

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра электро- и теплоэнергетики

В.Т.Пилипенко

# **ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно - издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, профиль подготовки Электроснабжение

Оренбург  
2018

УДК 621.311 (07)  
ББК 31.297  
П-32

Рецензент - кандидат технических наук, доцент В.М.Нелюбов

**Пилипенко В.Т.**

ПЗ2 Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: методические указания /В.Т.Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. - Оренбург: ОГУ, 2018.- 57 с.

В методических указаниях даются рекомендации по выполнению лабораторных работ, предназначенных для изучения вопросов, связанных со статической и динамической устойчивостью электрических систем. Приводятся описание лабораторных стендов, особенности и порядок проведения экспериментов.

Также в методические указания включены необходимые теоретические сведения по темам лабораторных работ, контрольные вопросы для самопроверки и ссылки на рекомендуемую литературу.

УДК 621.311(07)  
ББК 31.297

© Пилипенко В.Т.,2018  
© ОГУ, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Общие сведения.....	4
1.1 Общие рекомендации .....	4
1.2 Описание лабораторного стенда.....	4
2 Лабораторная работа №1 «Исследование процесса синхронизации синхронного генератора с сетью и регулирования его активной и реактивной мощностей».....	12
2.1 Теоретические положения.....	13
2.2 Порядок выполнения работы .....	28
2.3 Самостоятельная работа с литературой.....	32
3 Лабораторная работа №2 «Определение угловой характеристики мощности синхронного генератора. Исследование влияния параметров элементов, схемы и режима электрической системы на его устойчивость» .....	33
3.1 Теоретические положения.....	33
3.2 Порядок выполнения работы .....	41
3.3 Самостоятельная работа с литературой.....	44
4 Лабораторная работа № 3 «Влияние режима короткого замыкания в электрической системе на её устойчивость».....	45
4.1 Теоретические положения.....	45
4.2 Порядок выполнения работы .....	52
4.3 Самостоятельная работа с литературой.....	55
5 Рекомендуемая литература .....	56
Приложение А Содержание отчёта по лабораторной работе.....	57

# **1 Общие сведения**

## **1.1 Общие рекомендации**

Цель лабораторного исследования достигается наилучшим образом, если выполнению эксперимента (на физической модели или машинного) предшествует определённая подготовительная работа. Перед приходом в лабораторию студент должен изучить теорию вопроса, предлагаемого к исследованию.

Домашняя подготовка студента предполагает внимательное ознакомление с методическим руководством по соответствующей работе. При этом отдельные вопросы теории, которые представляются недостаточно ясными, должны быть дополнительно проработаны по учебникам.

В ходе предварительной подготовки студент должен изучить необходимые электрические схемы, записать расчётные формулы, выполнить, если нужно, предварительные расчёты, составить таблицы для занесения результатов расчётов и экспериментов.

К очередной лабораторной работе допускаются только студенты, защитившие предыдущую работу, представившие материал в виде расчётов, схем и таблиц по новой работе, а также ответившие на ряд контрольных вопросов по теме этой работы.

В [приложении А](#) приводятся требования по содержанию отчёта по лабораторным работам.

## **1.2 Описание лабораторного стенда**

Лабораторный стенд – комплекс «Модель электрическая системы» имеет модульную конструкцию и состоит из 17 блоков (модулей), каждый из которых имеет своё назначение. В качестве источника питания могут использоваться:

- модуль трёхфазной сети, как источник неограниченной мощности;
- электромашинный агрегат, состоящий из приводного асинхронного двигателя и синхронного генератора, как генератор электрической станции.

Практически все модули, входящие в состав стенда, имеют трёхфазное исполнение. Некоторые из них позволяют регулировать значения отдельных параметров или управлять работой других модулей. На схемах, приведенных в настоящих указаниях, каждый модуль выделен пунктирным прямоугольником.

Особенностью стенда является возможность автоматического управления работой отдельных модулей с помощью персонального компьютера, а также вывода на монитор ПК графиков переходных процессов. Модули, которые поддерживают режим автоматического управления от персонального компьютера, содержат в обозначении знак стрелки:



При этом подразумевается аналоговое и (или) дискретное управление по нескольким сигнальным проводам. В схемах работ, не использующих автоматическое (дистанционное) управление, знак стрелки не указывается.

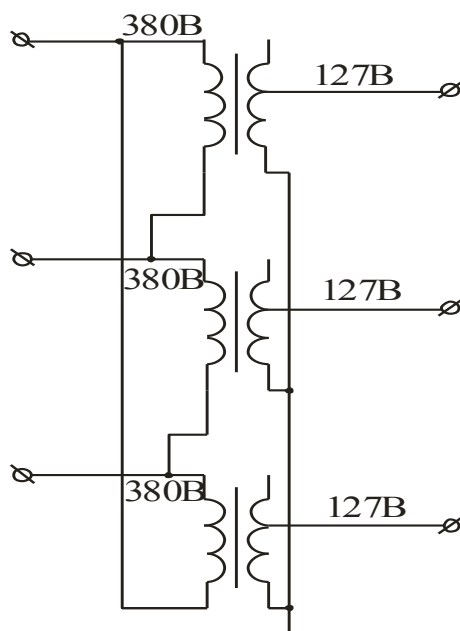
Ниже приводятся название, схемное обозначение и краткая характеристика каждого модуля.

### **1 Модуль однофазных трансформаторов**

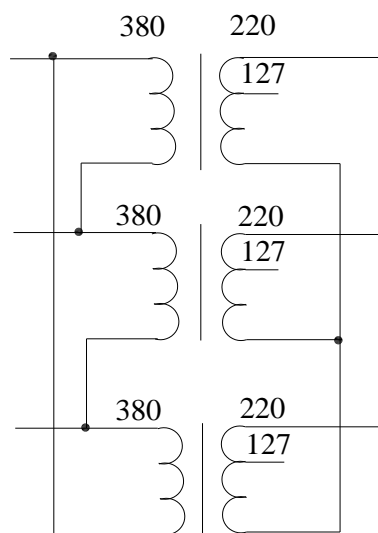
Содержит 3 однофазных трансформатора с первичной обмоткой на 380 В и вторичной обмоткой на 220 В (с отпайкой на 127 В). На схемах лабораторных испытаний модуль обозначается как трёхфазный с указанием схем соединения обмоток и величины **линейного** напряжения на каждой стороне трансформатора:

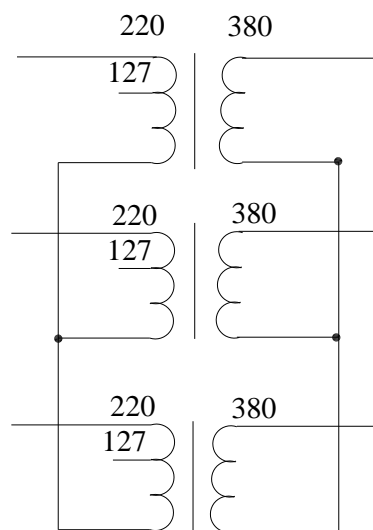


Приведенное обозначение соответствует следующей схеме соединения обмоток:



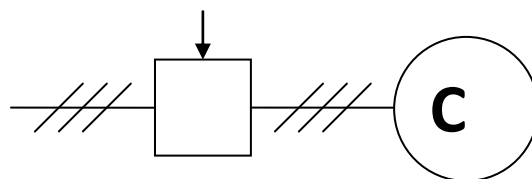
Здесь указаны напряжения, соответствующие номинальным напряжениям отпаяк силовых трансформаторов. При работе стенда реальные напряжения могут быть и меньше. Ниже показаны варианты соединения обмоток трансформаторов, обеспечивающие получение различных коэффициентов трансформации:





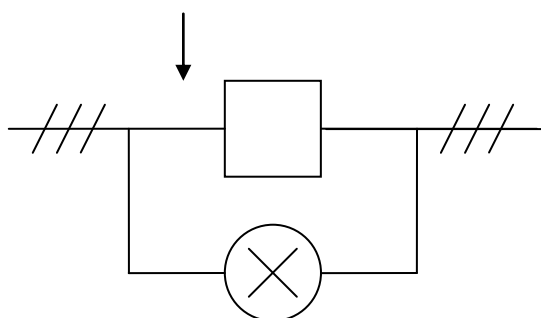
## 2 Модуль трёхфазной сети

Содержит источник трёхфазного напряжения 380 В и управляемый трёхфазный выключатель. Обозначение на схемах:



## 3 Модуль синхронизации

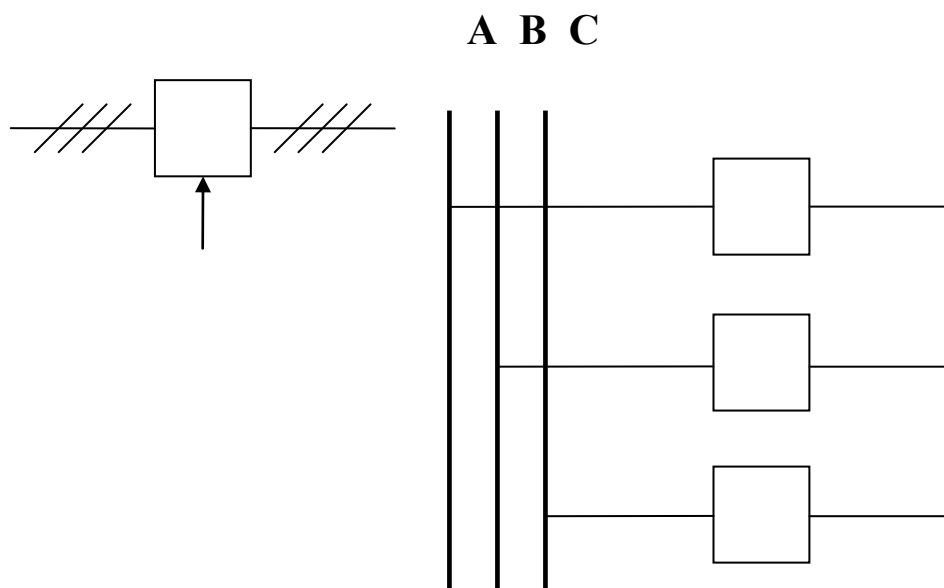
Содержит управляемый трёхфазный выключатель и синхроскоп. Обозначение на схемах:



## 4 Модуль выключателя

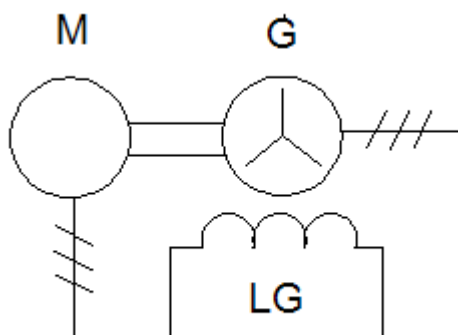
Содержит управляемый трёхфазный выключатель.

Если автоматическое управление от персонального компьютера не задействовано, стрелка дистанционного управления не указывается. Обозначение на схемах:



### ***5 Модуль электромашинного агрегата***

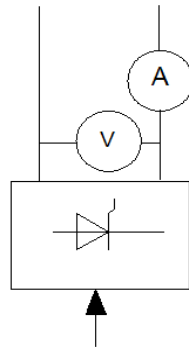
Содержит выводы статорной обмотки приводного двигателя, выводы статорной обмотки синхронного генератора и выводы обмотки возбуждения синхронного генератора. Обозначение на схемах:



### ***6 Модуль возбуждения***

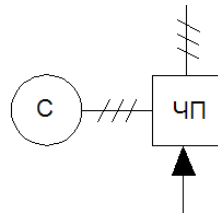
Содержит управляемый источник постоянного тока, измеритель величины тока возбуждения и измеритель напряжения возбуждения. Обозначение на схемах:





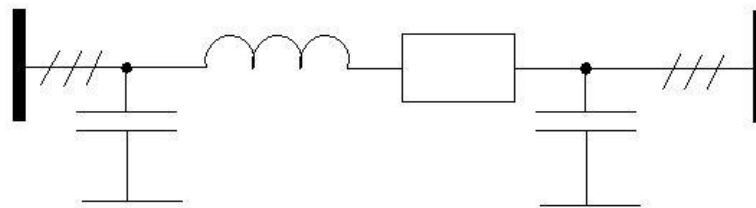
### 7 Частотный преобразователь

Содержит управляемый трёхфазный источник питания приводного двигателя. Обозначение на схемах:



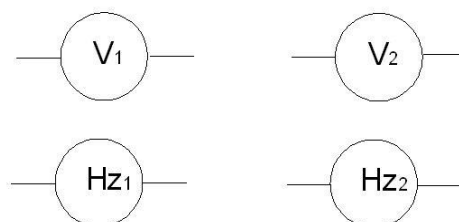
### 8 Модуль линии электропередачи

Содержит трёхфазную модель линии электропередачи с изменяемыми величинами её продольной активной, продольной индуктивной и поперечной ёмкостной составляющих. Обозначение на схемах:



### 9 Модуль измерительный

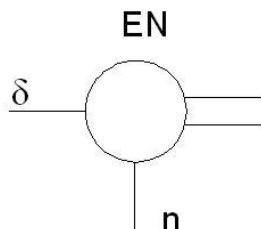
Содержит два вольтметра и два частотомера. Обозначение на схемах:



## 10 Измеритель скорости

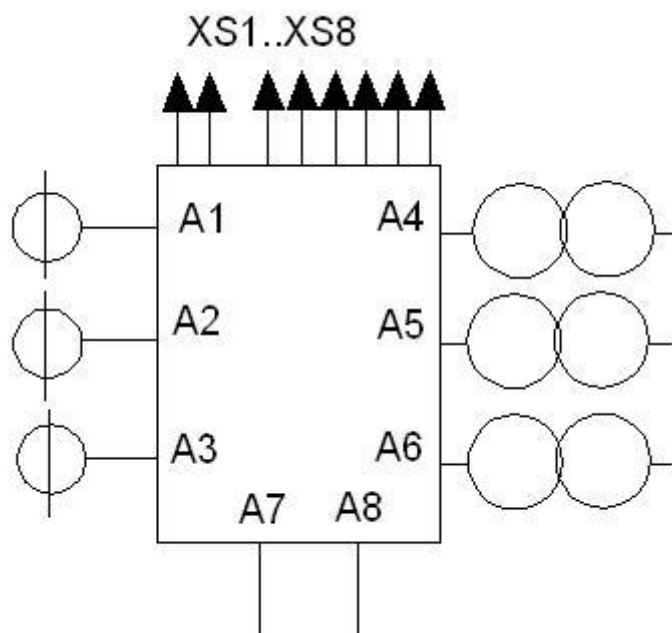
Содержит стрелочный индикатор скорости вращения электромашинного агрегата и стрелочный индикатор угла нагрузки синхронного генератора  $\delta$ .

