

## Пусковые режимы ТГ и ГГ

Процедура безаварийного включения синхронной машины в сеть называется синхронизацией. В зависимости от последовательности действий различают способ точной синхронизации и способ грубой или самосинхронизации

При включении электрических машин в сеть возникают пусковые токи, которые при определенных условиях соизмеримы с токами короткого замыкания и могут привести к снижению напряжения сети, а если процесс пуска затянется к недопустимому перегреву машины. Поэтому при выборе способа пуска необходимо учитывать и эту сторону процесса, т.е. после пуска машины ее температура не должна превышать допустимую.

## Пусковые режимы ТГ и ГГ

Если пуск машины осуществляется из холодного состояния, то при наборе нагрузки слишком высокая скорость повышения температуры может привести к недопустимым тепловым и механическим напряжениям, деформациям, повреждениям и отказам машины.

Таким образом, в пусковом режиме работы синхронной машины можно выделить три этапа:

- начальный разворот ротора,
- синхронизация,
- набор нагрузки.

# Начальный разворот ротора

Способы начального разворота мощных синхронных машин:

- начальный разворот приводным или разгонным двигателем;
- асинхронный способ начального разворота;
- частотный способ начального разворота;
- комбинированный способ.

На электрических станциях для вращения генераторов используются в зависимости от типа электростанции паровые и газовые турбины (в этом случае генераторы называются турбогенераторами), гидравлические турбины (гидрогенераторы), двигатели внутреннего сгорания (дизель-генераторы), ветряные колеса и другие приводные двигатели.

В связи с наличием приводного двигателя у генераторов электростанций при пуске этих машин не возникает больших проблем с получением начальной скорости вращения: здесь в качестве разгонного двигателя используется приводной.

## Пуск турбогенератора

Пуск ТГ является одной из ответственных операций в процессе включения его на параллельную работу. Этот процесс должен быть увязан с работой тепломеханического оборудования.

Подготовка к пуску ТГ должна начинаться заблаговременно, после окончания монтажных и ремонтных работ.

В объем подготовительных работ перед пуском ТГ входит тщательный осмотр ТГ и его вспомогательного оборудования: систем маслоснабжения, систем охлаждения, систем возбуждения, состояния первичных и вторичных цепей защиты, коммутационной аппаратуры, проверки состояния изоляции обмоток ротора, статора, цепей возбуждения и всего вспомогательного электрооборудования.

# Пуск турбогенератора

Существенным моментом при пуске является толчок ротора ТГ, после которого частота вращения на определенное время устанавливается в пределах 400-500 об./мин. При прослушивании ТГ не должно быть появления стука, задевания и т.д. С появлением металлического задевания вращающихся частей генератора, повышенной вибрации, нарушения нормальных параметров системы охлаждения, повышенных нагревов машины и другим причинам нужно устранить их после чего можно продолжить пуск.

Скорость подъёма частоты вращения ТГ определяется условиями прогрева турбины. Критические скорости для роторов Турбины и Генератора, которые известны для них, необходимо проходить при подъёме частоты без задержек во избежание опасных вибраций агрегата.

После достижения номинальной частоты вращения агрегата персонал должен убедиться в отсутствии ненормальных отклонений в работе вращающихся частей ТГ и перейти к операциям по подготовке включения ТГ в сеть

## Начальный разворот методом разгонного двигателя

В методе разгонного двигателя для начального разворота синхронной машины используется вспомогательный асинхронный двигатель с фазным ротором, смонтированный на валу главной машины и пускаемый от сети с использованием реостата, присоединенного к обмотке ротора разгонного двигателя.

Мощность разгонного двигателя выбирается из соображений стоимости и приемлемой длительности пуска и обычно находится в пределах от 1 до 10% мощности главного агрегата. Этот метод является технически простым и эффективным.

Он получил достаточно широкое распространение для пуска обратимого агрегата на ГАЭС

## Начальный разворот асинхронным способом

Синхронные машины не имеют синхронного пускового момента. Однако роторы современных машин выполняются с демпферными обмотками, необходимыми для повышения динамической устойчивости в аварийных режимах. Эти обмотки изготавливаются в виде «беличьей клетки». Поэтому при включении таких машин в сеть в них возникает асинхронный пусковой момент, который может обеспечить их начальный разворот. Это обстоятельство позволяет использовать асинхронный способ начального разворота синхронных машин.

