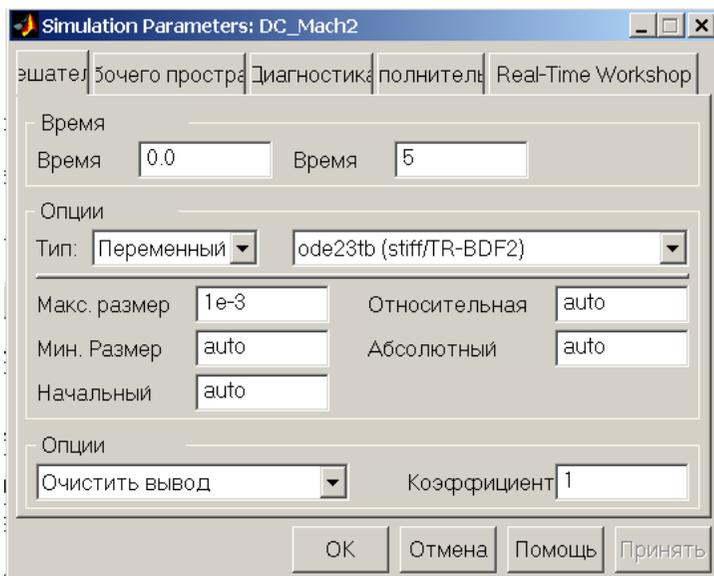


Рис. 8.7. Окно задания параметров моделирования

По данным таблицы 20.2. необходимо построить два графика: скоростную характеристику (зависимость  $\Omega = f(I)$ ) и рабочую характеристику (зависимость  $P_1, I, M, \Omega, \eta = f(P_2)$ ) при  $U = U_n$ .

Для снятия скоростной характеристики при ненормальном напряжении питания в блоке источника электроэнергии  $V$  необходимо задать уменьшенное до  $(0,5 \dots 0,8)U_n$  напряжение питания и повторить предыдущий опыт с записью показаний в таблицу 20.3.

Таблица 20.3. Скоростная характеристика ДПТ последовательного возбуждения при напряжении  $U = \dots V$

М, Нм	0,2					1.2M <sub>n</sub>
Ω, рад/с						
I, А						

Для снятия регулировочной характеристики следует задать момент постоянной величиной, выбранной произвольно в диапазоне  $(0,5 \dots 1,0)M_n$ , а в блоке источника питания  $V$  изменять напряжение в диапазоне  $(0,2 \dots 1,0)U_n$ . Данные моделирования записать в таблицу 20.4.

Таблица 20.4. Регулировочная характеристика ДПТ последовательного возбуждения

U, В	0,2U <sub>n</sub>						1,0U <sub>n</sub>
Ω, рад/с							

По данным таблицы 20.4. построить регулировочную характеристику (*зависимость  $\Omega=f(U)$* ).

#### **Содержание отчета.**

В отчете по лабораторной работе должны быть приведены:

1. Название и цель работы.
2. Схема включения ДПТ последовательного возбуждения.
3. Паспортные данные двигателя, принятого для виртуального моделирования.
4. Результаты расчетов дополнительных номинальных величин двигателя.
5. Блок-схема исследования ДПТ.
6. Скоростные характеристики ДПТ при номинальном и ненормальном напряжении на двигателе.
7. Рабочие характеристики.
8. Регулировочная характеристика.
9. Выводы по работе. В выводах отразить диапазон изменения скорости при изменении тока нагрузки, возможность регулирования скорости двигателя, изменение КПД при изменении механической нагрузки и иные обстоятельства по усмотрению студента.

### **Контрольные вопросы**

1. Укажите назначение каждого из элементов блок-схемы экспериментального исследования двигателя.
2. Чем объясняется значительное изменение частоты вращения двигателя последовательного возбуждения при изменении тока якоря?
3. Как проводится опыт по снятию регулировочной характеристики  $\Omega=f(I_B)$ ?
4. Какими способами регулируется частота вращения ДПТ в лабораторной работе?
5. Назовите главное преимущество двигателя последовательного возбуждения в сравнении с двигателем параллельного возбуждения.

### **РАБОТА № 21. Исследование однофазного трансформатора**

**Цель работы:** исследование работы однофазного трансформатора при нагрузке.

#### **Содержание работы:**

1. Экспериментальное определение параметров схемы замещения трансформатора.
2. Определение нагрузочной и рабочих характеристик трансформатора.

#### **Описание виртуальной лабораторной установки**

Виртуальная лабораторная установка представляет собой электронную модель трансформатора, источника питания, нагрузки трансформатора и измерительных приборов.

Виртуальные модели трансформаторов содержатся в библиотеке Powerlib2/Elements пакета расширения Power system, где имеются две модели однофазного трансформатора – линейный (Linear Transformer) и транс-

форматор с нелинейной характеристикой намагничивания сердечника (Saturable Transformer).

В основу модели положена схема замещения приведенного трансформатора, представленная на рис. 8.8. Физический аналог каждого из сопротивлений схемы замещения раскрыт в [2].

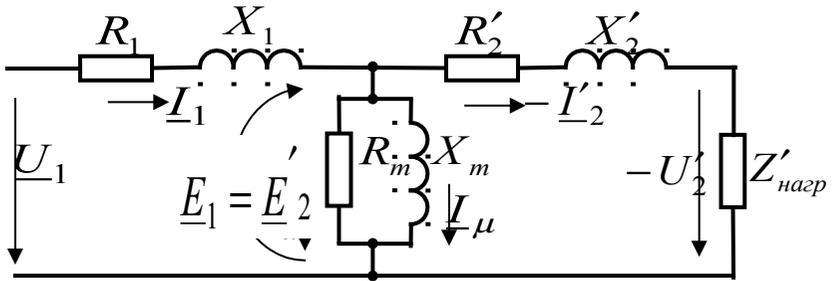


Рис. 8.8. Схема замещения приведенного трансформатора

Параметры схемы замещения трансформатора задаются в относительных единицах. За базовые значения параметров трансформатора принимаются полная мощность  $S$  ( $S=P_n$ , ВА), номинальная частота  $f_n$  (Гц), действующее значение номинального напряжения (В) соответствующей обмотки. Для обеих обмоток (первичной и вторичной) относительное сопротивление и индуктивность определяются выражениями:

$$R_i(pu) = \frac{R_i(OM)}{Z_{bi}}; \quad L_i(pu) = \frac{x_i(OM)}{Z_{bi}},$$

$$Z_{bi} = \frac{U_i^2}{S},$$

где  $i$  – индекс обмотки (1 для первичной и 2 для вторичной обмотки).