Обозначение на схемах:



## 11 Модуль ввода-вывода

Содержит три датчика тока, три датчика напряжения, разъёмы аналогового (XS1...XS2) и дискретного (XS3...XS8) управления. Обозначение на схемах:



Датчики тока и напряжения входят в состав модуля, но для повышения наглядности схем, изображаются непосредственно в цепях измерения.

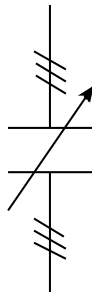
## 12 Индуктивная нагрузка

Содержит три регулируемых индуктивных сопротивления. Обозначение на схемах:



### 13 Ёмкостная нагрузка

Содержит три регулируемых ёмкостных сопротивления. Обозначение на схемах:



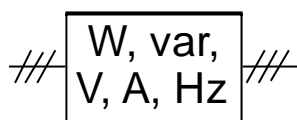
### 14 Активная нагрузка

Содержит три регулируемых активных сопротивления. Обозначение на схемах:



### 15 Измеритель мощности

Представляет собой трёхфазный измеритель активной мощности, линейных напряжений, фазных напряжений и фазных токов. Обозначение на схемах:



Подключение измерителя мощности осуществляется последовательно во всех трёх фазах измеряемой цепи, а нейтральный (нулевой) провод подключается к нейтральной точке обмоток трансформатора, соединённых в звезду. При этом следует учитывать, что для правильности измерений нейтраль трансформатора должна иметь гальваническую связь с измеряемой цепью.

### **16 Модуль линейного реактора**

Содержит три нерегулируемых индуктивных сопротивления. Обозначение на схемах:



### **17 Модуль питания стенда**

Автомат подачи питания на все модули стенда. На схемах лабораторных испытаний не обозначен.

## **2 Лабораторная работа №1 «Исследование процесса синхронизации синхронного генератора с сетью и регулирования его активной и реактивной мощностей»**

### **Цель работы:**

- освоить методику точной ручной синхронизации генератора с сетью;
- изучить принципы регулирования основных режимных параметров СГ: напряжения, тока, активной и реактивной мощностей.

## **2.1 Теоретические положения**

### **2.1.1 Синхронизация синхронных машин**

После разгона ротора синхронной машины до подсинхронной скорости ее необходимо включить в сеть. Однако для безаварийного включения необходимо выполнить ряд условий. Процедура выполнения этих условий называется синхронизацией.

Первым основным и обязательным условием для любого способа синхронизации является проверка правильности чередования фаз сети и подключаемой машины. Включение в сеть машины, имеющей обратное чередование фаз, вызовет последствия более тяжелые, чем несинхронное включение. Такое включение машины сопровождается возникновением электромагнитного момента, противоположного моменту, развиваемому разгонным двигателем, а также появлением чрезмерных токов в статоре машины. Результатом может быть не только повреждение синхронизируемой машины, но и поломка вала разгонного двигателя. Проверку правильности чередования фаз необходимо производить при первом включении машины, а также после ремонтных работ в ее первичных цепях. Эта проверка должна производиться при помощи одного и того же трансформатора напряжения, подключенного к системе шин, на которую поочередно подается напряжение от подключаемой машины и от сети.

Выполнение других условий зависит от используемого способа синхронизации. Различают способ точной синхронизации и способ самосинхронизации. Рассмотрим их.

#### **2.1.1.1 Способ точной синхронизации**

Этот способ используется при включении в сеть синхронных машин. Он состоит в том, что синхронизируемую машину сначала разворачивают разгонным

двигателем (кроме асинхронного электродвигателя) до частоты вращения, близкой к синхронной, а затем возбуждают и при определенных условиях включают в сеть. Условиями, необходимыми для включения синхронизируемой машины в сеть (в данном случае ее необходимо рассматривать как генератор), являются:

1) равенство напряжений включаемого генератора и работающего генератора или сети (при включении в сеть способом точной синхронизации с включенным АРВ, снабженным устройством автоматической подгонки напряжения, различие напряжений сети и генератора не должно превышать 1 %, при отсутствии устройства автоматической подгонки напряжения, а также при ручном регулировании возбуждения различие напряжений генератора и сети не должно превышать 5 %;

2) равенство частот включаемого генератора и работающего генератора или сети (отклонение не более 0,1%, причем предпочтительно, чтобы частота подключаемой машины превышала частоту сети на 0,05...0,1 Гц;

3) одинаковое чередование фаз подключаемой машины и сети.

Первое условие обеспечивается путем регулирования тока возбуждения машины, а для выполнения второго и третьего условий необходимо изменение вращающего момента на ее валу, что достигается изменением, например, количества пара или воды, пропускаемых через турбину.

Выполнение условий точной синхронизации может быть осуществлено вручную или автоматически. При ручной синхронизации все операции по регулированию возбуждения и подгонке частоты выполняет дежурный персонал, а при автоматической синхронизации – автоматические устройства. При точной ручной синхронизации напряжения и частоты контролируются по установленным на щите управления двум вольтметрам и двум частотомерам, а сдвиг по фазе напряжений – по синхроскопу. Последний позволяет не только уловить момент совпадения фаз напряжений, но также определить, вращается ли генератор быстрее или медленнее, чем работающие. Указанные приборы объединяют в так называемую «колонку синхронизации». Вольтметр и частотомер, относящийся к

синхронизируемому генератору, подключают к его трансформатору напряжения, а вольтметр и частотомер, относящиеся к работающим генераторам (или сети), обычно подключают к трансформатору напряжения сборных шин станции. Синхроскоп подключают одновременно к обоим трансформаторам напряжения [5.1.4].

В лабораторной установке используется **ламповый синхроскоп**. Подготовку к включению на параллельную работу синхронного генератора ведут следующим образом. Приводят во вращение первичный двигатель и регулируют его скорость вращения так, чтобы она была примерно равна номинальной. Затем возбуждают генератор и, следя за показаниями вольтметра, подключенного к зажимам статора, регулируют напряжение машины при помощи реостата в цепи возбуждения до тех пор, пока оно не станет равным напряжению сети.

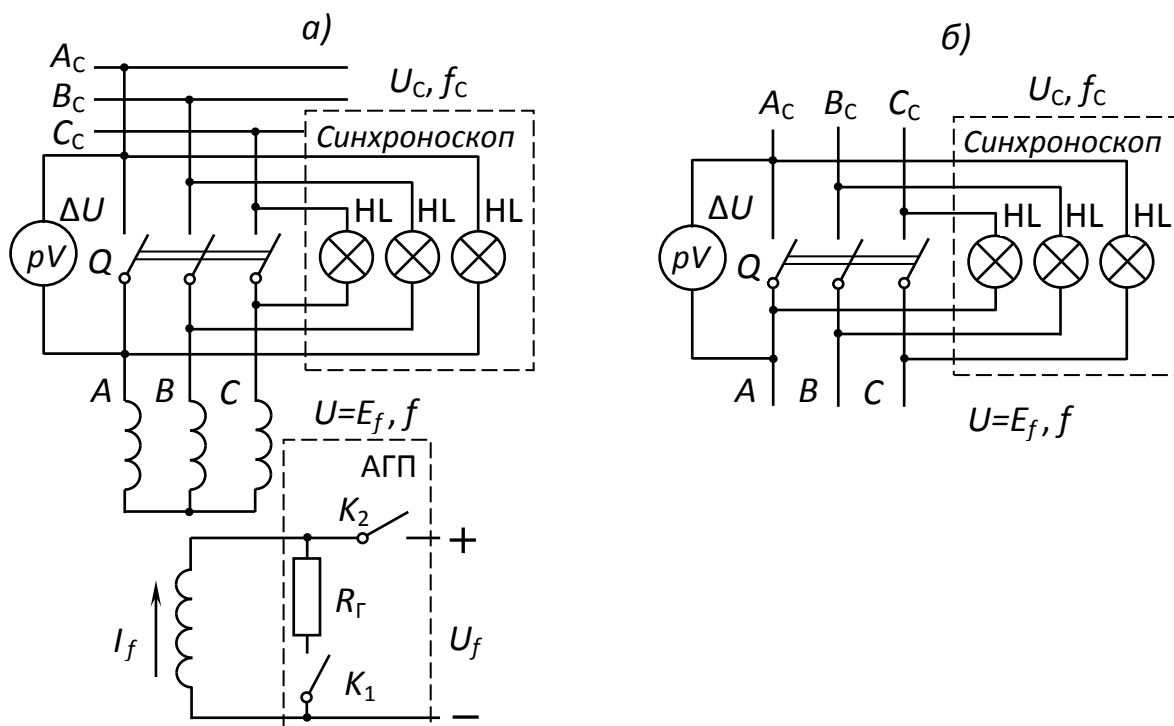


Рисунок 2.1 - Схема включения синхронного генератора в сеть способом точной синхронизации с помощью лампового синхроскопа на «потухание» (а) и на «вращение света» (б)

Воздействуя на регулятор первичного двигателя и наблюдая за показаниями частотомера, устанавливают более точно скорость машины так, чтобы частота генератора была равна частоте сети. Тем самым первое и второе условия для включения на параллельную работу будут выполнены.

Для выполнения третьего условия, а также для установления полного равенства частот служат фазные лампы. Для машин трехфазного тока фазные лампы включаются по двум схемам: на «потухание» ([рисунок 2.1,а](#)) и на «вращение света» ([рисунок 2.1,б](#)). Лампы, включенные по схеме рисунка 1а, при одинаковом чередовании фаз сети и машины будут сначала быстро и одновременно мигать, затем мигание их становится все реже и реже и, когда лампы медленно погаснут, нужно подключить генератор к сети.

Для более точного определения момента включения генератора часто ставят так называемый нулевой вольтметр ( $pV$  на схеме [рисунка 2.1](#)), имеющий двустороннюю шкалу. При одинаковом чередовании фаз сети и машины лампы, включенные по схеме [рисунка 2.1б](#), будут мигать поочередно, и если их расположить по кругу, то получится впечатление вращающегося света. Скорость вращения света зависит от разности частот. Генератор нужно включить в момент, когда лампы, включенные накрест, загорятся полным накалом, а третья лампа погаснет. Иначе говоря, включение удобнее производить в момент, когда меняется направление вращения света.

***При неодинаковом порядке чередования фаз лампы, включенные по схеме «а», дадут вращение света, а по схеме «б» будут одновременно загораться и потухать. Для изменения порядка чередования фаз машины два любых провода, подсоединённых к клеммам генератора на стенде нужно поменять местами.***

Включение фазных ламп высоковольтных генераторов осуществляется через измерительные трансформаторы напряжения.

Таким образом, с помощью фазных ламп мы можем определить противоположность фаз, установить равенство частот и порядок чередования фаз сети и подключаемой машины.



Когда синхронный генератор работает параллельно с сетью, скорость вращения его остается постоянной, равной синхронной.

При соблюдении всех вышеуказанных условий разность напряжений генератора и сети равна нулю, поэтому уравнивающего тока между ними не возникает.

Включение генератора в сеть при значительном неравенстве напряжений по величине и при большом угле  $\delta_{ош}$  расхождения по фазе вызовет появление уравнивающего тока  $I''_{вкл}$  и связанных с ним последствий [5.2.3]. Особенно опасно включение генератора при несовпадении напряжений по фазе, так как именно фазовый сдвиг вызывает толчки тока статора и электромагнитного момента на валу. Влияние фазового сдвига на величину тока включения может быть проиллюстрировано векторной диаграммой, показанной на рисунке 2.2.

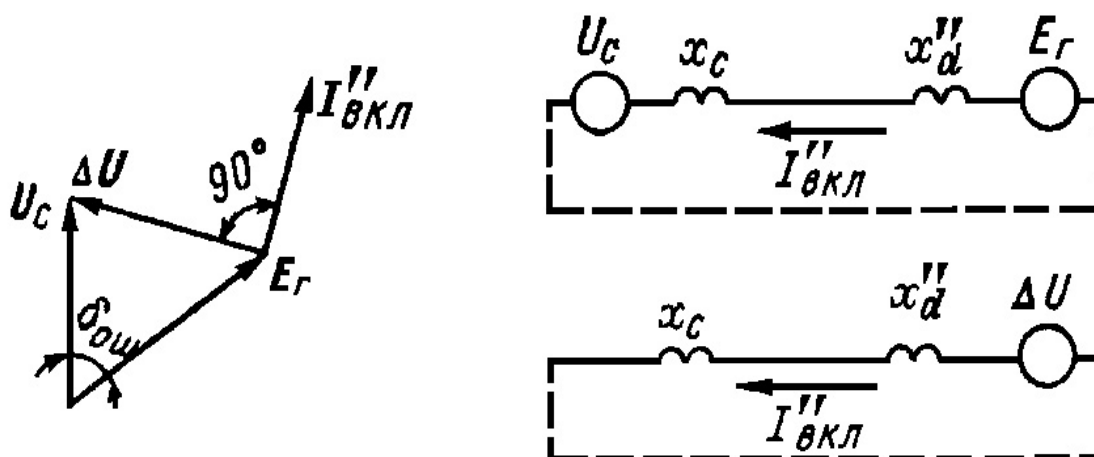


Рисунок 2.2 - К определению допустимой угловой ошибки при синхронизации

Из векторной диаграммы видно, что при равенстве напряжений системы и генератора ( $U_{сг} = E_{г} = U$ ),

$$\Delta U = 2U \sin \frac{\delta_{ош}}{2}; \quad (2.1)$$

$$I_{ВКЛ}'' = \frac{\Delta U}{x_d'' + x_{GS}}, \quad (2.2)$$

где  $x_d''$  – сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси;

$x_{GS}$  – сопротивление системы.

