

Лекционные материалы

Дисциплина «Электроэнергетические системы и сети»

Разработаны доцентом кафедры «Электроэнергетические системы»
ВятГУ Вычегжаниным А.В.

Регулирование частоты в электроэнергетической системе

- Критерии оценки качества частоты
- Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах
- Регулирование частоты в послеаварийных режимах

Критерии оценки качества частоты

Качество частоты в энергосистеме оценивают по отклонению и колебанию частоты.

Отклонение частоты Δf - это алгебраическая разность между фактическим значением частоты и ее номинальным значением:

$$\Delta f = f - f_{\text{НОМ}}; \quad \Delta f \% = \frac{f - f_{\text{НОМ}}}{f_{\text{НОМ}}} 100\%.$$

Отклонение частоты допускается:

- нормальное - $\pm 0,2$ Гц;
- кратковременное максимальное - $\pm 0,4$ Гц.

Приведенные нормы отклонений частоты относятся к нормальному режиму работы энергосистемы и не распространяются на аварийные режимы.

Критерии оценки качества частоты

В энергосистеме возможны кратковременные быстрые изменения частоты, называемые **колебаниями частоты**. Значительные колебания частоты нарушают технологические процессы некоторых сложных производственных механизмов, поэтому они не должны превышать $\pm 0,2$ Гц сверх допустимых отклонений частоты.

Строгие требования, предъявляемые к качеству частоты для обеспечения технически возможной и экономической работы электростанций, электрических сетей и электроприемников, вызывают проблему **регулирования частоты**.

Регулирование частоты в системе

Частота является общесистемным параметром!

Регулирование частоты в энергетических системах требует изменения мощности, которую выдают генераторы. Мощность генераторов и ее изменения определяются мощностью турбин, которыми эти генераторы приводятся во вращение.

Процесс регулирования частоты в система принято разделять на:

- регулирование в нормальных режимах;
- регулирование в аварийных режимах работы системы.

Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

Турбины электростанций оснащаются автоматическими регуляторами скорости.

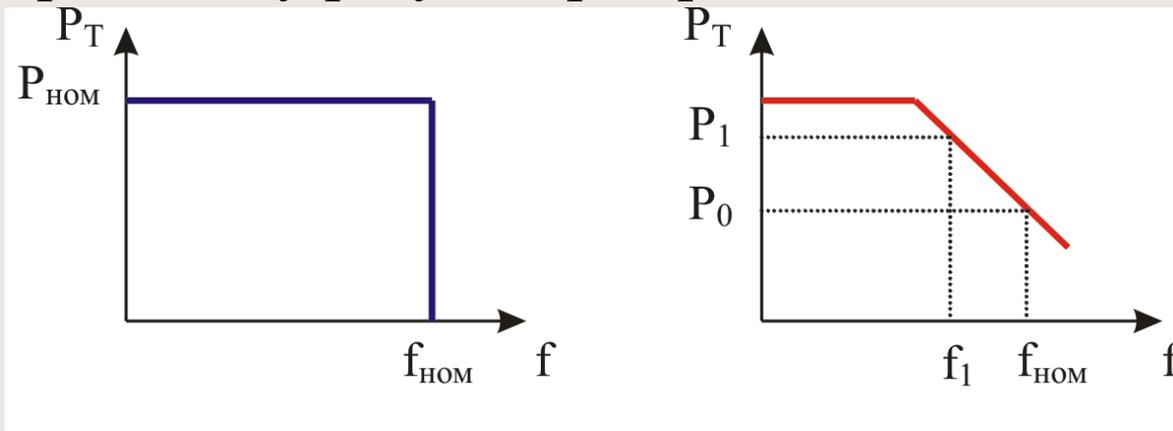
Принцип регулирования заключается в том, что при изменении частоты регулятор изменяет отпуск энергоносителя (пара или воды) через турбину: при снижении частоты увеличивает отпуск энергоносителя, а при повышении частоты – уменьшает его.

Таким образом, регуляторы скорости турбин оказывают **стабилизирующее** влияние на частоту в системе и поэтому часто называются первичными регуляторами частоты.

Процесс изменения частоты под действием этих регуляторов называются **первичным регулированием частоты.**

Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

Регулятор скорости турбины может иметь **астатическую** или **статическую** характеристику. Под действием регулятора либо восстановится номинальная частота, либо установится некоторая новая частота f_1 , близкая к $f_{ном}$. Реальные регуляторы скорости имеют статическую характеристику. Добиться астатической характеристики у регулятора практически очень трудно.