Расчет параметров трансформатора в относительных единицах осуществляется на основании паспортных данных завода-изготовителя по уравнениям:

$$R_m (pu) = \frac{R_0}{Z_b} = \frac{S}{U_1 I_{10} \cos \varphi_0},$$

$$L_m = \frac{x_0}{Z_b} = \frac{S}{U_1 I_{10} \sin \varphi_0}, \quad \varphi_0 = \arccos \frac{P_{10}}{U_1 I_{10}},$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2Z_{b1}} = \frac{SU_k \cos \varphi_k}{2U_1^2 I_{1H}},$$

$$L_1 = L_2 = \frac{x_k}{2Z_b} = \frac{SU_k \sin \varphi_k}{2U_1^2 I_{1H}}, \quad \varphi_k = \arccos \frac{P_k}{U_k I_{1H}}.$$

Листинг программы расчета параметров трансформатора в пакете Matlab приведен в таблице 21.1.

Листинг 21.1.

---

```

_____%Паспортные данные SH=10e3; UH=660; Pkz=280;
Curr=7; Uolt=4,5;
%Холостой ход IH=SH/UH; I0= Curr*IH/100; S0=UH*10;
cosF0=P0/S0; Z0=UH/10; R0=Z0/ cosF0; X0=Z0/sqrt(1-
cosF0^2); Zb=(UH)^2/SH; Rm=R0/Zb; Lm=X0/Zb; % Ко-
роткое замыкание Ukz=(Uolt/100)*UH; Zkz=Ukz/IH; cos-
Fkz=Pkz/(Ukz*IH); Rkz=Zkz*cosFkz; Xkz=Zkz*sqrt(1-
cosF0^2); R1=0.5*Rkz/Zb; L1=0.5*Xkz/Zb;
% Вывод значений [I0 Rm Lm; Ukz R1 L1

```

---

\_\_\_\_ Модель для исследования трансформатора представ-  
лена на рис. 8.9.

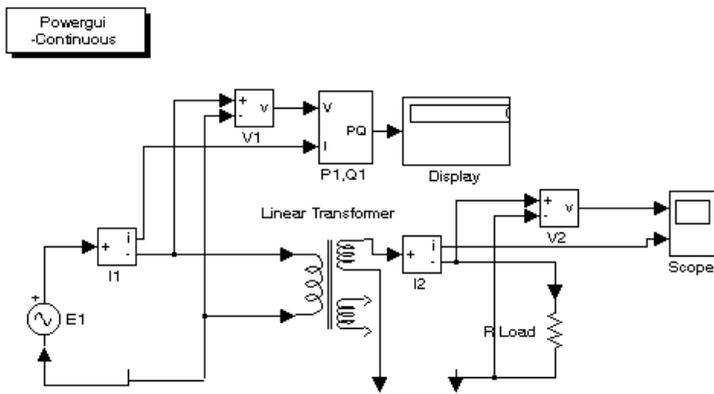


Рис. 8.9. Модель для исследования однофазного трансформатора

Представленная на рис. 8.9. модель трансформатора содержит следующие элементы.

$E_1$  – источник переменной ЭДС из библиотеки Power System Blockset/Elekrtrical Sources;

$V_1, V_2$  – вольтметры в первичной и вторичной цепях трансформатора (Power System Blockset/Measurment);

$I_1, I_2$  – амперметры в цепи первичного и вторичного тока трансформатора (Power System Blockset/Measurment);

$P_1, Q_1; P_2, Q_2$  – ватт и варметры в цепях первичной и вторичной обмоток трансформатора (Power System Blockset/Extras/Measurment);

Powergui – блок пользователя, в который записываются результаты измерений блоков  $V_1, V_2, I_1, I_2$ ;

Display - блок демонстрации измеренных мощностей (библиотека Simulink/Sinks);

Load – блок, моделирующий нагрузку трансформатора (библиотека Powerlib2/Elements). Среди разновидностей представления нагрузки наибольший интерес представляет

Parallel RLC Load (параллельное соединение нагрузочных сопротивлений, заданных их электрическими мощностями).

Параметры трансформатора для выполнения лабораторной работы могут быть выбраны из таблицы 21.1, из справочной литературы или задаваться преподавателем.

Таблица 21.1. Паспортные данные серийных трансформаторов

Тип трансформатора	$S_n$ [кВА]	$U_k$ [%]	$P_k$ [Вт]	$P_{10}$ [Вт]	$I_{10}$ [%]
ТС-10/0,66	10	4,5	280	90	7
ТС-16/0,66	16	4,5	400	125	5,8
ТС-25/0,66	26	4,5	560	180	4,8
ТС-40/0,66	40	4,5	800	250	4,0
ТС-63/0,66	63	4,5	1090	355	3,3
ТС-100/0,66	100	4,5	1500	500	2,7
ТС-160/0,66	160	4,5	2060	710	2,3

Окно настройки параметров трансформатора показано на рис. 8.10.

В полях окна настройки задаются:

- полная мощность трансформатора  $S$  (в поле окна обозначена  $P_n$ ) в вольт-амперах и частота  $f_n$  в герцах;
- действующее значение напряжения в вольтах и активное сопротивление и индуктивность рассеяния первичной обмотки в относительных единицах (в окнах настройки  $r_1$  читаем как о.е.);
- действующее значение напряжения и параметры ветви вторичной обмотки в относительных единицах;
- параметры ветви намагничивания в относительных единицах;
- в выпадающем меню поля Measurements задаются

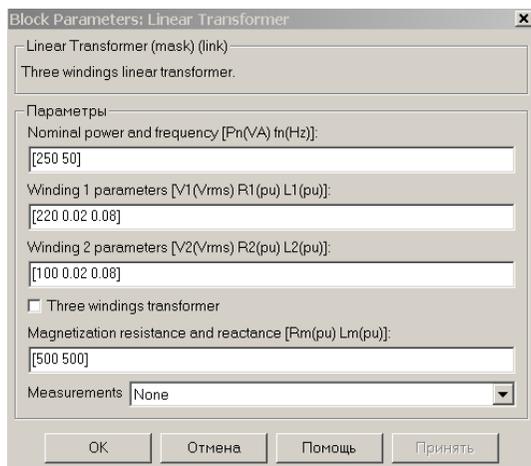


Рис. 8.10. Окно настройки параметров трансформатора

переменные состояния трансформатора, измеряемые блоком Multimeter. Поскольку блок Multimeter не используется, то в поле Measurements выбирается опция None.

Окно настройки параметров источника питания показано на рис. 8.11. Напряжение и частота источника должны соответствовать параметрам трансформатора (Peak amplitude (V)  $1,41 \cdot U_n$ ).