При сдвиге  $180^\circ$  (включение в противофазу) ток  $I_{ВКЛ}''$  значительно превышает ток короткого замыкания  $I_{кз}$  на выводах генератора:

$$I_{ВКЛ}'' = \frac{U + E_G}{x_d'' + x_{GS}} \gg I_{кз}. \quad (2.3)$$

Возникающий при этом момент вращения может в несколько раз превышать момент на валу генератора при коротком замыкании на его выводах. От этого могут разрушиться лобовые части обмотки статора или одна из обмоток трансформатора [5.2.3], через который генератор подключается к сети. Включение в противофазу может случиться при неисправности во вторичных цепях или при неправильном включении синхронизирующего устройства.

При значительной разности частот трудно безошибочно выбрать момент для включения генератора. Кроме того, если даже момент включения будет выбран удачно, то из-за большой начальной разности между синхронной скоростью и скоростью вращения ротора ротор генератора не успеет затормозиться и удержаться в синхронизме, что вызовет появление недопустимо больших колебаний тока статора и вращающего момента ротора. **Поэтому при большой скорости вращения, а также при частом мигании ламп синхроскопа включать генератор не допустимо [5.2.3].**

Точной ручной синхронизации свойственны следующие недостатки [5.1.4]:

1) сложность процесса включения из-за необходимости подгонки напряжения по модулю и фазе, а также частоты генератора;

2) большая длительность включения – от нескольких минут в нормальном режиме до нескольких десятков минут при авариях в системе, сопровождающихся изменением частоты и напряжения, когда особенно важно обеспечить быстрое включение генератора в сеть;

3) возможность механических повреждений генератора и первичного двигателя при включении агрегата с большим углом  $\delta_{0ш}$ .

Во избежание механических повреждений ручная синхронизация выполняется с автоматическим контролем синхронизма, который запрещает включение выключателя синхронизируемой машины при несоблюдении условий синхронизации. Ручная синхронизация при отключенной блокировке от несинхронного включения запрещается [5.2.3].

### 2.1.1.2 Способ самосинхронизации

При способе самосинхронизации (этот способ используется как дополнительный к основному) синхронизируемая машина с обмоткой возбуждения, замкнутой на гасительное сопротивление при отключенном АГП (автомат гашения поля) включается в сеть без возбуждения. Частота машины и частота сети должны при этом расходиться не более чем на 2% . Начальный ток включения (ток самосинхронизации  $I_{CC}$ ) определяется по формуле:

$$I_{CC}'' = \frac{U_{GS}}{x_d'' + x_{GS}} \quad (2.4)$$

и, следовательно, он меньше, чем при коротком замыкании на выводах машины, так как ток короткого замыкания в этом случае определится как

$$I_K = \frac{E_G}{x_d''}. \quad (2.5)$$

Синхронизируемая машина возбуждается сразу же после включения в сеть и плавно (в течение 1...2 с, [5.2.3]) входит в синхронизм.

Как видно, включение машины по способу самосинхронизации в первый момент эквивалентно короткому замыканию за сверхпереходным реактивным сопротивлением генератора. Остаточное напряжение на шинах, к которым подключается машина,

$$U_{ВКЛ} = U_{GS} \cdot \frac{x_d'' + x_{ДОП}}{x_d'' + x_{GS} + x_{ДОП}}, \quad (2.6)$$

где  $x_{доп}$  – сопротивление блочного трансформатора (в блочной схеме) или реактора (при реакторном пуске), приведенное к мощности генератора.

Именно вследствие понижения напряжения на шинах при самосинхронизации, этот способ нежелателен для синхронизации генераторов на электростанциях с общими сборными шинами генераторного напряжения.

Для мощных блочных станций способ самосинхронизации допустим, однако выигрыш во времени по сравнению с пуском теплового блока исчезающе мал. Поэтому в настоящее время в нормальных условиях на всех электростанциях, как правило, применяется способ точной синхронизации, а самосинхронизация может применяться лишь в аварийных условиях, например после потери генератором возбуждения, при включении резервных гидрогенераторов, при трехфазном АПВ с самосинхронизацией генераторов и т.п.

Рассмотренный материал сконцентрировано изложен в «Правилах устройства электроустановок» и в «Правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации» .

Так, например, [«Правила устройства электроустановок»](#) требуют:

**3.3.43. Включение генераторов на параллельную работу должно производиться одним из следующих способов: точной синхронизацией (ручной, полуавтоматической и автоматической) и самосинхронизацией (ручной, полуавтоматической и автоматической).**

**3.3.44. Способ точной автоматической или полуавтоматической синхронизации как основной способ включения на параллельную работу при нормальных режимах должен предусматриваться для:**

- турбогенераторов с косвенным охлаждением обмоток мощностью более 3 МВт, работающих непосредственно на сборные шины генераторного напряжения, и при значении периодической составляющей переходного тока более  $3,5 \cdot I_{ном}$ ;

- турбогенераторов с непосредственным охлаждением обмоток типов ТВВ, ТВФ, ТГВ и ТВМ;

- гидрогенераторов мощностью 50 МВт и более.

При аварийных режимах в электрической системе включение на параллельную работу всех генераторов вне зависимости от системы охлаждения и мощности может производиться способом самосинхронизации.

**3.3.45. Способ самосинхронизации как основной способ включения на параллельную работу может предусматриваться для:**

- турбогенераторов мощностью до 3 МВт;

- турбогенераторов с косвенным охлаждением мощностью более 3 МВт, работающих непосредственно на сборные шины, если периодическая составляющая переходного тока при включении в сеть способом самосинхронизации не превосходит  $3,5 \cdot I_{ном}$ ;

- турбогенераторов с косвенным охлаждением, работающих в блоке с трансформаторами;

- гидрогенераторов мощностью до 50 МВт;

- гидрогенераторов, электрически жестко связанных между собой и работающих через общий выключатель при их суммарной мощности до 50 МВт.

**В указанных случаях могут не предусматриваться устройства полуавтоматической и автоматической точной синхронизации.**

**3.3.46. При использовании способа самосинхронизации как основного способа включения генераторов на параллельную работу следует предусматривать установку на гидрогенераторах устройств автоматической самосинхронизации, на турбогенераторах – устройств ручной или полуавтоматической самосинхронизации.**

**3.3.47. При использовании способа точной синхронизации в качестве основного способа включения генераторов на параллельную работу, как правило, следует предусматривать установку устройств автоматической и полуавтоматической точной синхронизации. Для генераторов мощностью до 15 МВт допускается применение ручной точной синхронизации с блокировкой от несинхронного включения.**

**3.3.48. В соответствии с указанными положениями все генераторы должны быть оборудованы соответствующими устройствами синхронизации, расположенными на центральном пункте управления или на местном пункте управления для гидроэлектростанций, на главном щите управления или на блочных щитах управления для теплоэлектростанций.**

**Вне зависимости от применяемого способа синхронизации все генераторы должны быть оборудованы устройствами, позволяющими в необходимых случаях производить ручную точную синхронизацию с блокировкой от несинхронного включения.**

**3.3.49. При включении в сеть способом точной синхронизации двух или более гидрогенераторов, работающих через один выключатель, генераторы предварительно синхронизируются между собой способом самосинхронизации и с сетью – способом точной синхронизации.**

**3.3.50. На транзитных подстанциях основной сети и электростанциях, где требуется синхронизация отдельных частей электрической системы, должны предусматриваться устройства для полуавтоматической или ручной точной синхронизации.**

В [«Правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации»](#) сказано:

**5.1.19 Генераторы, как правило, должны включаться в сеть способом точной синхронизации.**

**При использовании точной синхронизации должна быть введена блокировка от несинхронного включения.**

**Допускается использование при включении в сеть способа самосинхронизации, если это предусмотрено техническими условиями на поставку или специально согласовано с заводом-изготовителем.**

**При ликвидации аварий в энергосистеме турбогенераторы мощностью до 220 МВт включительно и все гидрогенераторы разрешается включать на параллельную работу способом самосинхронизации. Турбогенераторы большей мощности разрешается включать этим способом при условии, что кратность сверхпереходного тока к номинальному, определенная с учетом индуктивных сопротивлений блочных трансформаторов и сети, не превышает 3,0.**

## **2.1.2 Регулирования параметров режима работы генераторов**

### **2.1.2.1 Регулирование активной мощности**

Будем считать, что генератор включен способом точной синхронизации в сеть бесконечно большой мощности, режим работы которой не зависит от данного генератора. Сопротивление такой сети  $Z_{GS} = 0$ , напряжение  $U_{GS}$  и частота  $f_{GS}$  постоянны.

Если выполнены условия синхронизации, то после включения генератора в сеть установится режим холостого хода. Магнитное поле машины образовано только током возбуждения  $I_f$  и индуцирует в обмотке статора ЭДС  $E_f = U_{GS}$  ([рисунок 2.4, а](#)). Ротор вращается с синхронной частотой  $n = n_1$  приложенным к валу машины моментом приводного двигателя  $M_B = M_1$ , равным моменту

холостого хода генератора  $M_0$ . Если пренебречь потерями холостого хода, то можно считать  $M_1 = 0$ .

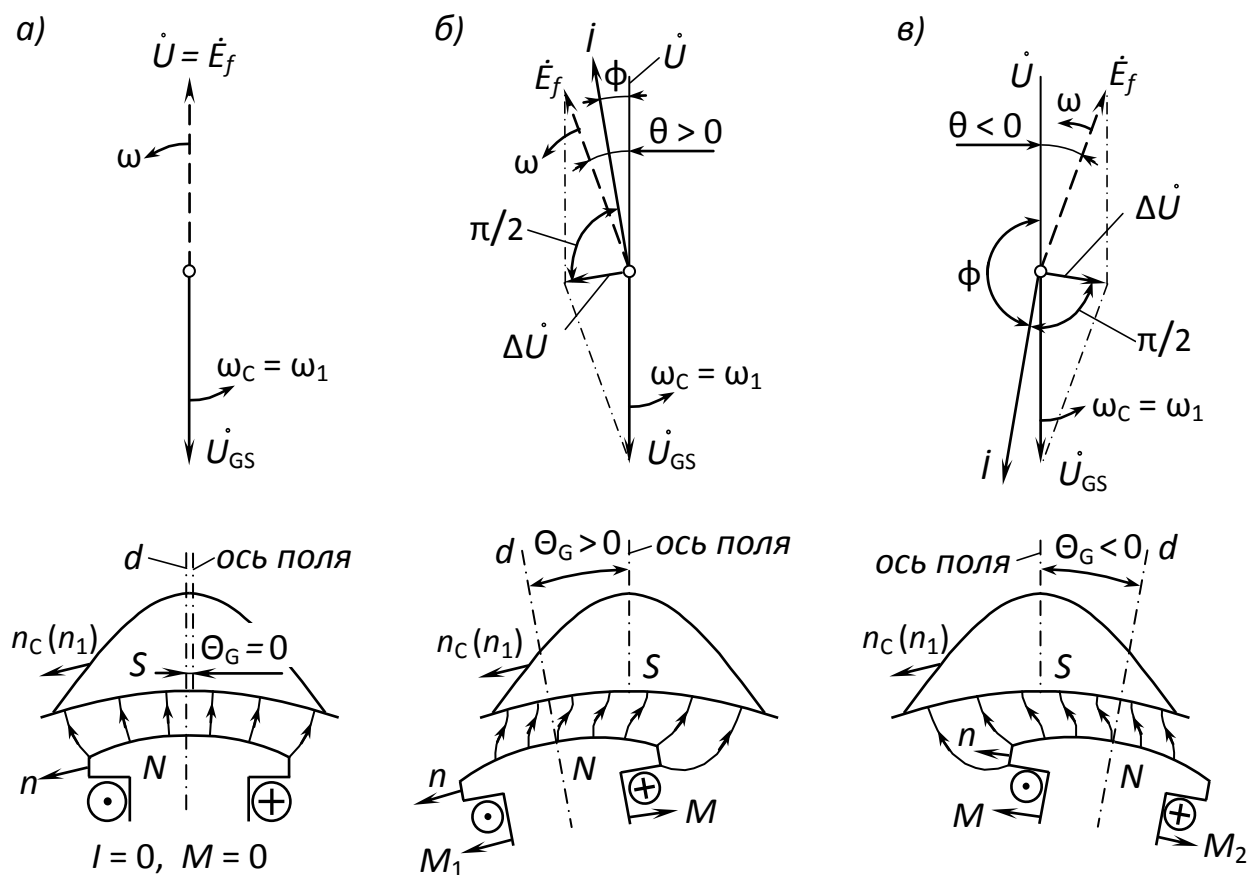


Рисунок 2.3 – Упрощенные векторные диаграммы синхронной машины в режимах холостого хода (а), генератора (б), двигателя (в)

Векторы  $\dot{U}_{GS}$  и  $\dot{E}_f = -\dot{U}_{GS}$  вращаются с одинаковой частотой  $\omega = \omega_C$ . Напряжения сети и генератора уравновешены. Поэтому разность потенциалов между сетью и машиной  $\Delta U = U_{GS} + \dot{E}_f = 0$  и ток якоря  $I = 0$ . Ось полюса  $d$  совпадает с осью результирующего магнитного поля машины и пространственный угол между ними  $\theta_G = 0$  (рисунок 2.3, а). Магнитное поле в зазоре симметрично относительно оси  $d$ . Поэтому между статором и ротором действуют только радиальные силы притяжения. Они уравновешены по окружности машины и не образуют электромагнитного момента.