Последовательность асинхронного способа :

- синхронную машину без возбуждения включают в сеть на полное или частично пониженное напряжение при нормальной частоте;
- разгоняют ее до подсинхронной скорости;
- включают возбуждение.

## Начальный разворот частотным способом

При частотном способе обмотку статора пускаемой синхронной машины соединяют электрически со статором другой синхронной машины, частота вращения которой может плавно изменяться от нуля до синхронной. Ее мощность должна составлять не менее 30...50% мощности пускаемой машины.

Последовательность способа:

- 1) обе машины подключают к отдельной системе шин непосредственно или через трансформатор;
- 2) при неподвижном состоянии или очень малой частоте вращения ведущего генератора машины возбуждают от посторонних источников. При этом у ведущей машины устанавливают номинальный ток возбуждения, а у ведомой такой, чтобы ЭДС холостого хода при синхронной частоте вращения была примерно в 2 раза меньше номинального напряжения. Это обеспечивает в пускаемой машине наибольший электромагнитный момент;



## Начальный разворот частотным способом

3) постепенно увеличивают частоту вращения ведущей машины – ведомая машина также начинает набирать обороты. Синхронизирующий момент  $M_c$ , увлекающий при этом ведомую машину, будет тем больше, чем меньше угол  $\delta$  между роторами ведущей и ведомой машин;

4) при достижении обеими машинами номинальной частоты вращения их обмотки возбуждения переключают на собственное (рабочее) возбуждение, после чего обе машины могут быть включены в сеть методом точной синхронизации.

Для предотвращения перегрева обмотки возбуждения вращение роторов обеих машин должно быть начато сразу же после подачи возбуждения (так как при неподвижном состоянии отсутствует вентиляция).

Частотный способ начального разворота можно также осуществить с помощью тиристорного преобразователя частоты.

Частотный способ нашел применение для включения синхронных компенсаторов и обратимых агрегатов на ГАЭС.

## Начальный разворот комбинированным способом

При комбинированном методе невозбужденную ведомую машину подключают к невозбужденному ведущему генератору, вращающемуся с частотой  $f = (0,15 \dots 0,8) \cdot f_n$  при фиксированном открытии направляющего аппарата гидротурбины. Затем ведущий генератор возбуждается и появляющийся при этом асинхронный двигательный момент ускоряет ведомую машину и тормозит ведущий генератор.

После достижения одинаковой скорости ведомая машина возбуждается, а дальше обе машины ускоряются турбиной до номинальной (синхронной) частоты вращения

# Синхронизация

При включении на параллельную работу СМ с другими СМ необходимо избегать чрезмерно большого толчка тока и возникновения ударных электромагнитных моментов и сил, способных вызвать повреждение ТГ и другого оборудования и системы.

Потому необходимо надлежащим образом отрегулировать режим работы СМ на хх перед его включением на параллельную работу и в надлежащий момент включить в сеть.

Совокупность этих операций называется синхронизацией.

Способы синхронизации:

1. способ точной синхронизации
2. способ самосинхронизации

# Синхронизация

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, а также это может привести к качаниям в энергосистеме и тяжелым нарушениям энергоснабжения потребителей.