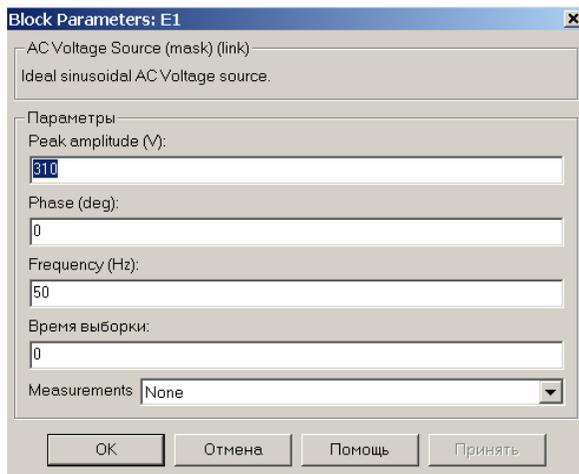


Рис. 8.11. Окно настройки параметров источника питания

Окно настройки параметров нагрузки показано на рис. 8.12.

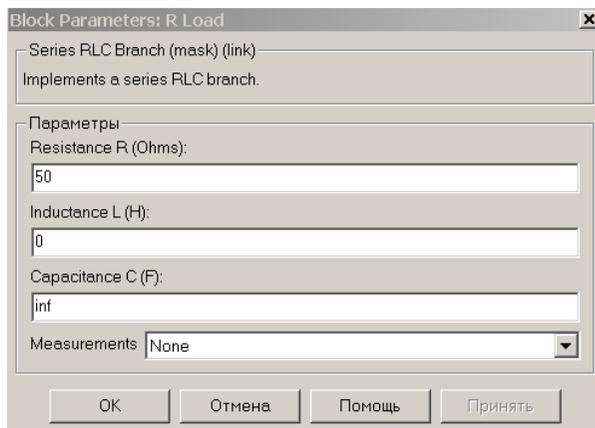


Рис. 8.12. Окно настройки параметров нагрузки

В полях окна нагрузки задаются номинальное действующее напряжение (В), номинальная частота (Гц), активная мощность  $P(W)$  (Вт), индуктивная реактивная мощность (QL) (вар) и емкостная реактивная мощность (Qc) (вар). При чисто активной нагрузке значения QL и Qc принимаются равными нулю. При смешанной нагрузке поддерживают постоянное значение коэффициента мощности ( $\cos\phi$ ), который задается преподавателем или выбирается студентом. При этом значение одной из реактивных мощностей принимается равной нулю, а значение другой определяется на основании известного соотношения между составляющими полной мощности:

$$Q(L,c) = P \operatorname{tg}\phi = P \operatorname{tg}(\arccos\phi).$$

В окне настройки параметров измерителя мощности указывается частота (50 Гц), на которой производятся измерения активной и реактивной мощности.

В полях окна настройки дисплея (рис.8.13) указывается формат представления числовых результатов (short), в поле Decimation (разбивка) задается число шагов вычисления, через которые расчетные значения выводятся на дисплей.

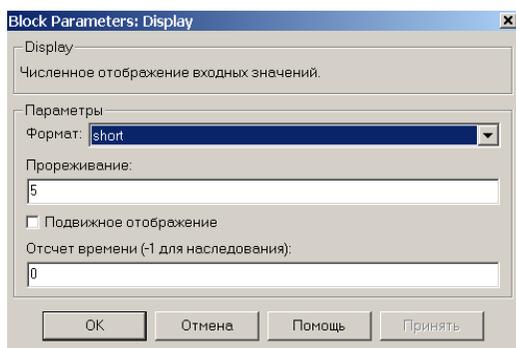


Рис. 8.13. Окно настройки дисплея

Окно настройки параметров моделирования заполняется как показано на рис. 8.14.

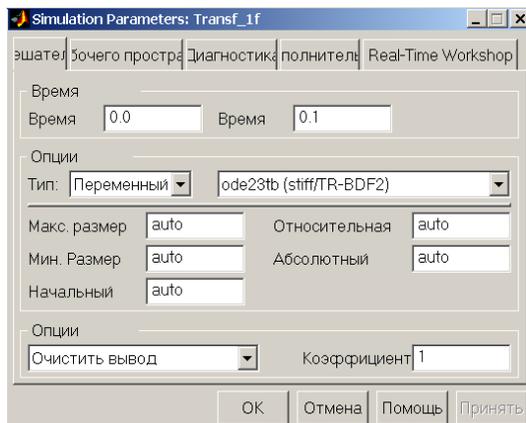


Рис. 8.14. Окно настройки параметров моделирования

### Порядок выполнения работы

Выберите тип трансформатора для проведения испытаний.

Определите параметры схемы замещения, используя листинг 21.1 или выполнив расчеты иным способом.

Заполните окна настройки параметров моделирования трансформатора, источника питания, нагрузки, измерителя мощности, настройки дисплея и параметров моделирования.

Выполните моделирование трансформатора при холостом ходе. Для этого разомкните цепь вторичной обмотки трансформатора и задайте напряжение питания, равное номинальному. Действующее значение напряжений и токов трансформатора при холостом ходе определяются в окне блока Powergui (рис. 8.15.).

Полученное значение тока холостого хода сравните с его паспортным значением и сделайте заключение о их

совпадении. По расчетным значениям  $U_1$ ,  $I_0$  определите сопротивления  $R_0$  и  $X_0$  и сравните с сопротивлением ветви намагничивания схемы замещения трансформатора.

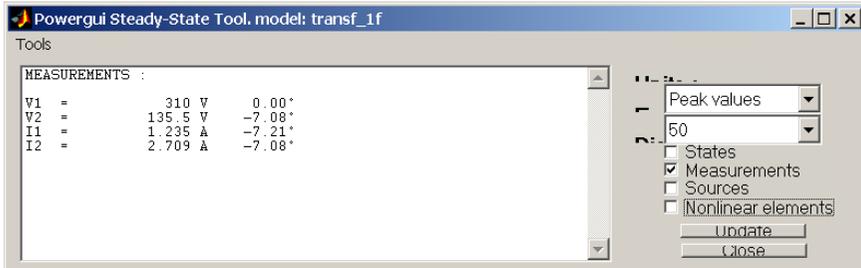


Рис. 8.15. Окно настройки блока Powergui

Опыт короткого замыкания проводится при коротком замыкании вторичной обмотки трансформатора. При этом напряжение источника питания должно быть равно напряжению короткого замыкания трансформатора (29,7 В). После проведения опыта по полученным значениям  $U_1=U_k$  и  $I_1=I_k$  следует рассчитать активное и индуктивное сопротивление трансформатора при к.з. и сравнить их с параметрами схемы замещения трансформатора. Напомним, что в схеме замещения выполняются соотношения  $R_1=R_2=0,5R_k$ ;  $X_1=X_2=0,5X_k$ .