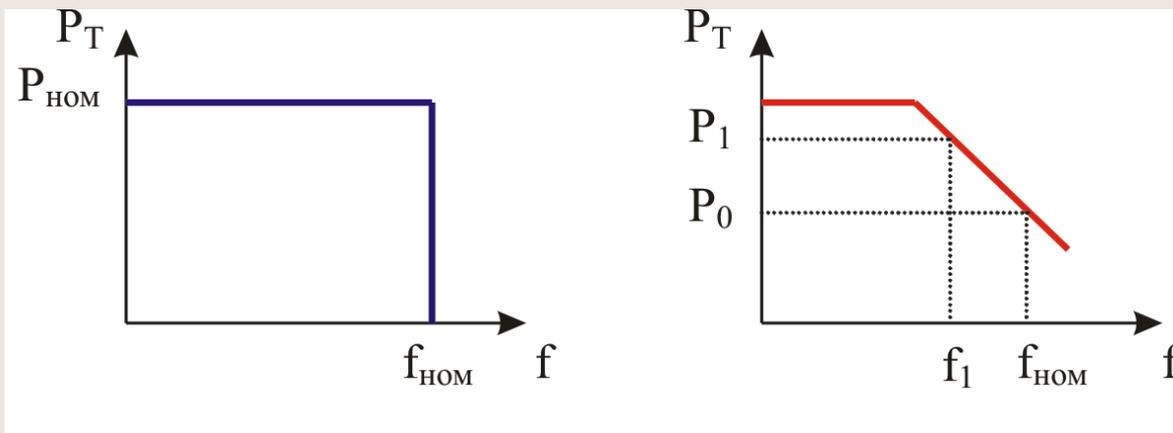


Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

Наклон характеристики принято называть крутизной:

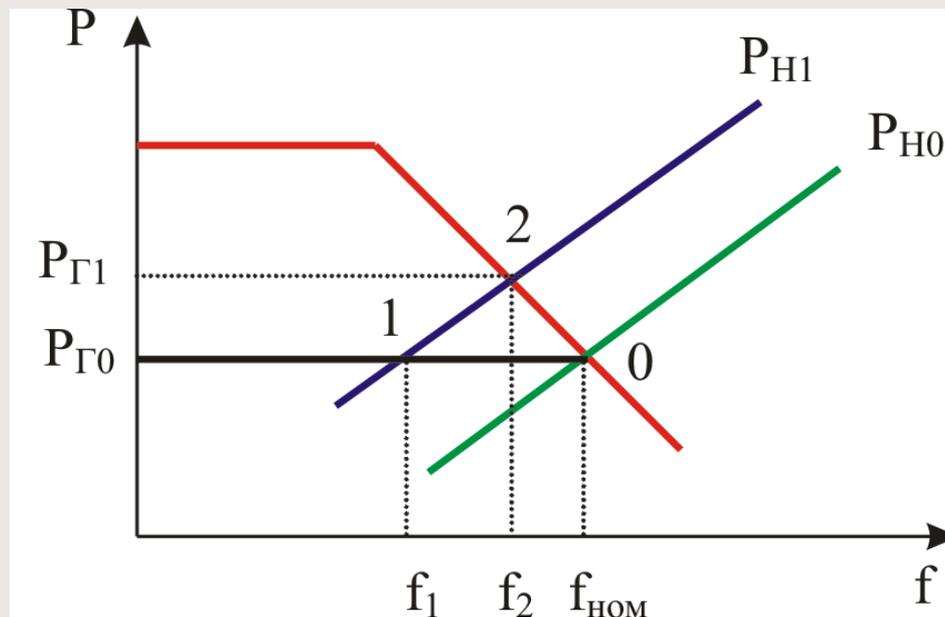
$$\frac{\Delta P_G}{P_{СИСТЕМЫ}} : \frac{\Delta f}{f_{НОМ}} = K$$

для тепловых станций $K=15-20\%$,
для гидравлических $K=25-50\%$.