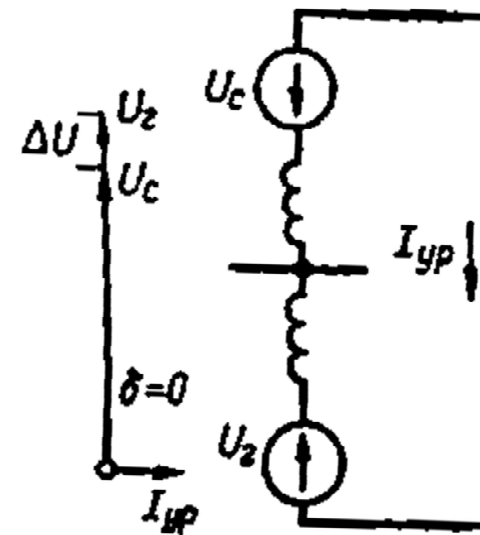
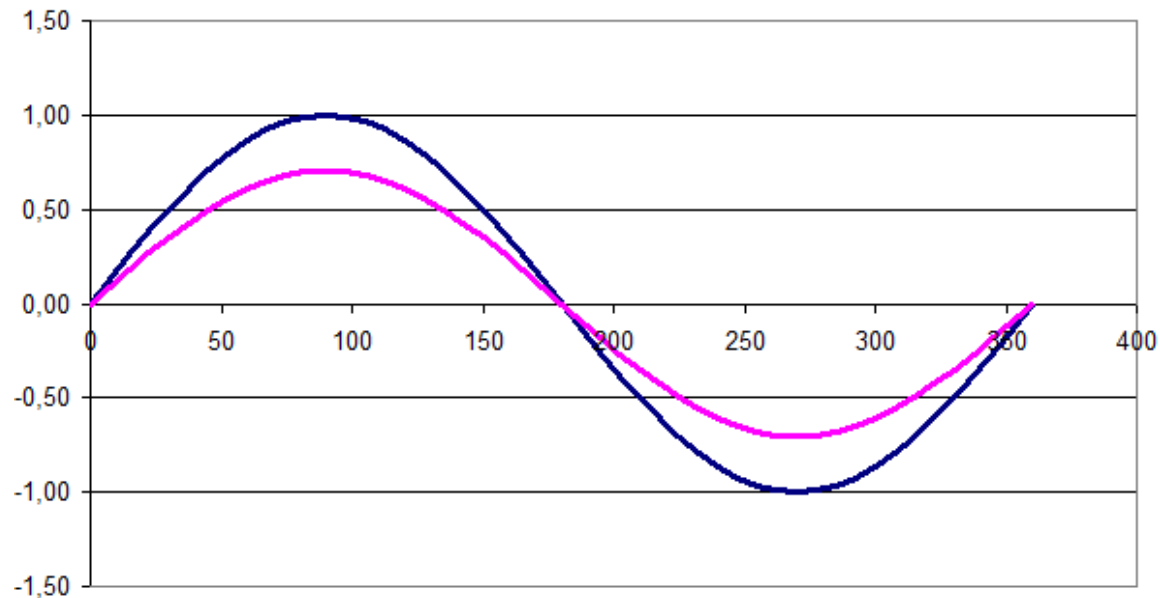
# Метод точной синхронизации

Метод точной синхронизации может производиться вручную или автоматическом режиме

Условиями, необходимыми для включения синхронизируемой машины в сеть 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 %);