При снятии рабочих характеристик трансформатора устанавливается номинальное напряжение источника питания; изменяются только параметры нагрузки. Нагрузка изменяется в диапазоне от 0 до 1,2 номинальной с шагом  $0,2S_n$ . Опыт проводится при чисто активной или смешанной нагрузке с  $\cos\varphi = \text{const}$ . Результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу 21.2.

Таблица 21.2. Рабочая и внешняя характеристики трансформатора

Измерения								Вычисления		
$P_1$ [Вт]	$Q_1$ [вар]	$U_1$ [В]	$I_1$ [А]	$P_2$ [Вт]	$Q_2$ [вар]	$U_2$ [В]	$I_2$ [А]	$\varphi_1$ [град]	$\cos\varphi_1$	$\eta$

Вычисления производятся по формулам:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; \quad \varphi_1 = \arctg \frac{Q_1}{P_1}.$$

По данным таблицы стоятся рабочие характеристики  $P_1, I_1, \cos\varphi_1, \eta = f(P_2)$  и внешняя характеристика  $U_2 = f(I_2)$ .

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая принципиальная схема включения однофазного трансформатора.
3. Номинальные данные трансформатора.
4. Схема замещения трансформатора с численными значениями параметров в относительных единицах.
5. Схема виртуальной модели трансформатора.
6. Расчетные значения из опытов холостого хода и короткого замыкания.
7. Таблица экспериментальных данных и графики рабочих и внешней характеристик трансформатора.

### Контрольные вопросы.

1. Укажите физический смысл каждого из элементов схемы замещения трансформатора.
2. Укажите назначение каждого их блоков виртуальной модели трансформатора.
3. Что означают термины «холостой ход» и «короткое замыкание» применительно к режимам работы трансформатора?
4. В чем причина изменения вторичного напряжения трансформатора при изменении его нагрузки?

## РАБОТА № 22. Исследование трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя

**Цель работы:** Исследование механической и рабочей характеристик трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя.

### Содержание работы:

1. Составить модель для исследования характеристик асинхронного двигателя и произвести её настройку.
2. Снять механическую характеристику асинхронной машины в двигательном и генераторном режимах.
3. Построить механическую характеристику по каталожным данным машины и сравнить её с механической характеристикой, полученной в пункте 2.
4. Снять рабочую характеристику двигателя.

### Описание виртуальной лабораторной установки

Виртуальная лабораторная установка представлена на рис. 8.16.

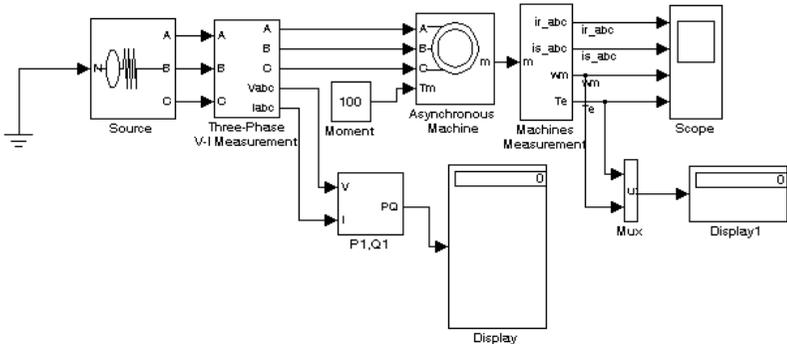


Рис. 8.16. Модель для исследования трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя

Она содержит:

- источник трехфазного напряжения Source из библиотеки Power System Blockset/Extras/Electrical Sources;
- измеритель трехфазного напряжения и тока Three-Phase V-I Measurement из библиотеки Power System Blockset/Extras/ Measurement;
- исследуемую трехфазную асинхронную машину *Asynhronous Machine* из библиотеки Power System Blockset/Machines;
- измеритель активной и реактивной мощности  $P_1$ ,  $Q_1$  из библиотеки Power System Blockset/Extras/ Measurement;
- блок *Display* для количественного представления измеренных мощностей и блок Scope для наблюдения тока ротора и статора, а также скорости и момента асинхронной машины из главной библиотеки Simulink/Sinks;
- блок *Moment* для задания момента на валу машины из главной библиотеки Simulink/Source;
- блок *Machines Measurement* из библиотеки Power System Blockset/Machines;
- блок *Display1* для демонстрации значений электромагнитного момента и частоты вращения машины из главной библиотеки Simulink/Sinks;
- блок *Mux*, объединяющий три сигнала в один векторный из главной библиотеки Simulink/Sygnal & System.

Окно настройки параметров асинхронной машины показано на рис. 8.17. В полях окна задаются:

- в первом поле - тип ротора, в выпадающем меню которого задается либо короткозамкнутый, либо фазный;
- во втором поле – система отсчета при анализе;
- в третьем поле – мощность, действующее линейное напряжение, частота и ток;
- в четвертом, пятом и шестом полях – параметры классической схемы замещения, статора, ротора и ветви намагничивания;

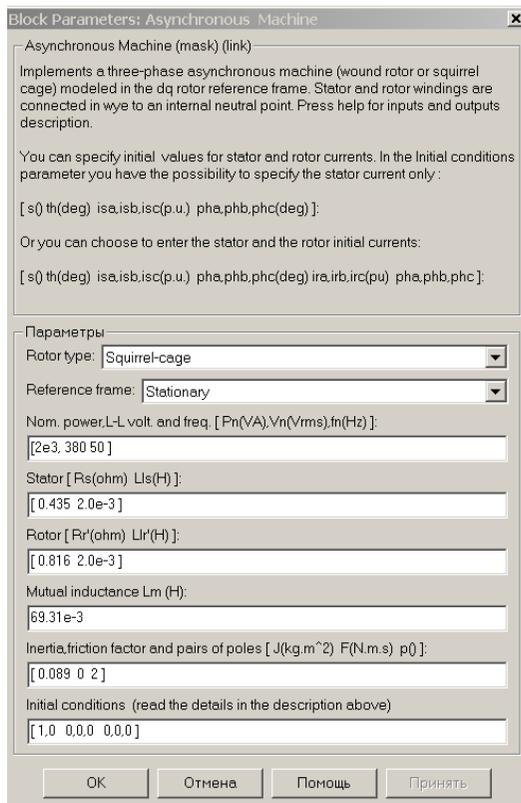


Рис. 8.17. Окно настройки параметров асинхронной машины

- в седьмом поле – момент инерции ротора, коэффициент вязкого трения (принимается равным нулю) и число пар полюсов;

- в последнем окне задаются начальные условия для моделирования – скольжение, положение ротора, токи статора и их начальные фазы.