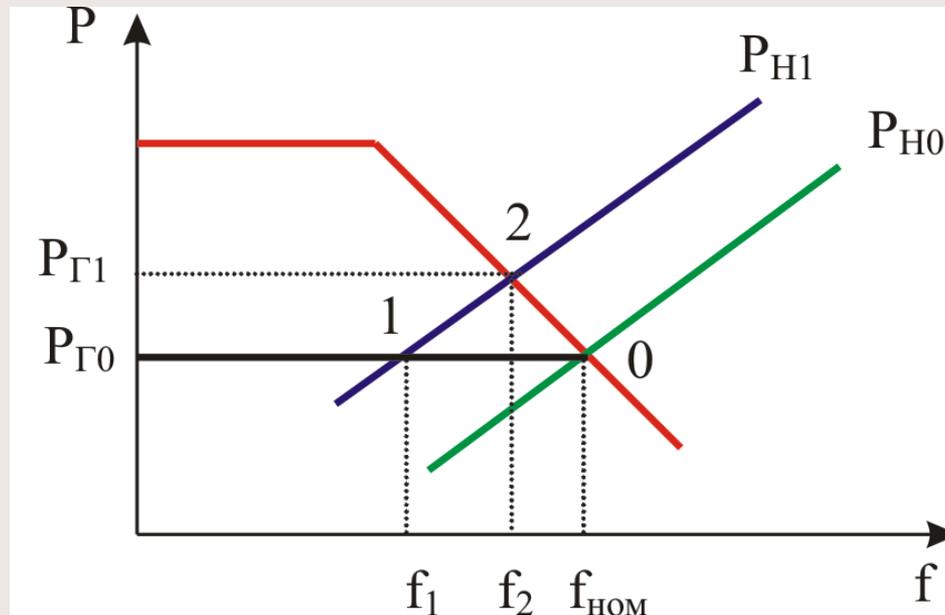
Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

Первичное регулирование частоты непрерывно осуществляется всеми электростанциями автоматически, персонал станции и диспетчер энергосистемы в этот процесс не вмешиваются.



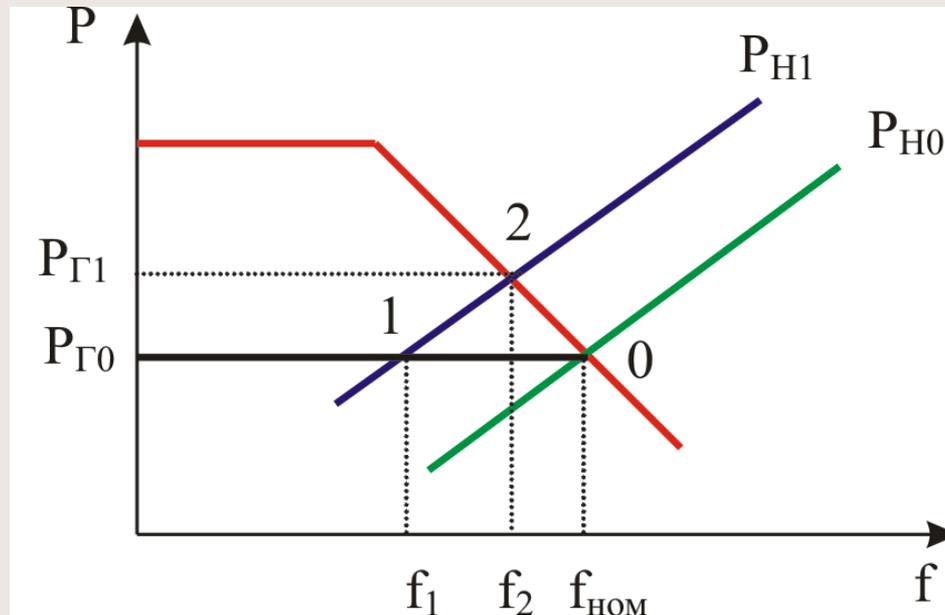
Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

В исходной точке 0 существовал баланс $P_{Г0} = P_{Н0}$ при $f_{ном}$. При увеличении нагрузки до $P_{Н1}$ частота по статической характеристике снизилась до f_1 (точка 1).