# Метод точной синхронизации



$$I''_{\text{ВКЛ}} = \frac{\Delta U}{x''_d + x_c},$$

# Метод точной синхронизации

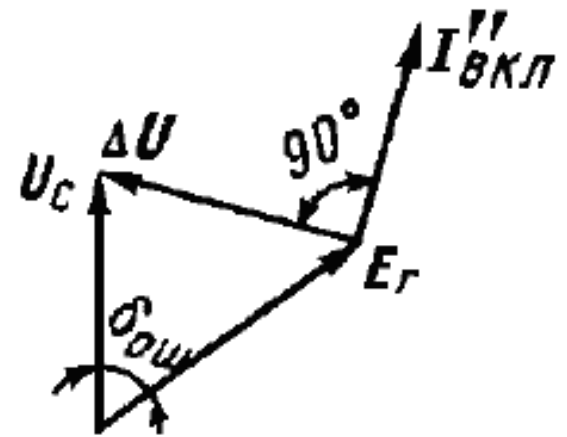
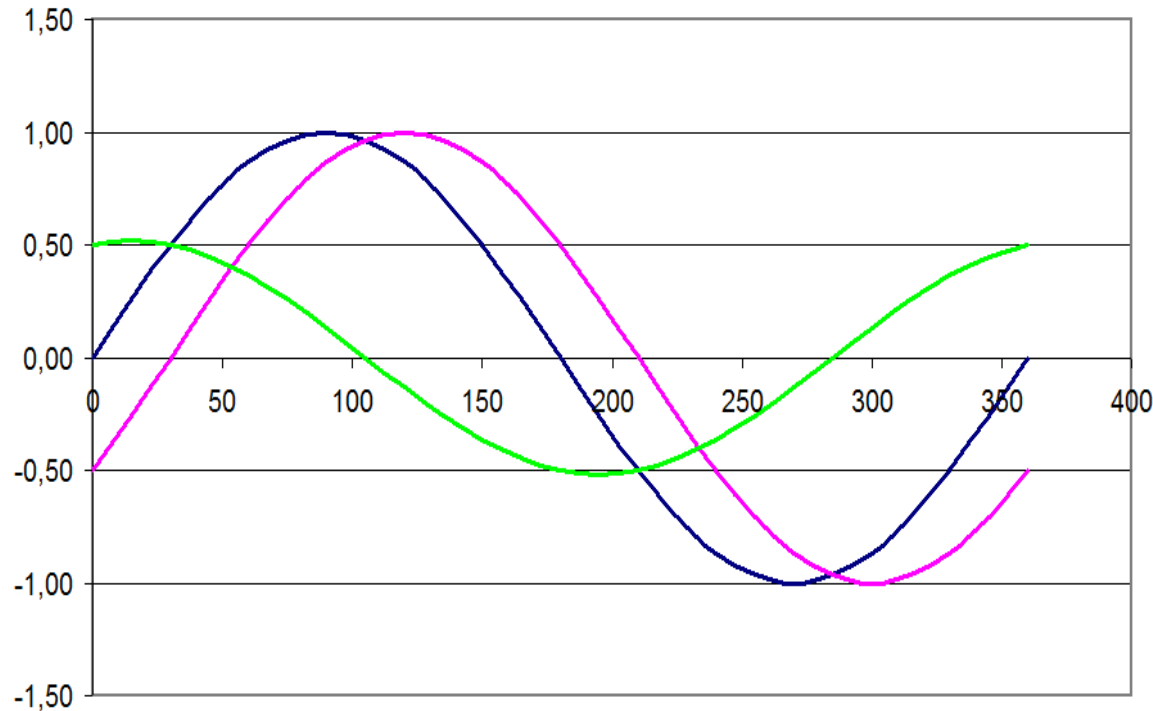
2) совпадение фаз этих напряжений (во всех случаях включения способом точной синхронизации следует стремиться к тому, чтобы угол между напряжением генератора и сети в момент включения не превышал  $10^\circ$  )

Опасно включение генератора при несовпадении напряжений по фазе, так как именно фазовый сдвиг вызывает толчки тока статора и электромагнитного момента на валу.

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

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, через который генератор подключается к сети.