Параметры схемы замещения определяются по каталожным данным (часть приведена в табл. 22.2) или рассчитываются по уравнениям машины на основании

паспортных данных (табл. 22.1). Тип двигателя задается преподавателем или выбирается студентом произвольно.

Таблица 22.1. Паспортные данные асинхронных двигателей

Тип двигателя	$P_n$ кВт	$n_{об}$ мин	$\eta$ %	$\cos\varphi$	$I_n$ А	$k_i = \frac{I_n}{I_n}$	$m_n = \frac{M_n}{M_n}$	$m_{макс} = \frac{M_{макс}}{M_n}$	$J$ кг*м <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RA80A2	0,75	2820	74	0,83	1,85	5,3	2,5	2,7	0,0008
RA80B4	0,75	1400	74	0,80	1,85	5,0	2,5	2,8	0,0023
RA90S2	1,5	2835	79	0,87	3,3	6,5	2,8	3	0,001
RA100LA4	2,2	1420	79	0,82	4,67	6,0	2,2	2,6	0,0048
RA100LB4	3,0	1420	81	0,81	6,9	6,2	2,2	2,6	0,0058
RA112M4	4,0	1430	85,5	0,84	8,4	6,5	2,2	2,9	0,0103
RA132SA2	5,5	2880	89	0,89	10,5	6,5	2,4	3	0,0155
RA160S4	15,0	1465	88,5	0,88	29,2	7	1,4	2,3	0,1
RA200L4	45,0	1476	92	0,9	82,4	7	1,4	2,5	0,45

Таблица 22.2. Параметры двигателя при  $U=380$  В,  $f=50$  Гц (каталожные данные, обозначения Matlab)

Тип двигателя	$P_n$ [кВт]	$R_s$ [Ом]	$L_s$ [Гн]	$R_r'$ [Ом]	$L_r'$ [Гн]	$L_m$ [Гн]	$X_s$ [Ом]	$X_r'$ [Ом]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
RA80A2	0,75	14,3	2e-2	7,6	2,9e-2	1	6,3	9,1
RA80B4	0,75	13,1	3,2e-2	13,1	7,6e-2	0,57	10,1	24,0
RA90S2	1,5	5,6	1,1e-2	3,3	1,7e-2	0,53	3,45	5,4
RA100LA4	2,2	4,6	1,1e-2	2,8	2e-2	0,3	3,45	6,1
RA100LB4	3,0	2,5	8e-3	1,7	1,3e-2	0,22	2,5	4,1
RA112M4	4,0	1,75	6,6e-3	1,4	1,2e-2	0,2	2,1	3,8
RA132SA2	5,5	1,0	3,6e-3	0,75	7,3e-3	0,25	1,13	2,3
RA160S4	15,0	0,35	2,1e-3	0,2	3,1e-3	0,1	0,66	1,0
RA200L4	45,0	0,1	7e-4	0,05	1,2e-3	0,04	0,22	0,38

Окно настройки параметров универсального блока измерения переменных машины приведено на рис. 8.15. В выпадающем

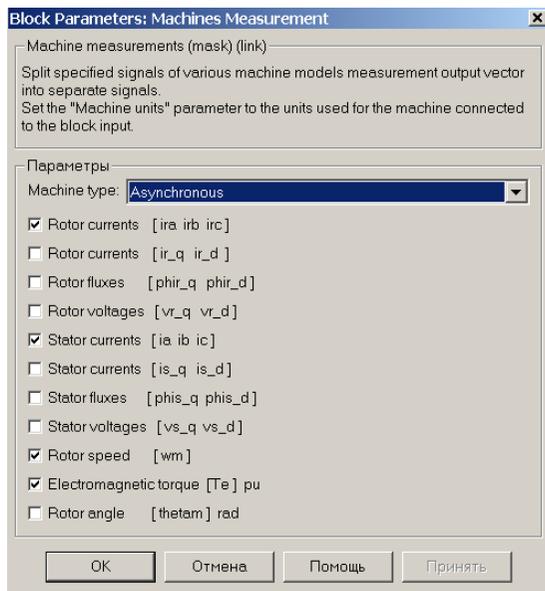


Рис. 8.15. Окно настройки параметров блока измерения меню типа машины *Machine type* задается “Asynchronous”. Флажками выделяются переменные для измерения.

Окно настройки параметров источника питания показано на рис. 8.16, в полях которого задаются амплитуда фазного напряжения источника ( $\sqrt{2} * 380 / \sqrt{3} = 310$  [В]), начальная фаза ( $0$ ) и частота (50 Гц), внутреннее сопротивление (Ом, малое число) и индуктивность (Гн) источника.

В окне настройки параметров блока измерения активной и реактивной мощности задается только частота, которая должна быть равна частоте источника.

В полях окна настройки дисплея указывается формат представления числовых результатов (short). В поле *Decimation* (разбивка) задается число шагов вычисления, через которые значения выводятся на дисплей (1). Установка в поле *Sample time* значения -1 синхронизирует работу блока с шагом вычислений.

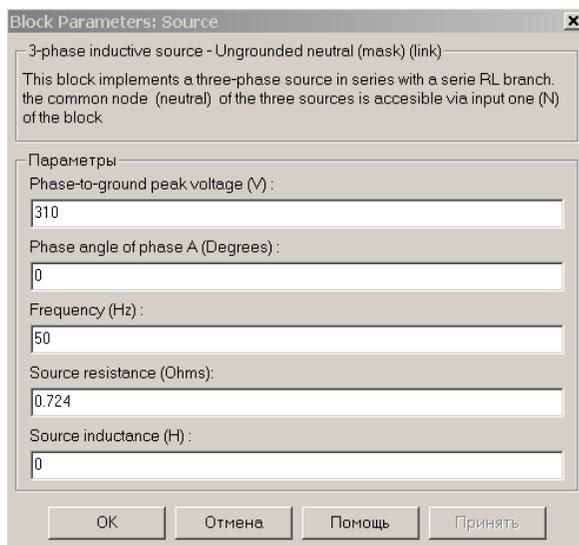


Рис. 8.16. Окно настройки параметров источника питания

В полях окна настройки блока *Mux*, объединяющего два сигнала в один векторный, задаются число входов (задают 3) и внешний вид представления блока (Display option: none).

### Порядок выполнения работы

Выбирают тип двигателя для моделирования и заполнения окон всех блоков. Окно настройки параметров моделирования показано на рис. 8.7. После заполнения окон настройки приступают к моделированию характеристик двигателя.