**Включенную в сеть синхронную машину можно нагрузить, регулируя механическую мощность (момент) на валу и ток возбуждения.**



Если увеличить вращающий момент  $M_B = M_1 > 0$  приводного двигателя, ротор получит положительное ускорение. Частота вращения ротора  $n$  хотя бы кратковременно станет больше постоянной частоты вращения поля  $n_C = n_1$ . Ось  $d$  сместится от оси магнитного поля на угол  $\theta_G$  в направлении вращения ротора (рисунок 2.3. б). Вектор ЭДС  $\dot{E}_f$  опережает напряжение машины  $U$  на электрический угол  $\theta = p\theta_G$  ( $p$  – число пар полюсов) и между сетью и машиной возникает разность потенциалов  $\Delta U = U_{GS} + \dot{E}_f \neq 0$ .

Под действием  $\Delta U$  в обмотке якоря появится ток  $\dot{I}$ , отстающий от  $\Delta U$  практически на четверть периода вследствие большого индуктивного сопротивления обмотки якоря (рисунок 2.3, б). Синхронная машина отдает активную электрическую мощность  $P_2 = mUI \cos\varphi > 0$  в сеть, то есть работает в режиме генератора.

Возникающая при отдаче активной мощности поперечная МДС якоря  $F_{aq}$  искажает магнитное поле в зазоре машины. Электромагнитные силы притяжения между статором и ротором стремятся совместить оси полюса  $d$  и результирующего магнитного поля (оси полюсов  $N$  и  $S$  на рисунок 2.3, б), то есть уменьшить угол  $\theta_G(\theta)$ . Поэтому в генераторе возникает тормозной электромагнитный момент  $M$ , уравновешивающий механический вращающий момент  $M_1$  и частота вращения ротора  $n$  остается неизменной. Угол  $\theta$  называют углом нагрузки и в генераторном режиме считают положительным.

Если к валу ротора приложить тормозной механический момент  $M_B = M_2 < 0$ , то ось полюсов  $d$  в пространстве и вектор ЭДС  $\dot{E}_f$  на диаграмме будут отставать на угол  $\theta_G(\theta)$  от оси магнитного поля и вектора напряжения машины  $U$  (рисунок 2.3, в). Угол  $\varphi$  между векторами тока  $\dot{I}$  и напряжения  $U$  близок к  $180^\circ$ . Синхронная машина потребляет из сети активную мощность  $P_2 = mUI \cos\varphi < 0$  и развивает вращающий электромагнитный момент  $M$ , равный внешнему тормозному моменту  $M_2$ , то есть переходит в двигательный режим. При равенстве моментов  $M = M_2$  частота вращения ротора также станет постоянной. Угол нагрузки  $\theta$  в двигательном режиме считают отрицательным.

В общем случае **регулирование активной мощности синхронной**

*машины, работающей параллельно с сетью, возможно только изменением внешнего механического момента на валу.* При увеличении вращающего момента машина переходит в генераторный режим и отдает в сеть активную электрическую мощность, при увеличении тормозного момента машина потребляет активную мощность из сети и переходит в двигательный режим. Частота вращения ротора  $n$  неизменна и равна синхронной.

### 2.1.2.2 Регулирование реактивной мощности

Пусть синхронный генератор включен в сеть большой мощности на холостом ходу. Ток возбуждения  $I_f$  отрегулирован так, что магнитный поток  $\Phi_f$  индуцирует в обмотке якоря ЭДС  $E_f = U_{GS}$ , которая уравнивает напряжение сети ( [рисунок 2.4, а](#)). При этом ток якоря  $I = 0$ .

С увеличением тока возбуждения возрастут поток  $\Phi_f$  и ЭДС  $E_f$  ([рисунок 2.4, б](#)). Появится разность потенциалов между сетью и машиной  $\Delta U = U_{GS} + \dot{E}_f \neq 0$ , под действием которой в обмотке якоря появится ток  $\dot{I}$ , отстающий практически на  $\pi/2$  от  $\Delta U$  вследствие практически индуктивного сопротивления обмотки якоря. Этот ток образует продольную размагничивающую МДС якоря  $F_{ad}$ , которая уменьшает результирующий магнитный поток  $\Phi_r$ , сцепленный с обмоткой якоря, до величины, близкой к прежнему значению при холостом ходе  $\Phi_{fX}$  (см. [рисунок 2.4, б](#)). Напряжение машины  $U$  станет равно напряжению сети  $U_{GS}$ .

Вследствие того, что ЭДС якоря  $E_f > U_{GS}$ , машина перевозбуждена. В этом случае сеть по отношению к машине подобна индуктивной нагрузке, так как вектор тока якоря  $\dot{I}$  отстает от напряжения машины  $U$  на четверть периода. Наоборот, по отношению к сети, машина представляет собой емкостную нагрузку, генерирующую реактивную мощность (ток якоря  $\dot{I}$  опережает  $U_{GS}$  на угол  $\pi/2$ ). Поэтому ***перевозбужденная синхронная машина отдает в сеть реактивную мощность***, потребляемую асинхронными двигателями, трансформаторами и другими приемниками для образования их магнитного поля.

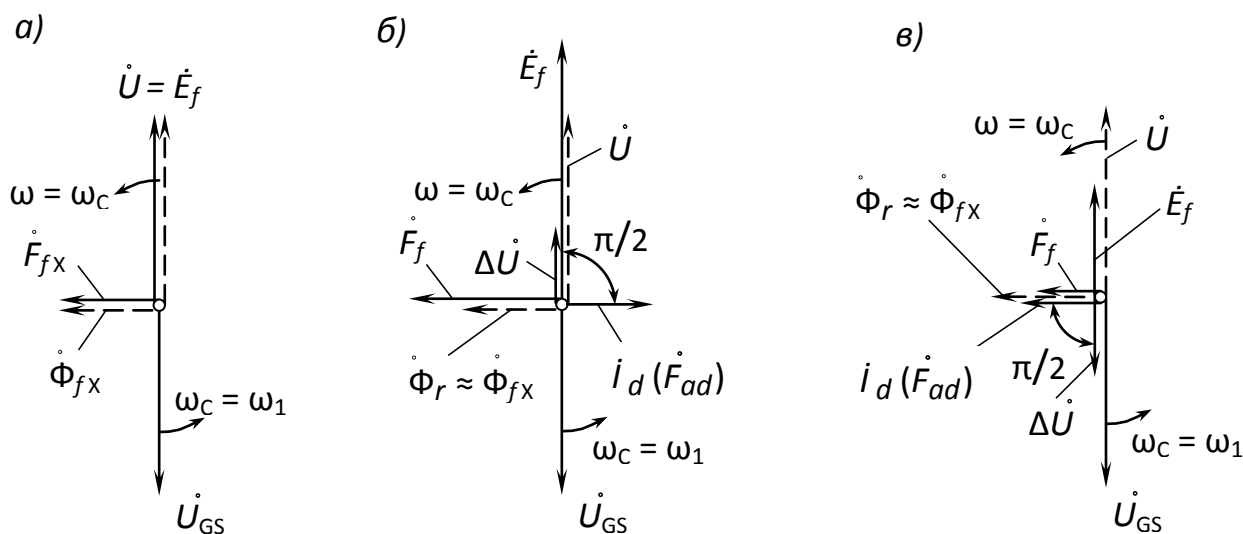


Рисунок 2.4 – Упрощенные векторные диаграммы синхронной машины в режиме холостого хода при изменении тока возбуждения

При уменьшении тока возбуждения уменьшается поток  $\Phi_f$  и ЭДС  $E_f$  будет меньше напряжения сети  $U_{GS}$  (рисунок 2.4, в). Под действием возникшей разности потенциалов  $\Delta U \doteq U_{GS} + \dot{E}_f \neq 0$  в обмотке якоря появится ток  $\dot{I}$ , отстающий от  $\Delta U$  на  $\pi/2$ . Он образует продольную намагничивающую МДС якоря  $F_{ad}$ , которая усиливает результирующий магнитный поток  $\Phi_r$ , сцепленный с обмоткой якоря, до его величины  $\Phi_{fX}$  при холостом ходе. Напряжение машины  $U$  станет равно напряжению сети  $U_{GS}$ .

Так как  $E_f < U_{GS}$ , то говорят, что машина недовозбуждена. Вектор тока якоря  $\dot{I}$  опережает напряжение  $U$  на  $\pi/2$ , то есть сеть по отношению к машине представляет емкостную нагрузку. Машина по отношению к сети эквивалентна индуктивной нагрузке, потребляющей реактивную мощность, так как ток якоря  $\dot{I}$  отстает от напряжения сети на четверть периода. Следовательно, **недовозбужденная синхронная машина потребляет из сети реактивную мощность для образования своего магнитного поля.**

Активная мощность  $P_2 = mUI \cos \varphi = 0$ , так как при изменении тока

возбуждения ток якоря чисто реактивный (угол между  $U$  и  $I$  на [рисунке 2.4](#) равен  $\pi/2$ ). Следовательно, *изменение тока возбуждения позволяет регулировать только реактивную мощность синхронной машины.*

## 2.2 Порядок выполнения работы

2.2.1 Собрать схему лабораторных испытаний, приведенную на [рисунке 2.9](#) (ВСЕ модули стенда должны быть отключены!);

2.2.2 Установить максимальное значение продольной составляющей сопротивления ЛЭП (переключатель SA1 в положение 3) и отключить поперечную составляющую ( переключатели SA2, SA3 в положение 1);

2.2.3 Перевести переключатели режима управления всех задействованных блоков в положение «Руч.»;

2.2.4 Установить потенциометры задания RP1 модуля частотного преобразователя и модуля возбуждения в крайнее левое положение;

2.2.5 Перевести переключатель SA1 направления вращения приводного двигателя модуля частотного преобразователя в положение «Вперёд»;

2.2.6 Подать питание на стенд (включить автомат модуля питания стенда);

2.2.7 Включить все модули, имеющие индивидуальный тумблер подачи питания «Сеть»;

2.2.8 Плавно повышая напряжение задания модуля частотного преобразователя (потенциометр RP1), установить номинальную частоту вращения (1500 об/мин) электромашинного агрегата (следить по показаниям измерителя скорости);

2.2.9 Плавно увеличивая напряжение задания модуля возбуждения (потенциометр RP1), установить величину линейного напряжения на статорной обмотке СГ около 220 В (следить по показаниям вольтметра V1);

2.2.10 Включить выключатель модуля трёхфазной сети (кнопка SB1);

2.2.11 Выровнять по показаниям частотомеров Hz1 и Hz2 частоты электромашинного агрегата и электрической сети. Для этого необходимо

регулировать напряжение задания частотного преобразователя (потенциометр RP1);

2.2.12 Выровнять по показаниям вольтметров V1 и V2 напряжения со стороны генератора и со стороны сети. Для этого необходимо регулировать напряжение задания модуля частотного преобразователя (потенциометр RP1);

2.2.13 Пункты 2.11 и 2.12 при необходимости повторить несколько раз до тех пор, пока напряжения не будут близки ( $\Delta U \leq 10$  В);

2.2.14 В момент совпадения векторов напряжений одноимённых фаз на выключателе модуля синхронизации (лампы должны погаснуть) подать команду на его включение (кнопка SB1); **ВАЖНО! Включение модуля синхронизации необходимо осуществлять убедившись, что частота мигания ламп не превышает 15-20 раз в минуту.**

2.2.15 Перевести универсальный прибор измерителя мощности в режим измерения активной и реактивной мощностей и зафиксировать их величины. Оценить величины мощностей и сделать вывод о правильности выполнения всех условий точной синхронизации;

2.2.16 Изменяя напряжение задания приводного двигателя определить влияние величины момента на валу электромашинного агрегата на величину активной мощности, реактивной мощности и напряжения на выводах генератора;

2.2.17 Изменяя напряжение задания модуля возбуждения определить влияние величины тока возбуждения синхронного генератора на величину активной мощности, реактивной мощности и напряжения на его выводах;

2.2.18 **Отключить стенд в следующей последовательности:**

- разгрузить генератор по активной мощности до нуля. Для этого плавно уменьшить напряжение задания частотного преобразователя до тех пор, пока активная мощность (по показаниям измерителя мощностей) не станет равной нулю;

- разгрузить генератор по реактивной мощности до нуля. Для этого плавно уменьшить напряжение задания модуля возбуждения до тех пор, пока реактивная мощность (по показаниям варметра) не станет равной нулю;

- отключить выключатель модуля синхронизации (кнопка SB2);
- снизить ток возбуждения генератора (потенциометр RP1 модуля возбуждения) до нуля;
- снизить частоту вращения приводного двигателя (потенциометр RP1 модуля частотного преобразователя) до минимального значения (которое задано в настройках частотного преобразователя);
- отключить питание всех модулей;
- отключить питание стенда;

2.2.19 Обработать полученные результаты, сделать выводы и оформить [отчёт по лабораторной работе.](#)

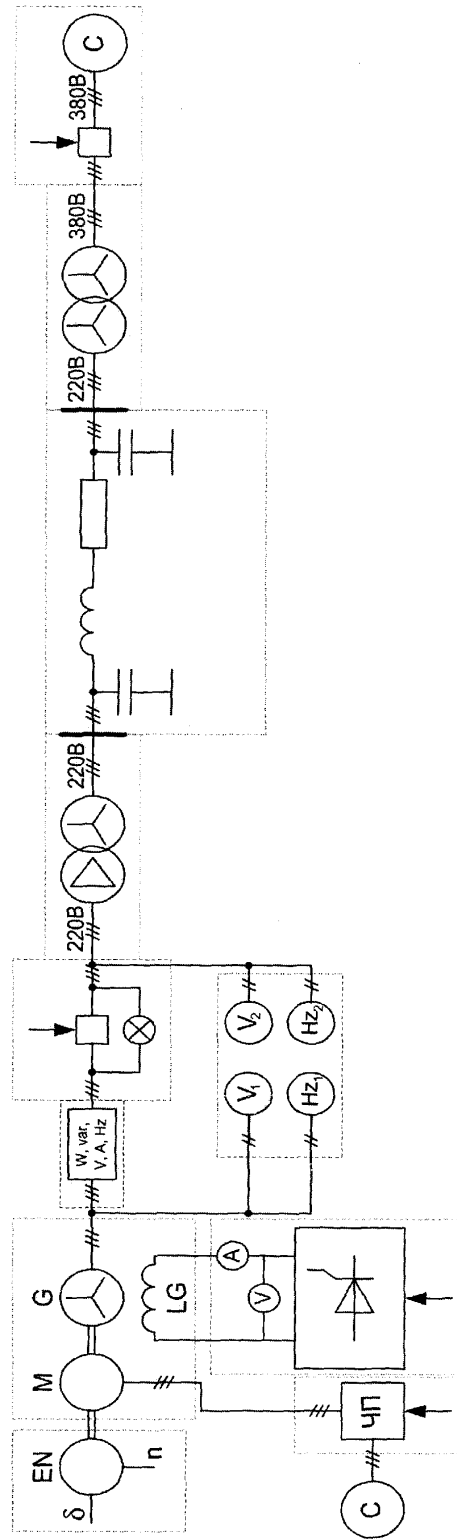


Рисунок 2.9 – Схема лабораторной установки

## 2.3 Самостоятельная работа с литературой

2.3.1 При подготовке к проведению лабораторной работы следует изучить следующий материал.