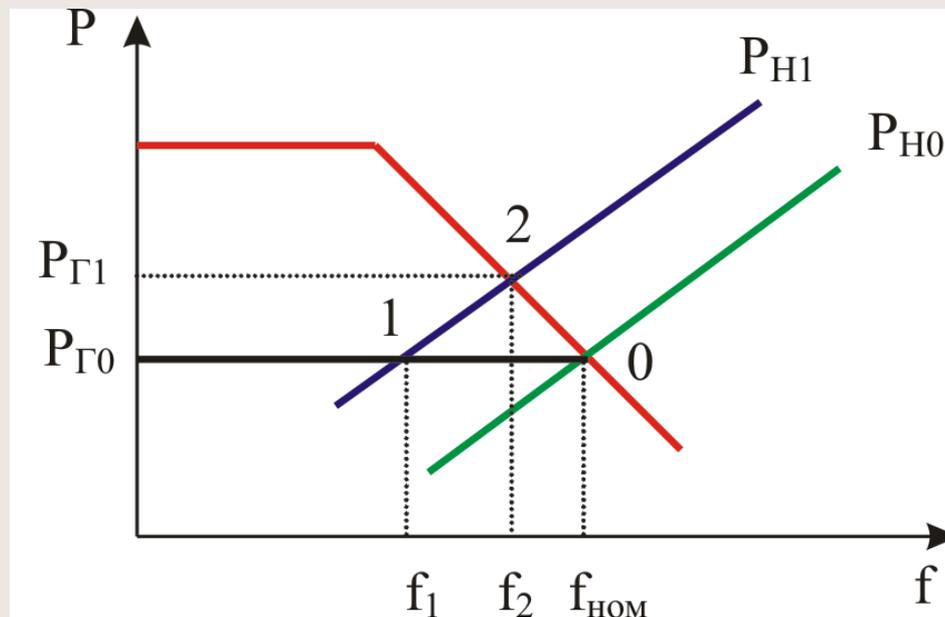
Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

Если отсутствует регулирование скорости турбины, то баланс может установиться при частоте $f_1 : P_{Г0} = P_{Н1}$,



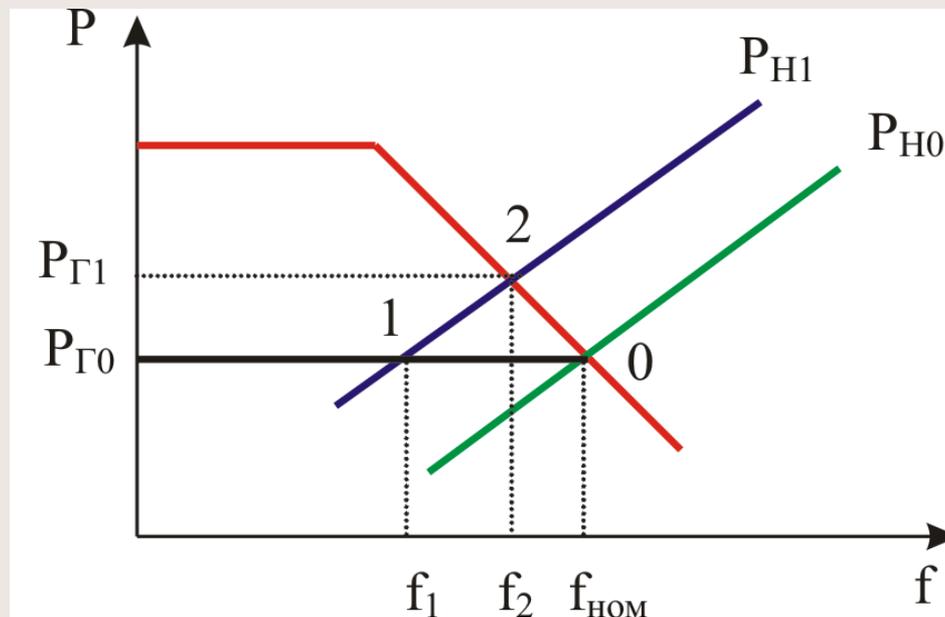
Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

Но регулятор скорости турбины увеличивает впуск энергоносителя и генератор набирает часть нагрузки:
 $\Delta P = P_{Г1} - P_{Г0}$. Устанавливается новый баланс $P_{Г1} = P_{Н1}$ при частоте f_2 (точка 2).