Снятие механической характеристики машины в двигательном и генераторном режимах по модели асинхронного двигателя производится при изменении момента на валу в диапазоне от -1,5 до +1,5 от номинального, а также при значении момента больше максимального. При этом для каждого значения момента осуществляется моделирование до установившегося режима работы двигателя.

Значения момента и частоты вращения заносятся в таблицу 22.3.

Таблица 22.3. Механическая характеристика асинхронной машины

М [Н·м]	-1,5M <sub>н</sub>				0					1,5M <sub>н</sub>	5M <sub>н</sub>
Ω [рад/с]											

Построение механической характеристики по каталожным данным проводят по уравнению момента асинхронной машины

$$M = \frac{m_1 U_1^2 R_R' / s}{\Omega_1 [(R_s + \frac{R_R'}{s})^2 + (X_s + X_R')^2]}, \quad (22.1)$$

которое можно преобразовать к виду:

$$M = \frac{A \alpha}{(R_s + \alpha)^2 + X}, \quad (22.2)$$

где  $A = \frac{m_1 U_1^2}{\Omega_1} = \frac{3 \times 220^2}{314} p = 462,4 p$ ;  $X = (X_s + X_R')^2$ ;

$$\Omega_1 = 2\pi f / p = 314 / p; \quad \alpha = R_R' / s; \quad \Omega = \Omega_1 (1 - s).$$

Параметры  $A$ ,  $X$  и  $\Omega_1$  определяются предварительным расчетом.

Уравнению (22.2) соответствует расчетная модель механической характеристики, представленная на рис. 8.17.

Рисунок 8.17. Расчетная модель механической характеристики асинхронного двигателя

Окно настройки параметров блока Ramp модели осуществляется по рис. 8.18.

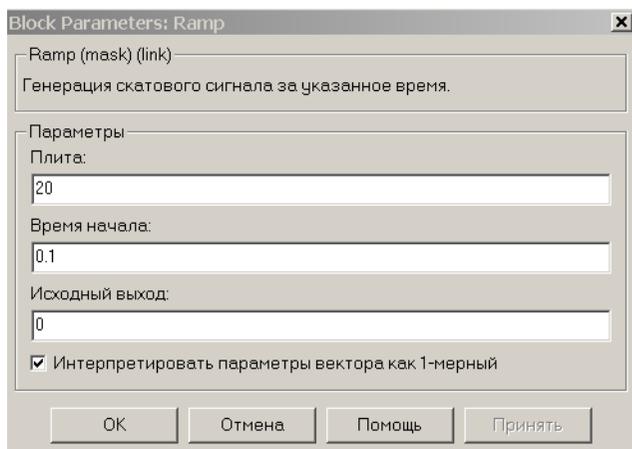


Рис. 8.18. Окно настройки блока Ramp

Полученную механическую характеристику нужно сопоставить с характеристикой, полученной с помощью модели по рис. 8.16.

Снятие рабочих характеристик двигателя производится при изменении момента на валу в диапазоне от нуля до  $1,2M_n$ . При этом для каждого значения момента производится моделирование до установившегося режима работы двигателя. При этом заполняется таблица 22.4.

Таблица 22.4. Рабочая характеристика асинхронного двигателя

М [Нм]	Измерения					Вычисления				
	$P_1$ [Вт]	$Q_1$ [вар]	$U_1$ [В]	$I_1$ [А]	$\Omega$ [рад/с]	$\varphi$ [гр.]	$\cos\varphi$	$P_2$ [Вт]	$\eta$ [%]	$s$ [%]

Вычисления производятся по выражениям:

$$\varphi = \arctg \frac{Q_1}{P_1}; \quad P_2 = M \Omega; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} 100;$$

$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} 100.$$

По данным обеих таблиц строятся механическая и рабочая характеристики двигателя.

### **Содержание отчета**

В отчете по лабораторной работе приводятся:

1. Название и цель работы.
2. Паспортные данные двигателя, выбранного для моделирования.
3. Схема модели и краткое описание виртуальных блоков.
4. Таблицы с результатами моделирования механической и рабочей характеристик.
5. Две механические характеристики асинхронного двигателя, построенные по двум моделям.
6. Рабочая характеристика.

### **Контрольные вопросы.**

1. Укажите назначение каждого из блоков виртуальной модели асинхронного двигателя.
2. Что означают термины «асинхронный» и «короткозамкнутый» в названии электродвигателя?
3. Какими координатами определяются механические характеристики электродвигателя?
4. Какими координатами определяются рабочие характеристики электродвигателя?
5. Укажите причины изменения переменных величин рабочих характеристик.

## **РАБОТА № 23. Исследование синхронного генератора**

**Цель работы:** исследование синхронного генератора с электромагнитным возбуждением при работе на статическую нагрузку.

**Содержание работы:**

1. Определение угловой характеристики генератора.
2. Снятие внешней характеристики генератора при активной, активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузке.
3. Снятие рабочих характеристик генератора при активной нагрузке.

**Подготовка к работе**

Для выполнения работы пользователю необходимо иметь ПК с пакетом «MatLab 6.0 – Simulink». Необходимо изучить теоретический материал: принцип действия синхронного генератора, конструктивные схемы синхронных машин, конструкция синхронного генератора, реакция якоря, статические характеристики синхронного генератора.

**Описание виртуальной лабораторной установки**

Виртуальная лабораторная установка представлена на рис. 8.19.

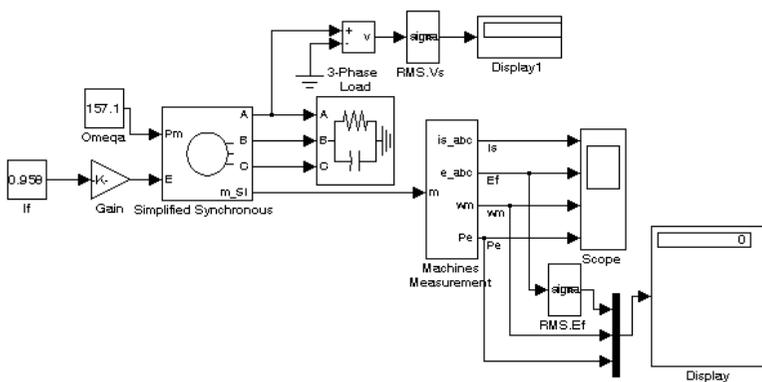


Рис. 8.19. Модель для исследования трехфазного синхронного генератора

Модель содержит:

- блок моделирования исследуемого синхронного генератора *Simplified Synchronous Machine* из библиотеки *Power System Blockset/Machines*;
- измеритель переменных состояния машины *Machines Measurement* из библиотеки *Power System Blockset/Machines*;
- трехфазную нагрузку *3-Phase Load* из библиотеки *Power System Blockset/Extras/Three-Phase Library*;
- блок RMS/Vs, для измерения действующего значения напряжения при нагрузке;
- блоки *Fourier, Fourier1*, измеряющие амплитуды и начальные фазы напряжения при нагрузке и ЭДС генератора из библиотеки *Power System Blockset/Extras/Measurements*;
- блоки *Display1, Display2, Display3* для количественного представления измеренных величин и блок *Score* для наблюдения тока якоря, скорости и электромагнитной мощности синхронного генератора из библиотеки *Simulink/Sinks*;
- блок  $E_0$  для задания ЭДС возбуждения из главной библиотеки *Simulink/Source*;
- блоки *Mux, Demux* из главной библиотеки *Simulink/Signal & System*.