- по способам синхронизации: [5.1.3], п.3-2; [5.2.2], п.20.9; [5.2.3], п.1-5.

2.3.2 Для контроля усвоения литературного материала необходимо ответить на следующие вопросы:

1 Перечислите основные условия, необходимые для включения генераторов на параллельную работу?

2 Какова последовательность операций при включении в сеть генератора методом точной синхронизации, самосинхронизации.

3 Что понимается под термином "несинхронное включение", к чему может привести несинхронное включение генератора, какие меры предпринимаются для устранения такой возможности?

4 В чем заключается суть способа точной синхронизации?

5 Почему при несовпадении векторов напряжений генератора и сети в момент включения генератора в сеть возникает механический толчок, а при несовпадении напряжений - нет?

6 Почему нельзя включать генератор в сеть в момент, когда лампы синхроскопа погаснут при большой частоте их мигания?

7 Каковы особенности способа самосинхронизации?

8 Почему при изменении пропуска энергоносителя через турбину при параллельной работе генератора с сетью не изменяется частота вращения?

9 Почему при изменении активной нагрузки генератора изменяется реактивная мощность?

10 Какова методика построения векторной диаграммы синхронного генератора?

11 Как с помощью векторной диаграммы можно проанализировать режим генератора?



### **3 Лабораторная работа №2 «Определение угловой характеристики мощности синхронного генератора. Исследование влияния параметров элементов, схемы и режима электрической системы на его устойчивость»**

#### **Цель работы:**

- снять угловую характеристику СГ в номинальном режиме;
- определить предел статической устойчивости СГ в номинальном режиме;
- исследовать влияние параметров схемы и режимов работы СГ на его устойчивость.

#### **3.1 Теоретические положения**

##### **3.1.1 Угловая характеристика активной мощности**

Зависимости  $P = f(\delta)$  ( $M = f(\delta)$ ) при постоянных напряжении сети  $U_{GS}$ , частоте сети  $f_{GS}$  и токе возбуждения  $I_f$  называют угловыми характеристиками активной мощности и электромагнитного момента.

Угловые характеристики  $P$ ,  $M = f(\delta)$  явнополюсного генератора изображены на рисунке 3.1 сплошной линией, пунктиром показаны составляющие  $P'$ ,  $M'$  и  $P''$ ,  $M''$ , соответствующие первой и второй гармоникам мощности. Генератор развивает номинальную активную мощность при номинальном угле нагрузки  $\delta_H = 20^\circ - 35^\circ$ , максимальную

мощность  $P_m$  при максимальном угле нагрузки  $\delta_m = 70^\circ - 80^\circ$ .

Угловые характеристики неявнополюсного генератора представляют собой один полупериод синусоиды (пунктирные линии  $P'$ ,  $M'$  на [рисунке 3.1](#)).

Угловые характеристики  $P$ ,  $M = f(\delta)$  явнополюсного генератора изображены на [рисунке 3.1](#) сплошной линией, пунктиром показаны составляющие  $P'$ ,  $M'$  и  $P''$ ,  $M''$ , соответствующие первой и второй гармоникам мощности. Генератор развивает номинальную активную мощность при номинальном угле

нагрузки  $\delta_H = 20^\circ - 35^\circ$ , максимальную

мощность  $P_m$  при максимальном угле нагрузки  $\delta_m = 70^\circ - 80^\circ$ .

Угловые характеристики неявнополюсного генератора представляют собой один полупериод синусоиды (пунктирные линии  $P'$ ,  $M'$  на рисунке 3.1).

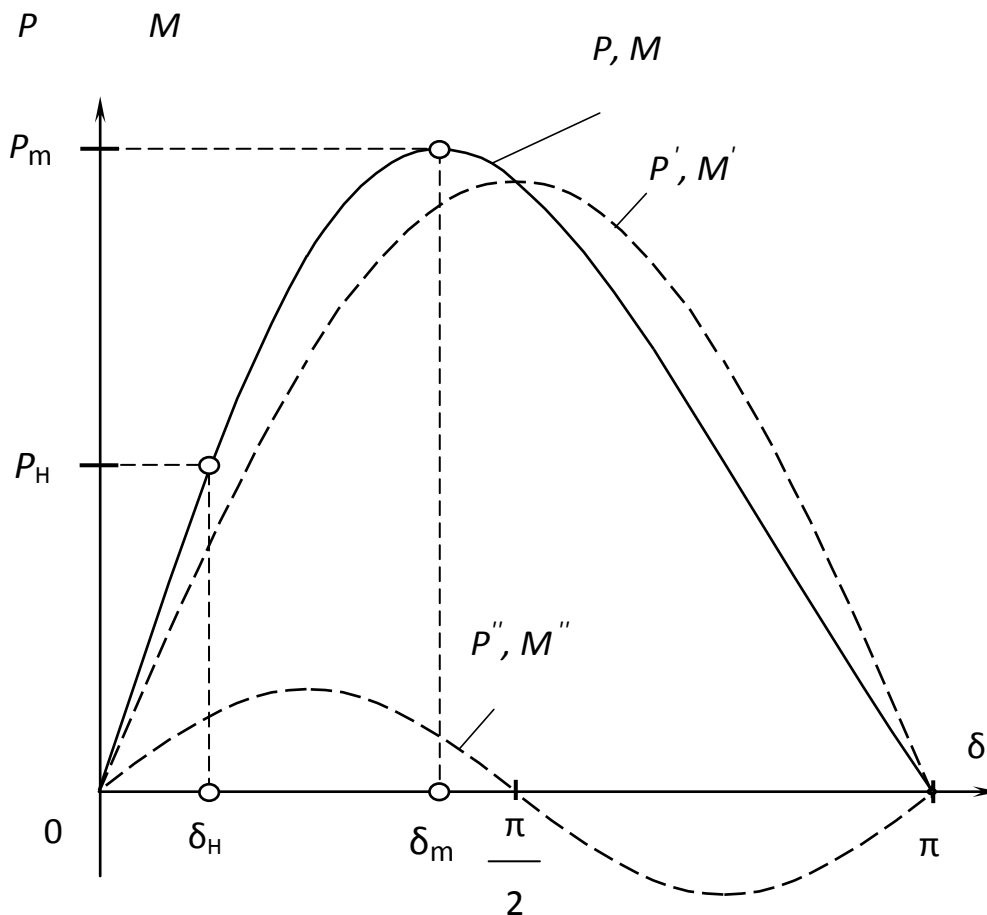


Рисунок 3.1 – Угловая характеристика мощности генератора

У таких генераторов  $\delta_H = 25^\circ - 40^\circ$ ,  $\delta_m = 90^\circ$ .

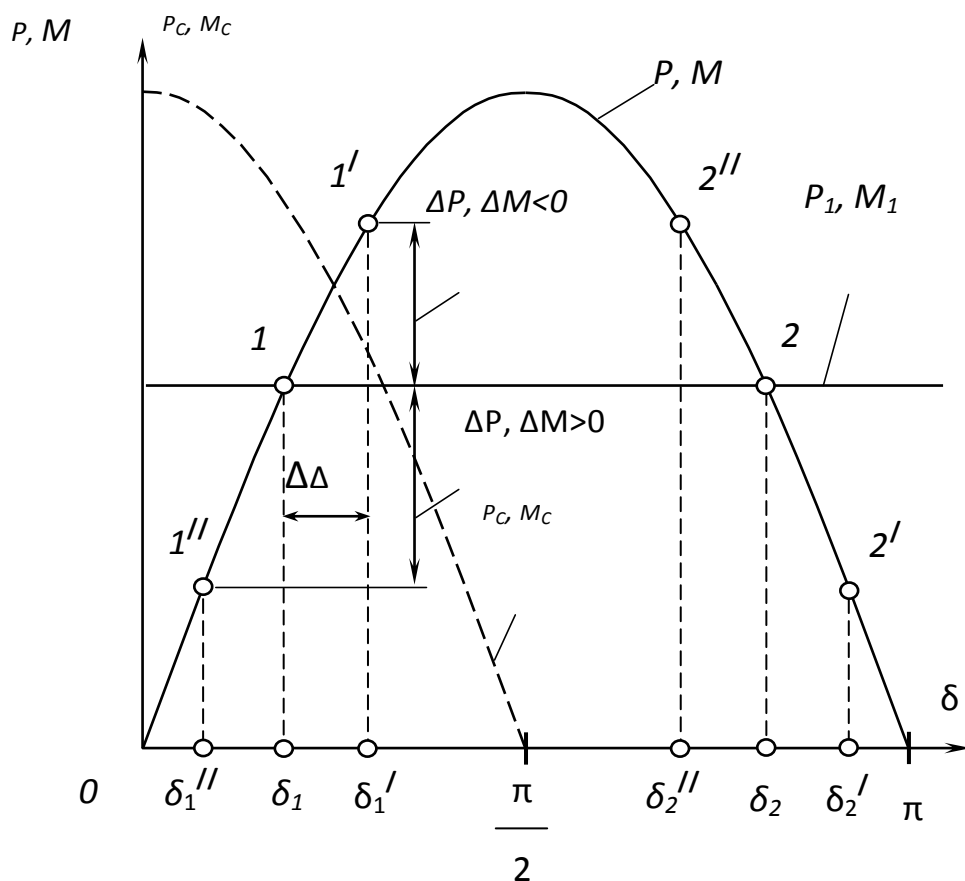


Рисунок 3.2 – К оценке статической устойчивости синхронного генератора

В установившемся режиме работы генератора механические момент  $M_1$  и мощность  $P_1$ , подводимые к валу машины от приводного двигателя или турбины, уравновешены электромагнитными моментом  $M$  и мощностью  $P$ . Равенства  $P_1 = P$  и  $M_1 = M$  справедливы в точках  $1$  и  $2$  угловой характеристики (рисунок 3.2), то есть теоретически возможен установившийся режим работы генератора с углами нагрузки  $\delta_1$  и  $\delta_2$ .

На практике частота  $f_{GS}$  и напряжение  $U_{GS}$  сети, ток возбуждения  $I_f$  и подводимая к валу механическая мощность  $P_1$  могут меняться. Небольшие изменения этих величин  $\Delta f_{GS}$ ,  $\Delta U_{GS}$ ,  $\Delta I_f$ ,  $\Delta P_1$  вызывают изменение угла нагрузки  $\delta$ . Под статической устойчивостью понимают способность синхронного генератора вернуться к исходному установившемуся режиму работы после окончания действия небольших или медленных изменений (возмущений режима работы)  $\Delta f_{GS}$ ,  $\Delta U_{GS}$ ,  $\Delta I_f$ ,  $\Delta P_1$ .

Для оценки статической устойчивости работы генератора в точках  $1$  и  $2$

([рисунок 3.2](#)) рассмотрим небольшие изменения угла  $\delta$  при постоянных механических моменте  $M_1$  и мощности  $P_1$ , подводимых к валу машины.

Если при работе генератора с углом нагрузки  $\delta_1$  по каким-либо причинам угол  $\delta$  увеличится на  $\Delta\delta$  и станет равным  $\delta_1'$ , то отдаваемая в сеть активная мощность  $P_2 \approx P$  превысит мощность приводного двигателя на  $\Delta P = P_1 - P_{(\cdot)1}' < 0$ . В машине возникает тормозной момент

$$\Delta M = \Delta P / \Omega = [P_1 - P_{(\cdot)1}'] / \Omega < 0.$$

Под воздействием  $\Delta M$  ротор генератора получит отрицательное ускорение. Частота вращения ротора  $n$  станет меньше синхронной  $n_1$  и угол  $\delta$  уменьшится до значения  $\delta_1$ , при котором выполнены условия механического равновесия  $M_1 = M$  ( $P_1 = P$ ), а частота вращения ротора  $n$  станет постоянной и равной синхронной  $n_1$ .