# Метод точной синхронизации



$$\Delta U = 2 \cdot U \cdot \sin \frac{\delta_{\text{ош}}}{2};$$

$$I''_{\text{ВКЛ}} = \frac{\Delta U}{x''_d + x_c},$$

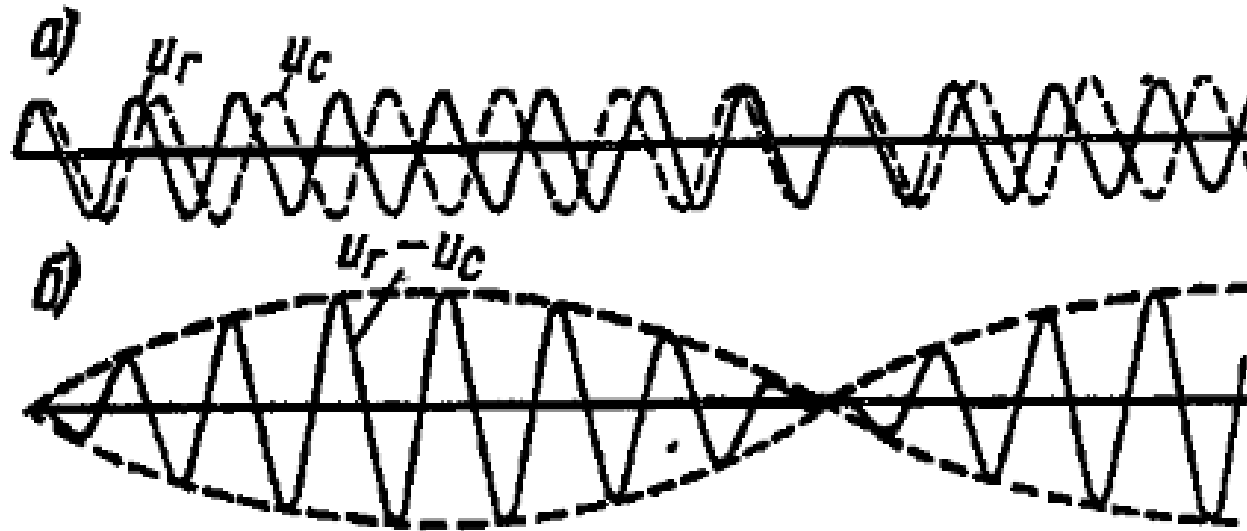


# Метод точной синхронизации

3) 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, что соответствует движению стрелки синхроноскопа по часовой стрелке с периодом 1 оборот за 20...10 с.

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 резких качаниях стрелки синхроноскопа включать генератор не допустимо

# Метод точной синхронизации



$$\Delta U = U_c \cdot (\sin \varpi_1 t - \sin \varpi_2 t) = 2U_c \sin \frac{\varpi_1 + \varpi_2}{2} t \cdot \cos \frac{\varpi_1 - \varpi_2}{2} t$$

$$U_s = 2U_c \sin \frac{\varpi_1 + \varpi_2}{2} t = 2U_c \sin \frac{\varpi_s}{2} t$$

# Метод точной синхронизации

Точной ручной синхронизации свойственны следующие недостатки

- 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.

# Метод самосинхронизации

При способе самосинхронизации (этот способ используется как дополнительный к основному) синхронизируемая машина с обмоткой возбуждения, замкнутой на гасительное сопротивление при отключенном АГП включается в сеть без возбуждения. Частота машины и частота сети должны при этом расходиться не более чем на 2%

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

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

$$I_{\text{сс}} = \frac{U_{\text{с}}}{x_{\text{д}}'' + x_{\text{с}}} \quad U_{\text{вкл}} = U_{\text{с}} \cdot \frac{x_{\text{д}}'' + x_{\text{доп}}}{x_{\text{д}}'' + x_{\text{доп}} + x_{\text{с}}},$$

# Метод самосинхронизации

Применение метода самосинхронизации значительно упрощает процесс включения. Такой способ включения генераторов на параллельную работу имеет ряд существенных преимуществ перед способом точной синхронизации:

1. Простота, исключающая возможность каких-либо ошибок со стороны персонала, и отсутствие в связи с этим требования высокой квалификации персонала, производящего включение генератора.
2. Отсутствие возможности повреждения обмоток статоров при ошибочном включении генератора.
3. Простота автоматизации процесса включения генераторов.
4. Быстрота включения, так как время, необходимое для подключения генератора на параллельную работу способом самосинхронизации, ограничивается лишь временем разворачивания генератора и собственными временами включения выключателя и АГП.
5. Возможность включения генераторов на параллельную работу при глубоких посадках частоты и напряжения.

Недостатки метода самосинхронизации:

1. Толчок тока в момент включения невозбужденного генератора в сеть
2. Кратковременное понижение напряжения в момент включения

# Набор нагрузки

После включения генератора в сеть его необходимо загрузить. Однако **скорость увеличения нагрузки турбогенератора ограничена. Она определяется временем, необходимым для постепенного нагрева турбины.** В нормальных условиях скорость изменения нагрузки турбоагрегата лежит в пределах 250...300 кВт/мин при первом нагружении и 1 МВт/мин при прогретой турбине, а время набора нагрузки составляет несколько часов. **Нарушение требования постепенного набора нагрузки недопустимо. Оно может привести к серьезным механическим повреждениям теплосилового оборудования.** Например, чрезмерно быстрый набор нагрузки может привести к большему удлинению ротора турбины по сравнению с корпусом турбины и отключению ее защитой от осевого сдвига, а в худшем случае и к задеванию лопаток ротора за диафрагмы. Поэтому скорость подъема нагрузки должна быть указана в местных инструкциях для каждого типа турбогенератора.