Окно настройки параметров синхронной машины показано на рис. 8.20.

В полях окна задаются:

- схема соединения трехфазной обмотки статора. В выпадающем меню этого поля можно выбрать соединение звездой без нулевого и с нулевым проводником;
- полная мощность (ВА), действующее линейное напряжение и частота;
- момент инерции ( $\text{кгм}^2$ ), коэффициент демпфирования, число пар полюсов;

- активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря (статора);

- начальные условия при пуске модели.

Порядок заполнения окна настройки блока измерения переменных состояния машины показан на рис. 8.21.

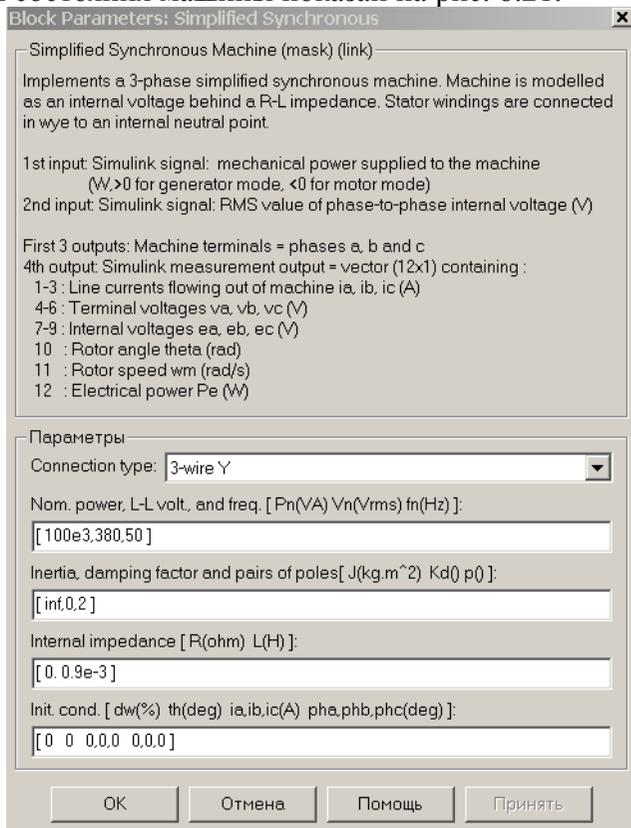


Рис. 8.20. Окно настройки параметров синхронного генератора

Тип машины выбирается в поле *Machine type*. Флажки включаются у тех переменных, которые подлежат измерению.

В блоке настройки измерителя действующих значений задается частота, на которой производятся измерения (50 Гц).

В окне настройки блоков *Fourier*, *Fourier1* задается частота (50 Гц) и номер гармоники измеряемого напряжения (1). Измерения выполняются для первой гармоники на частоте 50 Гц.

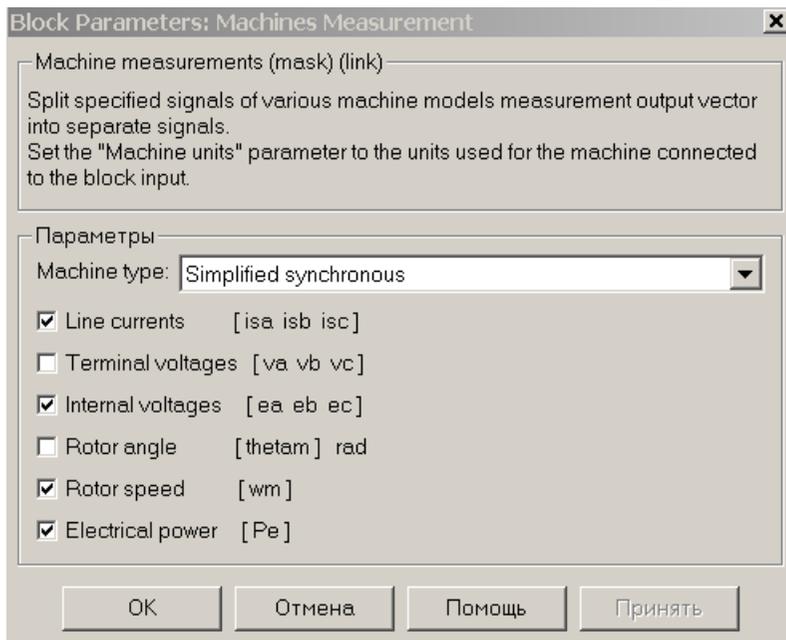


Рис. 8.21. Окно настройки блока измерения переменных состояния машины

В окне настройки параметров нагрузки (*3-Phase Load*) задаются номинальное напряжение 380 В, частота 50 Гц, активная мощность (Вт), индуктивная реактивная мощность (вар), ёмкостная реактивная мощность (вар). Мощности нагрузки удобно задавать как номинальную мощность

генератора, умноженную на коэффициент (коэффициент нагрузки).

Содержание и настройка остальных блоков модели подробно описаны ранее.

### Выполнение работы

Параметры синхронной машины и источника питания для выполнения работы задаются преподавателем. При самостоятельной работе можно принять машину с параметрами, указанными на рис. 8.20. Значение ЭДС возбуждения (блок  $E_0$ , рис. 8.19.) при проведении измерений остается постоянным, равным 380 В, что физически означает, что при выполнении опытов возбуждение генератора не меняется. Окно настройки параметров моделирования показано на рис. 23.4. (НЕТ)

Снятие угловой характеристики генератора производится на модели (рис. 8.19) при изменении активной мощности нагрузки от 0 до 1,6 от номинальной мощности генератора. При этом коэффициент при активной мощности изменяется от 0 до 1,6 с шагом 0,2. Коэффициенты при реактивных мощностях равны нулю (чисто активная нагрузка).

Для каждого значения мощности осуществляется моделирование до установившегося режима работы генератора. Показатели установившегося режима записывают в таблицу 23.1.