Если угол  $\delta$  уменьшится до  $\delta_1''$ , то подводимая механическая мощность  $P_1$  станет больше электромагнитной мощности  $P$  на  $\Delta P = P_1 - P_{(\cdot)1}'' > 0$ . Возникает вращающий момент  $\Delta M = \Delta P / \Omega = [P_1 - P_{(\cdot)1}''] / \Omega > 0$ , который сообщит ротору генератора положительное ускорение. Частота вращения ротора  $n$  будет выше синхронной  $n_1$  и угол нагрузки увеличится до значения  $\delta_1$ , соответствующего механическому равновесию  $M_1 = M$ . При  $\delta = \delta_1$  частота вращения ротора  $n$  станет постоянной и равной  $n_1$ . Следовательно **работа генератора с углом нагрузки  $\delta_1$  статически устойчива.**

При работе генератора с углом нагрузки  $\delta_2$  увеличение угла  $\delta$  до  $\delta_2' > \delta_2$  приводит к появлению вращающего момента  $\Delta M = [P_1 - P_{(\cdot)2}'] / \Omega > 0$ . Ротор получит положительное ускорение, угол  $\delta$  увеличится еще больше и генератор может выйти из синхронизма. В этом случае частота вращения ротора  $n$  больше частоты вращения магнитного поля машины  $n_1$  и угол нагрузки  $\delta$  периодически меняется от 0 до  $360^\circ$ .

Уменьшение угла  $\delta$  до  $\delta_2''$  вызовет появление тормозного момента  $\Delta M = [P_1 - P_{(\cdot)2}'' ] / \Omega < 0$  и угол  $\delta$  уменьшается до величины  $\delta_1$ , соответствующей устойчивой работе генератора. Очевидно, **работа генератора с углом нагрузки  $\delta_2$  статически неустойчива.**

В связи с произвольным выбором точек 1 и 2 ([рисунок 3.2](#)) можно сделать

вывод, что синхронный генератор работает устойчиво при  $0 \leq \delta \leq \delta_m$  и неустойчиво при  $\delta_m < \delta \leq \pi$  ( $180^\circ$ ).

Условие статической устойчивости синхронной машины

$$\frac{dP}{d\delta} > 0 \quad \text{или} \quad \frac{dM}{d\delta} > 0. \quad (3.1)$$

Разность  $\Delta P = P_1 - P$  называется **синхронизирующей мощностью**, так как за счет  $\Delta P$  возникает **синхронизирующий момент**  $\Delta M$ , под действием которого ротор приходит в положение, соответствующее установившемуся режиму работы синхронного генератора. При небольших изменениях  $\Delta\delta$  угла нагрузки

$$\Delta P = \frac{dP}{d\delta} \Delta\delta, \quad \Delta M = \frac{dM}{d\delta} \Delta\delta \quad (3.2)$$

Производные  $dP/d\delta = p_C$  и  $dM/d\delta = m_C$  называют **удельными синхронизирующими мощностью и моментом**:

$$p_C = \frac{mUE_f}{x_q} \cos \delta + mU^2 \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\delta; \quad (3.3)$$

$$m_C = \frac{mUE_f}{\Omega x_q} \cos \delta + \frac{mU^2}{\Omega} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\delta. \quad (3.4)$$

Они характеризуют устойчивость работы генератора. Наиболее устойчив режим холостого хода, при котором  $p_C$  и  $m_C$  максимальны ([рисунок 3.2](#)). С увеличением нагрузки  $p_C$  и  $m_C$  уменьшается и устойчивость работы генератора снижается. Если нагрузить генератор мощностью  $P > P_m$ , то он выйдет из синхронизма, так как при любом значении угла  $\delta$  механический вращающий момент  $M_1$  преобладает над тормозным электромагнитным моментом  $M$ . Поэтому

максимальную мощность  $P_m$  генератора при заданных постоянных  $U_{GS}, f_{GS}, I_f$  называют **пределом статистической устойчивости** или **статической перегружаемости**.

Запас статистической устойчивости генератора характеризуют отношением максимальной мощности  $P_m$  при номинальных значениях тока возбуждения  $I_f = I_{fH}$ , напряжения  $U_{GS} = U_H$  и частоты  $f_{GS} = f_H$  сети к номинальной:

$$k_{\Pi} = \frac{P_m}{P_H}. \quad (3.5)$$

Величину  $k_{\Pi}$  называют **статической перегружаемостью** или **перегрузочной способностью** генератора. Для большинства генераторов статическая перегружаемость должна быть не менее 1,7 ( $k_{\Pi} \geq 1,7$ ).

Учитывая, что  $OK3 \equiv 1/x_d$  и  $x_d \equiv 1/\delta$ , выражение (3.5) можно записать в следующем виде:

$$k_{\Pi} \equiv P_m \equiv \frac{mUE_f}{x_d} \equiv mUE_f \cdot (OK3) \equiv mUE_f \delta. \quad (3.6)$$

Статическая перегружаемость может быть повышена увеличением ОКЗ или воздушного зазора машины на стадии её проектирования. В этом случае для создания достаточно большого потока возбуждения потребуется увеличить МДС возбуждения  $F_f$ , при этом возрастет число витков или сечение витка, то есть увеличатся размеры обмотки возбуждения: возрастут габариты и стоимость ротора и всей машины.

В турбогенераторах номинальной мощностью  $P_H > 300$  МВт, воздушный зазор не превышает 90–100 мм, хотя для получения требуемой статической перегружаемости  $k_{\Pi} \geq 1,7$  зазор должен быть больше.

Причина этого в том, что по условиям механической прочности внешний диаметр ротора современных турбогенераторов  $D_2 \leq 1,2$  м и на роторе нет места для размещения более мощной обмотки возбуждения. Поэтому у

турбогенераторов мощностью более 300 МВт приходится снижать статическую перегружаемость  $k_{\Pi}$  до 1,5–1,6.

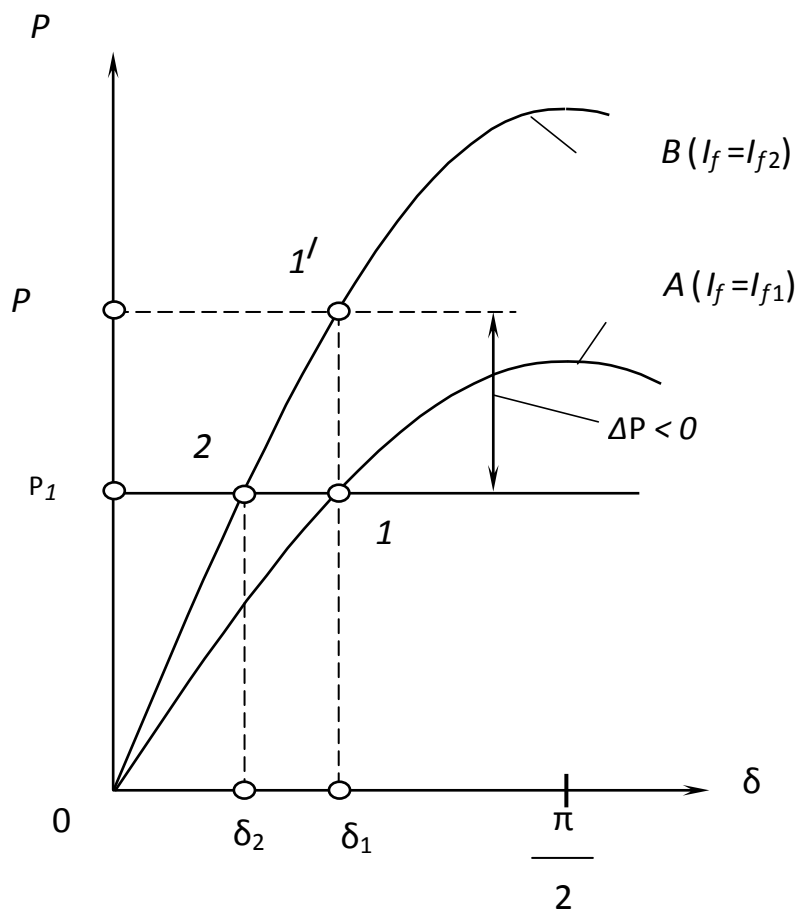


Рисунок 3.3 – Влияние возбуждения на угол нагрузки  $\delta$  при  $P_1 = \text{const}$

В условиях эксплуатации при постоянных напряжении и частоте сети статическую перегружаемость  $k_{\Pi}$  можно кратковременно повысить увеличением тока возбуждения, так как ЭДС  $E_f = f(I_f)$ .

Повышение  $k_{\Pi}$  током возбуждения не увеличит активную мощность генератора  $P_2$  при неизменной механической мощности  $P_1$  на валу. Пусть генератор работает на угловой характеристике  $A$  с углом нагрузки  $\delta_1$  при токе возбуждения  $I_{f1}$  (рисунок 3.3).

При увеличении тока возбуждения до  $I_{f2}$  генератор перейдет на соответствующую  $I_{f2}$  угловую характеристику  $B$ .

Угол  $\delta$  мгновенно измениться не может и в первый момент  $\delta = \delta_1$ .

Развиваемая генератором электромагнитная мощность  $P$  (точка  $1'$  на характеристике  $B$ ) превысит подводимую к валу механическую мощность  $P_1 = \text{const}$ .

В машине возникают синхронизирующая мощность  $\Delta P = P_1 - P < 0$  и тормозной синхронизирующий момент  $\Delta M = \Delta P / \Omega$ . Угол нагрузки уменьшится до  $\delta_2$ , при котором  $P = P_1$  (точка 2 на [рисунке 3.3](#)).

Уменьшение тока возбуждения  $I_f$  при  $P_1 = \text{const}$  увеличивает угол  $\delta$ , активная электрическая мощность генератора при этом также не изменяется.

### **3.1.3 Влияние параметров и напряжения ЛЭП на устойчивость генератора**

Как известно, сопротивление системы складывается из сопротивлений генераторов, трансформаторов и ЛЭП. Большую часть  $X_{GS}$  составляют индуктивные сопротивления генераторов. Величина предела мощности не зависит от величины сопротивлений генераторов (без АРВ) и трансформаторов и существенно зависит от сопротивления линии. При сопоставлении величины сопротивлений отдельных элементов системы, они должны быть приведены к одной ступени напряжения. При проведении сопротивления линии к напряжению генераторов, оно уменьшается в отношении  $K^2$ , где  $K$  - коэффициент трансформации повышающих трансформаторов системы. В результате этого с увеличением номинального напряжения линии индуктивное сопротивление системы в целом уменьшается и предел мощности  $P_m$  возрастает, приближаясь к пределу мощности, определяемому сопротивлениями генераторов и трансформаторов. При низком номинальном напряжении ЛЭП предельная мощность определяется в основном индуктивным сопротивлением линии и изменяется пропорционально квадрату напряжения.

Эффективным средством повышения статического предела мощности является АРВ, которым снабжены все современные генераторы. Действие АРВ



отражается в схемах замещения, применяемых для расчёта статистических пределов мощности, уменьшением индуктивного сопротивления генератора, следствием чего и является возрастание  $P_m$ .

## 3.2 Порядок выполнения работы

3.2.1 Собрать схему лабораторной установки, показанную на [рисунке 3.6](#);

3.2.2 Включить генератор на параллельную работу с сетью (пункты [2.2.1...2.2.14](#) методических указаний к лабораторной работе №1);

3.2.3 Установить номинальный ток возбуждения синхронного генератора, равный 1 А;

3.2.4 Плавно повышая напряжение управления приводного двигателя снять зависимость величины активной мощности синхронного генератора от его угла нагрузки  $P=f(\delta)$ . **ВНИМАНИЕ!** При достижении предела статической устойчивости генератор перейдёт в режим асинхронного хода. Длительное пребывание (более 10 с) в этом режиме недопустимо, поэтому, в случае потери устойчивости, необходимо:

- снизить величину напряжения управления приводным двигателем до тех пор, пока генератор не втянется в синхронизм;

- если ресинхронизация не произошла, необходимо отключить связь с трёхфазной сетью (кнопка SB2 модуля синхронизации), снять возбуждение генератора (потенциометр RP1 модуля возбуждения), отрегулировать частоту вращения электромашинного агрегата (потенциометр RP1 модуля частотного преобразователя) до номинального значения и произвести повторную синхронизацию с сетью ([см. п.2.2.2](#));

3.2.5 Установить значение тока возбуждения, соответствующее режиму холостого хода генератора (около 0,8 А);

3.2.6 Плавно нагружая генератор (увеличивая уставку частотного преобразователя) определить момент потери устойчивости и соответствующую ему величину активной мощности генератора;

3.2.7 Установить значение тока возбуждения немного ниже значения, соответствующего режиму холостого хода генератора (т.е. перевести генератор в режим потребления реактивной мощности);

3.2.8 Плавно нагружая генератор (увеличивая уставку частотного преобразователя), определить момент потери устойчивости и соответствующую ему величину активной мощности генератора;

3.2.9 Сравнить полученные результаты и сделать вывод о влиянии величины тока возбуждения синхронного генератора на его статическую устойчивость;

3.2.10 Аналогичным образом исследовать влияние сопротивления ЛЭП. Для этого выключить стенд ([п.2.2.19](#) лабораторной работы №1), установить переключатель SA1 модуля линии электропередачи в положение 2, увеличив тем самым индуктивность линии, повторить выполнение пунктов [3.2.2 – 3.2.4](#), сравнить результаты с полученными ранее и сделать выводы;

3.2.11 Повторить пункт 3.2.10, установив переключатель SA1 в положение 3;

3.2.12 Исследовать влияние напряжения электропередачи на устойчивость натурального синхронного генератора. Для этого отключить стенд и перевести ЛЭП на отпайки 127 В трансформаторов с обеих сторон линии;

3.2.13 Выполнить пункты [3.2.2 – 3.2.4](#), сравнить результаты с полученными ранее и сделать выводы;

3.2.14 Отключить стенд ([п. 2.2.18](#) лабораторной работы №1), обработать результаты и оформить [отчёт по лабораторной работе](#).