# Набор нагрузки

**Резкие изменения нагрузки турбоагрегата могут приводить также к значительным тепловым и механическим напряжениям в узлах и деталях генератора, что негативно сказывается на его работе. Вследствие различия в тепловых постоянных времени стали и меди резкие изменения нагрузки машины будут приводить к относительному перемещению стержней обмотки в пазах и могут вызвать механические повреждения изоляции, ее смятие или разрывы.**

*Ввиду того, что условия теплового расширения стержней обмоток статора и ротора существенно различаются (обмотка статора неподвижна, а обмотка ротора вращается), их поведение в условиях быстрого нагревания и охлаждения должно быть рассмотрено отдельно.*

# Набор нагрузки

При увеличении нагрузки статора и тепловом удлинении стержней его обмотки происходит деформация изоляционной оболочки, подвергающейся растягивающим усилиям. Механические напряжения в материале изоляции зависят от скорости деформации. Из-за значительной силы сцепления медь и изоляция удлиняются одинаково. Следовательно, поведение изоляции в условиях переменной нагрузки определяется скоростью деформации стержня обмотки при увеличении тока (а значит и температуры) в нем.

Скорость относительного удлинения стержней обмоток статора при внезапном приложении к нему полной токовой нагрузки с обычной для современных мощных машин номинальной плотностью тока, составляет

$$v_{\text{удл}} = \frac{dl}{d\tau} = (0,125 \dots 0,250) \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$$

Возникающие при этих скоростях напряжения растяжения и разрушающие напряжения в изоляции для нее не опасны. Следовательно, рассматриваемый режим внезапного изменения нагрузки статора от нуля до максимального значения не опасен с точки зрения механической прочности изоляции его обмотки.



# Набор нагрузки

**Стержни обмотки вращающегося ротора при внезапном нагружении полным током и повышении их температуры не могут свободно удлиняться в пазах ротора, так как этому препятствуют силы трения, возникающие при вращении ротора из-за центробежных усилий. Поэтому перемещения обмотки ротора относительно бочки ротора, вызываемого разностью их температур и температурных коэффициентов, во вращающемся роторе не наблюдается, а тепловое удлинение медных стержней переходит в деформацию сжатия. Если при этом предел текучести меди будет превзойден, то деформация окажется необратимой. В результате, после остановки и остывания машины стержни укоротятся по сравнению с исходным состоянием.**

*Несмотря на остаточные температурные деформации медных стержней обмотки ротора, случаи аварийного ограничения нагрузки ротора при косвенном охлаждении весьма редки. Значительно опаснее такие деформации обмотки в турбогенераторах с непосредственным охлаждением ротора. При укорочении витков в вентиляционных каналах стержней возникает сужение проходного сечения, и условия охлаждения резко ухудшаются, приводя к местным перегревам обмотки ротора. Поэтому у турбогенераторов с непосредственным охлаждением ротора не допускаются остаточные температурные деформации меди.*

# Набор нагрузки

С этой точки зрения особенно опасным является внезапное повышение нагрузки ротора после достижения машиной полной скорости при ее пуске (например, при самосинхронизации). В этом случае из-за резкого различия тепловых постоянных меди и стали, разность их температур может достигать больших значений, при которых температурные напряжения в меди значительно выше предела пропорциональности, что неизбежно приведет к остаточным деформациям.

Этим объясняется требование ПТЭ о постепенном наборе нагрузки генератором в соответствии с повышением нагрузки турбины при ее прогреве. Однако на аварийные ситуации, когда требуется быстрое увеличение реактивной мощности при аварийных понижениях напряжения в сети, это условие не распространяется ввиду их кратковременности.

Гидротурбины – тихоходные машины, рабочая температура которых не отличается от температуры окружающей среды, и поэтому с точки зрения эксплуатации они значительно проще паровых турбин. Гидравлическая турбина не ограничивает скорость подъема нагрузки, поэтому набор нагрузки гидрогенератора производится в течение нескольких минут