Таблица 23.1. Угловая характеристика генератора

$P_r$ , Вт	Измерения		Вычисления
	$\Omega$ , рад/с	$\Theta$ , град.	М, Нм

Момент на валу генератора определяется по формуле

$$M = P_{нагр} / \Omega.$$

По данным таблицы строится зависимость  $M=f(\Theta)$ .

Снятие внешней характеристики генератора при активной нагрузке осуществляется одновременно с рабочими характеристиками генератора. Используется модель на рис. 8.19. Активная мощность генератора изменяется в диапазоне от 0 до 1,2 номинальной с шагом загрузки  $0,2P_n$ . По данным измерений заполняется таблица 23.2.

Таблица 23.2. Внешняя и рабочие характеристики генератора при активной нагрузке

Измерения					Вычисления	
$P_{нагр}$ , Вт	$Q_{нагр}$ , вар	$\Omega$ , рад/с	$P_r$ , Вт	$U_1$ , В	$\cos\varphi$	$I_a$ , А

Вычисления производятся по формулам:

$$\cos\varphi = \cos(\arctg \frac{Q_{нагр}}{P_{нагр}}); \quad I_a = \frac{P_{нагр}}{U_1 \cos\varphi}.$$

При активной нагрузке  $Q_{нагр}=0$ ,  $\cos\varphi=1$ . При смешанной нагрузке (последующие опыты) имеют место другие значения этих величин.

По результатам таблицы 23.2. на отдельных координатных плоскостях строятся внешняя  $U_1=f(I_a)$  и рабочие характеристики  $U_1$ ,  $\cos\varphi$ ,  $I_a=f(P_r)$ .

Снятие внешних характеристик при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках осуществляется аналогично, но с учетом следующих обстоятельств. При изменении нагрузки генератора должно соблюдаться условие  $\cos\varphi = \text{const.}$ , или  $Q_{нагр}/P_{нагр} = \text{const.}$  По результатам измерений заполняется таблица 23.2 и строятся внешние характеристики на одной координатной плоскости с внешней характеристикой при активной нагрузке.

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Тип и паспортные данные исследованного синхронного генератора.

3. Схема модели с описанием виртуальных блоков.
4. Угловая характеристика генератора.
5. Внешние характеристики генератора при различных по характеру нагрузках.
6. Рабочие характеристики генератора.

Контрольные вопросы.

1. Укажите назначение каждого из блоков виртуальной модели синхронного генератора.

2. Какими факторами определяется характер изменения напряжения генератора, отражаемого внешней характеристикой?

3. Какие переменные величины откладываются в координатных осях угловой характеристики?

4. Какие переменные величины откладываются в координатных осях внешней характеристики?

## Список литературы

- 1 Копылов И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов.- М.: Высш. Шк.; 2002
2. Ванурин В.Н. Электрические машины. -М.: Колос, 1995.
3. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины.-М.: Высшая школа, 1990.
4. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины. Лабораторные работы на ПК.-С.-Петербург, Корона принт, 2003.
5. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 0.6.-С.-Петербург, Корона принт, 2001
6. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков К.А. Электрические машины (специальный курс).-М.: Высшая школа, 1987.
7. Читечян В.И. Электрические машины: Сборник задач.-М.: Высшая школа, 1988.
8. Справочник по электрическим машинам. В 2 томах. /Под ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова.-М.: Энергоатомиздат, т.1, 1988; т.2, 1989.
9. Кацман М.М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу.-М.: Высшая школа, 2001.

## Оглавление

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Глава первая. ОБЩАЯ ЧАСТЬ</b> .....	6
1.1. Параметры и переменные величины электрической машин. Термины и определения.....	6
1.2. Виды испытаний электрических машин.....	9
1.3. Способы и устройства нагружения электрических машин.....	11
1.4. Регулирование напряжения при испытаниях.....	17
1.5. Измерение электрических величин.....	19
1.6. Измерение омических сопротивлений обмоток.....	22
1.7. Измерение вращающего момента .....	26
1.8. Измерение частоты вращения.....	28
1.9. Измерение скольжения асинхронных машин и угла нагрузки синхронных машин.....	29
1.10. Установка щеток на геометрическую нейтраль.....	31
1.11. Техника безопасности в лаборатории электрических машин.....	30
<b>Глава вторая. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК         ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН</b> .....	37
2.1. Основные характеристики электрических машин.....	37

2.2. Характеристики холостого хода.....	38
2.3. Характеристики короткого замыкания.....	44
2.4. Внешние характеристики.....	48
2.5. Регулировочные характеристики.....	52
2.6. Механические характеристики.....	57
2.7. Рабочие характеристика.....	62

### **Глава третья. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА...67**

Работа № 1. Исследование генераторов постоянного тока.....	67
Работа № 2. Исследование электродвигателей постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения.....	79
Работа № 3. Исследование электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения.....	88
Работа № 4. Тахогенераторы.....	96
Работа № 5. Исследование универсального коллекторного двигателя.....	102

### **Глава четвертая. ТРАНСФОРМАТОРЫ.....111**

Работа № 6. Исследование трехфазного двухобмоточного трансформатора.....	111
Работа № 7. Параллельная работа трехфазных трансформаторов.....	126
Работа № 8. Исследование несимметричной нагрузки трехфазного трансформатора.....	138

### **Глава пятая. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ.....149**

Работа № 9. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.....	149
Работа № 10. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором....	159
Работа № 11. Трехфазная асинхронная машина в режиме индукционного регулятора и	

	регулируемого индуктивного сопротивления.....	170
Работа № 12.	Исследование режимов работы асинхронной машины.....	175
Работа № 13.	Исследование однофазного асинхронного двигателя.....	181
<b>Глава шестая. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ.....</b>		<b>187</b>
Работа № 14.	Исследование трехфазного синхронного генератора.....	187
Работа № 15.	Опытное определение параметров синхронной машины.....	198
Работа № 16.	Исследование трехфазного синхронного двигателя.....	207
Работа № 17.	Исследование самовозбуждающегося синхронного генератора с фазовым компаундированием.....	216
Работа № 18.	Параллельная работа синхронного генератора с сетью.....	231
<b>Глава седьмая. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.....</b>		<b>240</b>
<b>Глава восьмая. ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ.....</b>		<b>254</b>
Работа № 19.	Исследование характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения.....	254
Работа № 20.	Исследование двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.....	260
Работа № 21.	Исследование однофазного трансформатора.....	267
Работа № 22.	Исследование трехфазного асинхронного	

короткозамкнутого двигателя.....	278
Работа № 23. Исследование синхронного генератора.....	287
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>295</b>