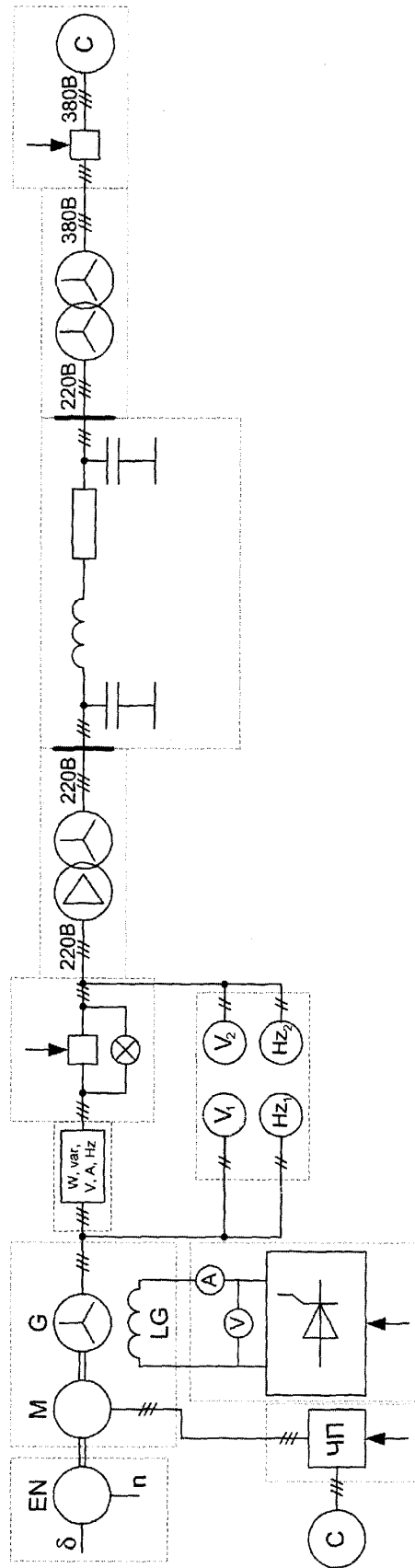


Рисунок 3.6 – Схема лабораторной установки

### 3.3 Самостоятельная работа с литературой

3.3.1 При подготовке к проведению лабораторной работы следует изучить следующий материал:

3.3.1.1 по угловым характеристикам [\[5.1.1\]](#),разд.9.4; [\[5.2.1\]](#),гл.15,16; [\[5.2.4\]](#), пп.9.6, 12.1.

3.3.1.2 по критериям статической устойчивости [\[5.1.1\]](#),разд. 9.4; [\[5.1.2\]](#),подраздел 3.2.1;

3.3.2 Для контроля усвоения литературного материала необходимо ответить на следующие вопросы:

1 Что такое угол нагрузки?

2 Каково принципиальное отличие векторной диаграммы для явнополюсного и неявнополюсного синхронного генератора?

3 Какие величины влияют на устойчивость параллельной работы генератора с системой?

4 При каких обстоятельствах возможно выпадение генератора из синхронизма?

5 Что нужно сделать, чтобы генератор, выпавший из синхронизма, вновь вошел в синхронную работу с сетью?

## 4 Лабораторная работа № 3 «Влияние режима короткого замыкания в электрической системе на её устойчивость»

### Цель работы:

- исследовать влияние на устойчивость синхронного генератора следующих факторов:

- а) вида короткого замыкания;
- б) длительности короткого замыкания;
- в) наличия регулирования тока возбуждения.

### 4.1 Теоретические положения

Режим короткого замыкания (КЗ) в электрической системе – это режим при существовании в ней КЗ. Он характеризуется, в частности, видом КЗ и его продолжительностью. Различают четыре основных вида КЗ: однофазное, двухфазное, двухфазное на землю и трехфазное. Продолжительность режима КЗ характеризуется временем, проходящим с момента возникновения КЗ до момента отключения участка электрической сети с КЗ. Это время называется временем отключения  $t_{КЗ}$ . Рассмотрим режим простейшей электрической системы при КЗ в точке К в начале одной из цепей ее линии электропередачи W ([рисунок 4.1](#)). При этом будем считать: мощность приемной системы GS бесконечно большая ( $U_{GS}=\text{const}$ ); отключены АРВ у генератора G ( $E_G=\text{const}$ ) и регулятор турбины ( $M_T=\text{const}$ ); равны нулю активные сопротивления элементов электрической системы и зарядная мощность линии W.

При возникновении КЗ в точке К в зависимости от его вида происходит шунтирование одной, двух или трех статорных обмоток генератора G от ЭДС  $E_{GS}$  фаз генератора GS приемной системы. Это обуславливает уменьшение токов статорных обмоток генератора и определяемой ими индукции магнитного поля, что, в свою очередь, согласно закону Ампера приводит к уменьшению создаваемого генератором электромагнитного момента M, то есть к появлению на валу турбоагрегата избыточного ускоряющего момента  $\Delta M=M_T-M$ , действие

которого может привести к нарушению устойчивости генератора, а значит и электрической системы в целом.

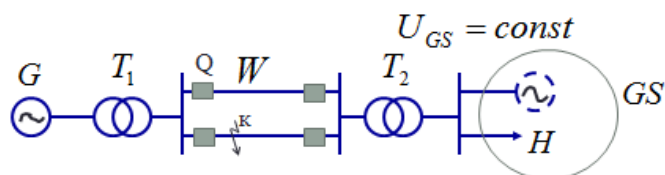


Рисунок 4.1 – Схема простейшей системы электропередачи

Уменьшение электромагнитного момента генератора происходит при любой развиваемой им активной мощности (любом угле  $\delta$ ), что обуславливает расположение характеристики момента  $M_{II}$  генератора при КЗ (в аварийном режиме) ниже аналогичной характеристики  $M_I$  до КЗ (в нормальном режиме). Очевидно, что при трехфазном КЗ имеет место полное шунтирование статорных обмоток генератора от приемной системы и поэтому генератор не создает никакого электромагнитного момента и его характеристика  $M_{II(1)}$  менее всего отличается от характеристики момента  $M_I$  нормального режима ([рисунок 4.2](#)). Характеристики момента  $M_{II(2)}$  и  $M_{II(1,1)}$  генератора соответственно при двухфазном и двухфазном на землю КЗ занимают промежуточные положения.

Предположим, что в нормальном режиме момент турбины  $M_T = M_0$ . Тогда вызванный КЗ переходный процесс в электрической системе будет аналогичен переходному процессу в ней при отключении одной цепи линии электропередачи  $W$  и иметь два возможных следствия. Первое - установление нового режима с прежней синхронной скоростью вращения генератора, но с большим значением угла  $\delta_1$  ([рисунок 4.3](#)), то есть сохранение устойчивости генератора. Второе - проворот ротора генератора относительно ротора генератора  $GS$  приемной

системы (увеличение угла  $\delta$  более чем на  $2\pi$ ), то есть нарушение его устойчивости ([рисунок 4.4](#)). При этом первое следствие характерно для однофазного КЗ, так как существующие нормы требуют обеспечения устойчивости электрической системы при однофазном КЗ, а второе следствие может иметь место при любом другом виде КЗ, например, двухфазном.

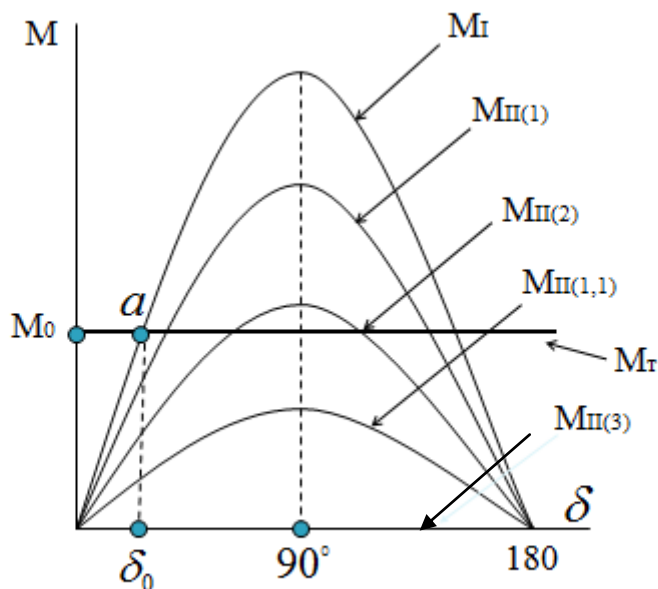


Рисунок 4.2 – Угловые характеристики в разных режимах

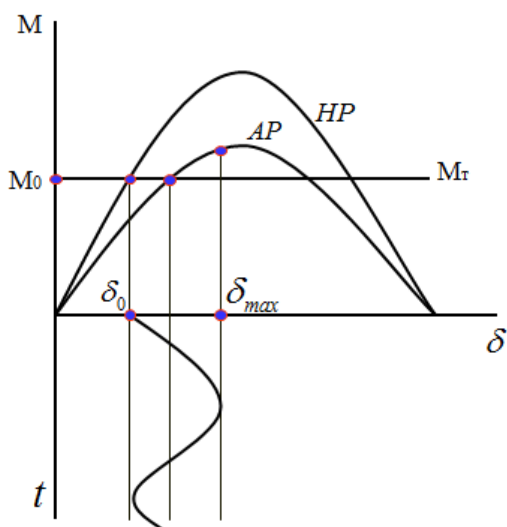


Рисунок 4.3 – Устойчивый режим при КЗ

Изложенные выше рассуждения проведены в предположении, что время существования КЗ не ограничено. В действительности же режим КЗ сопряжен не только с возможностью потери устойчивости электрической системы, но и еще с рядом нежелательных последствий, например, тепловым действием токов КЗ. Поэтому продолжительность этого режима, как правило, ограничивают и делают это путем отключения через время  $t_{\text{отк}}$  участка электрической сети, где возникло КЗ. В рассматриваемом случае отключают с двух сторон выключателями Q цепь линии W, на которой возникло КЗ ([рисунок 4.1](#)). В результате прекращается шунтирующее действие КЗ на статорные обмотки, но токи в них не восстанавливаются до значений, имевших место в исходном режиме, вследствие ограничения их большим индуктивным сопротивлением линии электропередачи, равным сопротивлению одной, а не двух параллельных цепей, как это было в исходном режиме. Поэтому характеристика мощности МП генератора в режиме с отключенной цепью линии электропередачи (в послеаварийном режиме) располагается между характеристиками мощности МI и МII генератора соответственно в нормальном и аварийном режимах ([рисунок 4.5](#)).

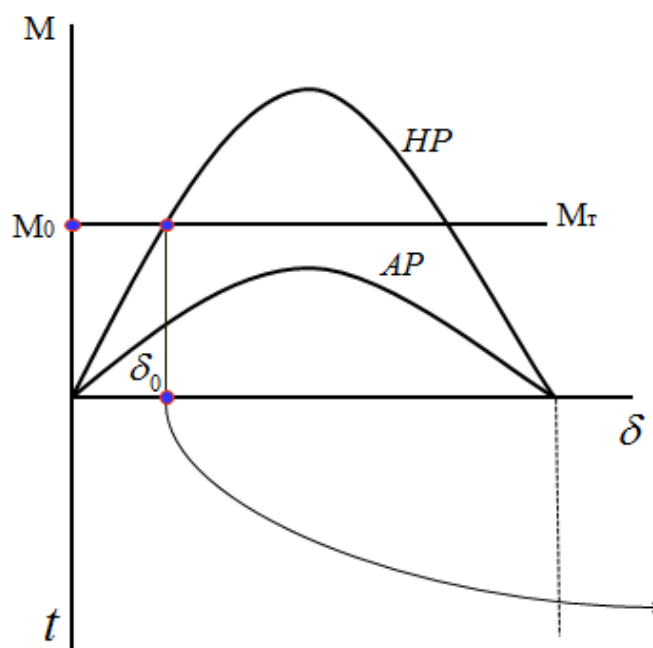


Рисунок 4.4 – Нарушение устойчивости при КЗ



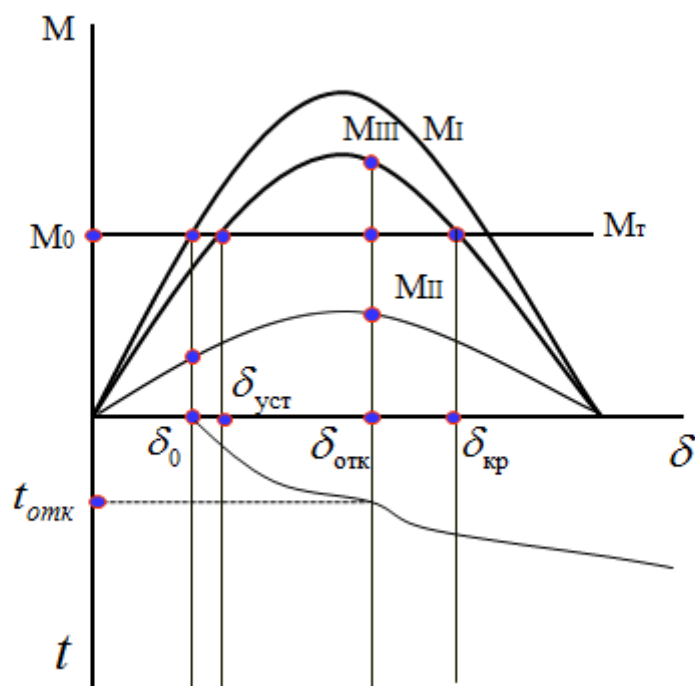


Рисунок 4.5 – Нарушение устойчивости при отключении КЗ

В рассматриваемом случае при приведенном на рисунке 4.5 взаимном расположении характеристик моментов  $M_I$ ,  $M_{II} < M_{III}$  генератора для различных режимов и момента  $M_T$  турбины в аварийном режиме (при КЗ) на валу турбоагрегата действует избыточный момент  $\Delta M = M_T - M_{II}$  под действием которого генератор ускоряется, что сопровождается прогрессирующим увеличением угла  $\delta$ . В момент  $t_{отк}$  (при  $\delta = \delta_{отк}$ ) отключения КЗ аварийный режим сменяется послеаварийным, в котором генератор в соответствии с характеристикой момента  $M_{III}$  создает больший, чем в аварийном режиме, электромагнитный момент и поэтому на валу турбоагрегата уже действует избыточный момент  $\Delta M = M_T - M_{III}$ , под действием которого генератор тормозится, что сопровождается замедлением увеличения угла  $\delta$ . Если при торможении угол  $\delta$ , достигнув критического значения  $\delta_{кр}$ , несколько превысит его, то характер избыточного момента сменится на ускоряющий, что вновь приведет к прогрессирующему увеличению угла  $\delta$ , превышению им значения  $2\pi$ , означающему проворот ротора генератора  $G$  относительно ротора генератора  $GS$  приемной системы, то есть к потере устойчивости генератором  $G$  (рисунок 4.5). Если отключение КЗ осуществить быстрее, то есть уменьшить  $t_{отк}$ , то при последующем торможении генератора

скорость его вращения может снизиться до синхронной раньше, чем угол  $\delta$  достигнет критического значения  $\delta_{кр}$ . Поэтому угол  $\delta$ , достигнув максимального значения  $\delta_m$  в дальнейшем будет изменяться относительно установившегося значения  $\delta_{уст}$  и по завершении переходного процесса станет равным ему (рисунок 3.6), то есть скорость вращения генератора восстановится до синхронной, что будет означать сохранение им устойчивости.

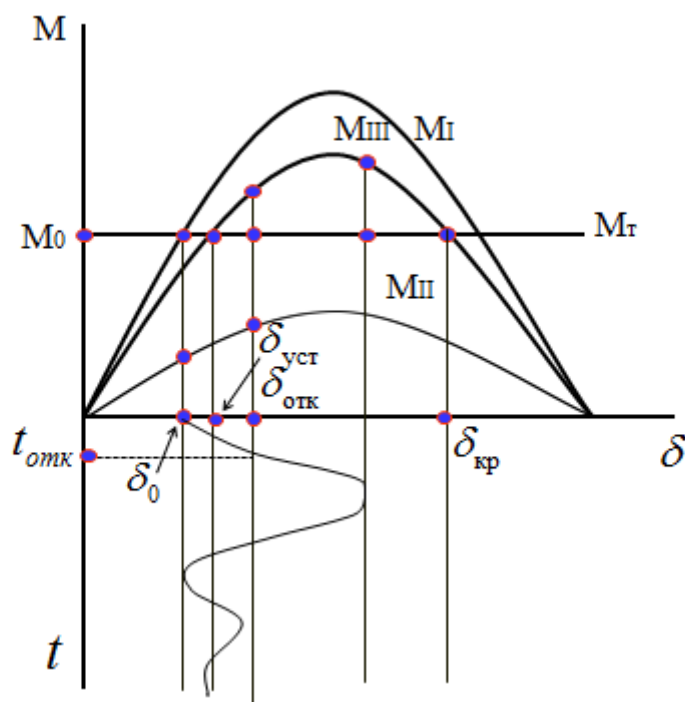


Рисунок 4.6 – Сохранение устойчивости при отключении КЗ

Возможность обеспечения устойчивости генератора путем уменьшения времени отключения  $t_{отк}$  КЗ обусловлена, с одной стороны, уменьшением в результате этого времени ускорения генератора, а потому и запасаемой им при этом дополнительной кинетической энергии и, с другой стороны, увеличением возможного времени торможения генератора (времени от момента отключения КЗ до достижения углом  $\delta$  критического значения  $\delta_{кр}$ ), в течение которого кинетическая энергия генератора уменьшается. Устойчивость генератора сохраняется в случае, когда запасенная генератором при ускорении дополнительная кинетическая энергия полностью выводится из него при торможении. Это условие осуществимо всегда, так как уменьшая время

отключения  $t_{отк}$  КЗ можно уменьшить интервал ускорения генератора, а следовательно и дополнительно запасенную им кинетическую энергию, сделав их сколь угодно малыми. Поэтому всегда существует некоторое предельное время  $t_{пр}$  отключения КЗ - такое, что при отключении КЗ ранее его ( $t_{отк} < t_{пр}$ ) генератор устойчивость сохраняет ([рисунок 4.6](#)), а при отключении позднее ( $t_{отк} > t_{пр}$ ) - теряет ([рисунок 4.5](#)). Предельное время  $t_{пр}$  отключения КЗ является величиной, определяемой при расчете динамической устойчивости электрической системы. Динамической, потому, что КЗ приводит к большому возмущению режима этой системы.

Ранее было показано, что возможности генератора G по созданию электромагнитного момента МП в аварийном режиме зависят от вида КЗ. Причем эти возможности при однофазном КЗ больше чем при двухфазном КЗ, при двухфазном КЗ больше чем при двухфазном КЗ на землю, а при двухфазном КЗ на землю больше чем при трехфазном КЗ ([рисунок 4.2](#)). Поэтому быстрее всего генератор будет разгоняться при трехфазном КЗ и медленнее всего - при однофазном КЗ, так как в первом случае ускоряющему моменту Мт турбины не будет никакого противодействия, а во втором случае ему будет противодействовать наибольший электромагнитный момент. Более быстрый разгон генератора означает и более быстрое увеличение его кинетической энергии. Возможности же уменьшения этой энергии после отключения КЗ любого вида одинаковы. Поэтому при трехфазном КЗ кинетическая энергия генератора быстрее достигнет предельного уровня и во избежание его превышения, то есть потери устойчивости генератора, оно должно быть отключено быстрее чем другие виды КЗ. Аналогично рассуждая, приходим к выводу, что двухфазное КЗ на землю по критерию устойчивости генератора следует отключить раньше, чем двухфазное КЗ, которое, в свою очередь, следует отключить раньше чем однофазное КЗ.

Так как величина момента Мт турбины непосредственно определяет ускорение генератора в аварийном режиме, то есть скорость увеличения его кинетической энергии, то очевидно, что сохранение устойчивости более

нагруженного активной мощностью генератора при КЗ в электрической системе, требует и более быстрого отключения КЗ.

Возникновение КЗ в электрической системе ([рисунок 4.1](#)) может привести не только к потере устойчивости генератора  $G$ , но также и нагрузки  $H$ . Действительно, снимая допущение о постоянстве напряжения  $U_{GS}$  на шинах приемной системы, а значит и нагрузки  $H$ , можно заметить, что при КЗ в точке  $K$  электрической системы понижаются уровни напряжений в любых ее точках, в том числе, и на нагрузке  $H$ . Снижение же напряжения на нагрузке, может привести к опрокидыванию входящих в ее состав асинхронных двигателей, то есть к потере устойчивости нагрузки. Вероятность такого события возрастает при более близком к нагрузке возникновении КЗ, вследствие большей посадки напряжения на ней.

## 4.2 Порядок выполнения работы

4.2.1 Собрать схему, показанную на [рисунке 4.7](#), в которой модуль трёхфазного выключателя  $Q$  используется в качестве короткозамыкателя. На рисунке показан вариант сборки схемы для проведения опыта трёхфазного короткого замыкания в середине ЛЭП (используются два модуля ЛЭП). Меняя схему соединений одной из сторон выключателя, можно получить все виды короткого замыкания. Для обеспечения достаточной величины тока однофазного короткого замыкания нейтрали трансформаторов со стороны ЛЭП и нейтрали самих ЛЭП должны быть объединены. Поперечные составляющие ЛЭП должны быть включены (переключатели  $SA2$  и  $SA3$  в положении 2);

4.2.2 Включить генератор на параллельную работу с сетью;

4.2.3 Установить исходный режим загрузки синхронного генератора, приблизительно равный половине его номинальной мощности (регулируя напряжение задания частотного преобразователя);

4.2.4 Отрегулировать ток возбуждения для перевода генератора в режим выдачи реактивной мощности (регулируя напряжение задания модуля возбуждения);

4.2.5 Провести опыт короткого замыкания (включить выключатель Q и отключить его через несколько секунд) одновременно наблюдая за режимом работы генератора.

***В случае потери устойчивости выполнить действия по ресинхронизации генератора с сетью;***

4.2.6 Повторить опыт при других видах КЗ (однофазное, двухфазное, двухфазное на землю). При этом ток возбуждения должен оставаться неизменным ( $i_f = \text{const}$ );

4.2.7 Повторить опыты при других значениях тока возбуждения (больше и меньше начального);

4.2.8 Исследовать влияние длительности существования установившегося режима короткого замыкания. Для этого провести серию опытов **двухфазного короткого замыкания** длительностью 0,5 с. (включить сразу отключить выключатель Q) и длительностью 2-3 с. При этом подобрать такое соотношение загрузки генератора активной мощностью (управление частотным преобразователем) и тока возбуждения (управление модулем возбуждения), при которых кратковременный режим КЗ не нарушает устойчивости параллельной работы синхронного генератора, а более длительный режим КЗ приводит к потере устойчивости;

4.2.9 Сравнить полученные результаты и сделать выводы. Оформить [отчёт по лабораторной работе.](#)

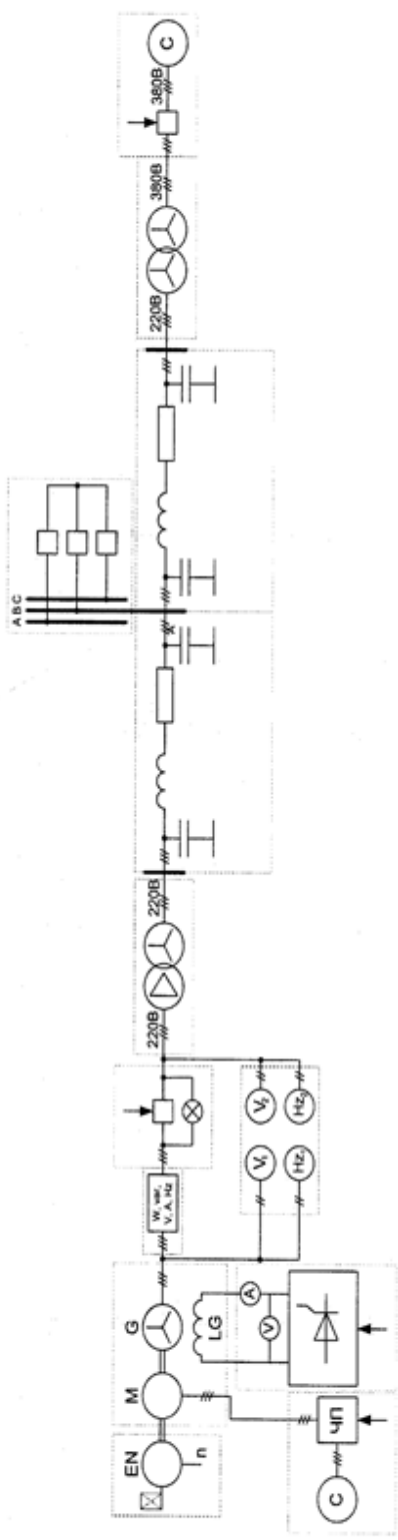


Рисунок 4.7 – Схема лабораторной установки

### 4.3 Самостоятельная работа с литературой

4.3.1 При подготовке к проведению лабораторной работы следует изучить следующий материал:

- по динамической устойчивости [5.1.1], разделы 10.2 – 10.4;

4.3.2 Для контроля усвоения литературного материала необходимо ответить на следующие вопросы:

1 В чём состоит правило площадей и какова его физическая интерпретация?

2 Что такое аварийный шунт и как определяется его величина при различных видах КЗ?

3 В каком случае и в связи с чем уравнение относительного движения ротора генератора может быть решено в общем виде?

4 Что такое метод последовательных интервалов и для чего он применяется?

5 Как определяются предельные значения угла и времени отключения КЗ?

6 Что такое коэффициент запаса динамической устойчивости?

7 Каков характер изменения угла  $\delta$  во времени при сохранении и нарушении динамической устойчивости системы?

## **5 Рекомендуемая литература**

### **5.1 Основная**

5.1.1 Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах/Ю.А.Куликов. – М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003.

5.1.2 Шабад В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / В.К.Шабад. – М. : Издательский дом «Академия», 2013. Режим доступа: <http://nashol.com/2015072985930/elektromehanicheckie-perehodnie-processi-v-elektroenergeticheskikh-sistemah-uchebnoe-posobie-dlya-studencheskikh-uchrejdений-visshego-professionalnogo-obrazovaniya-shabad-v-k-2013.html>

5.1.3 Мотыгина, С.А. Эксплуатация электрической части тепловых электростанций/С.А.Мотыгина - М.:Энергия,1979.

5.1.4 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей.- М.:Энергоатомиздат,2008. Режим доступа: <http://energ2010.ru/Doc/Elektro/PTEES/>

### **5.2 Дополнительная**

5.2.1 Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах/В.А.Веников - М.: Высшая школа, 1985.

5.2.2 Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций/А.А.Васильев - М.:Энергия,1980.

5.2.3 Усов, С.В. Электрическая часть электростанций/С.В.Усов - Л.: Энергия, 1980.

5.2.4 Вольдек А.И. Электрические машины/В.А.Вольдек - М.: Энергия, 1969.



## **Приложение А**

### **Содержание отчёта по лабораторной работе**

Отчет должен быть выполнен в соответствии с действующими государственными стандартами и СТО 02069024.101-2015.

В представляемом отчете должна быть кратко сформулирована цель работы и приведены следующие материалы:

- требуемые схемы;
- таблицы результатов измерений;
- построенные графические зависимости;
- выводы и заключения.