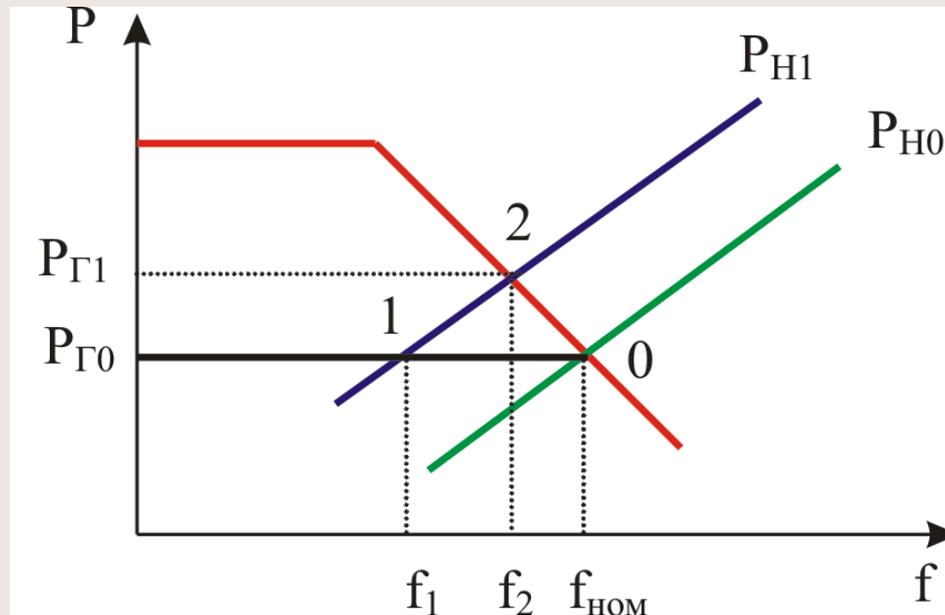
Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

При **первичном регулировании** большую нагрузку набирают генераторы с большей номинальной мощностью и крутизной характеристики.



Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

Если отклонение частоты f_2 от $f_{ном}$ больше допустимого, то для дополнительной корректировки частоты в системе применяется **вторичное регулирование частоты**.



Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

В процессе **вторичного регулирования** также осуществляется изменение мощности, развиваемой турбинами, в зависимости от частоты.

Вторичное регулирование ведется либо автоматическими регуляторами частоты (вторичными регуляторами скорости), либо вручную обслуживающим персоналом станции, который контролирует частоту по показаниям приборов.

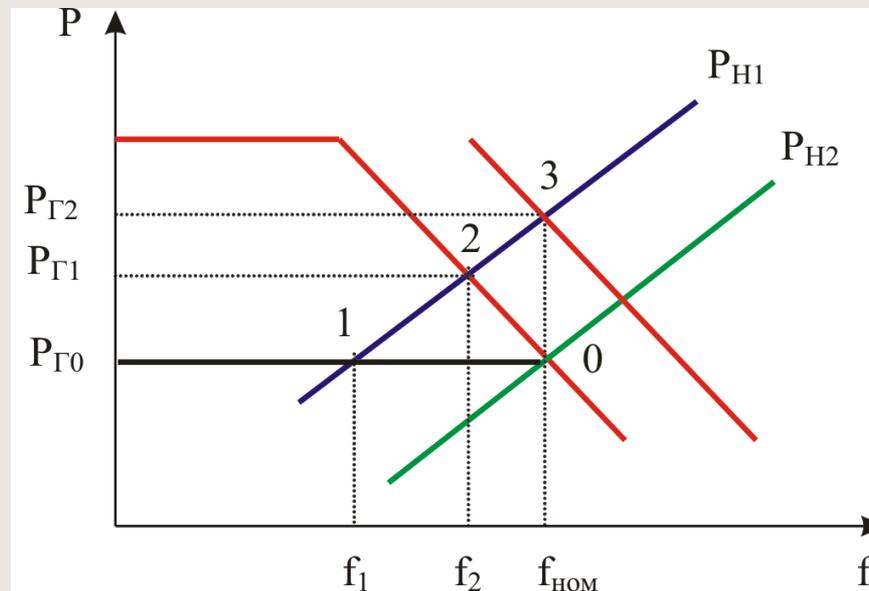
Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

В отличие от первичного регулирования частоты, в котором принимают участие все станции, **для вторичного регулирования выбирают одну или несколько станций с большой крутизной характеристики регулятора скорости турбины.**

Все остальные станции получают задание поддерживать постоянное значение P_G и участвовать в первичном регулировании частоты.

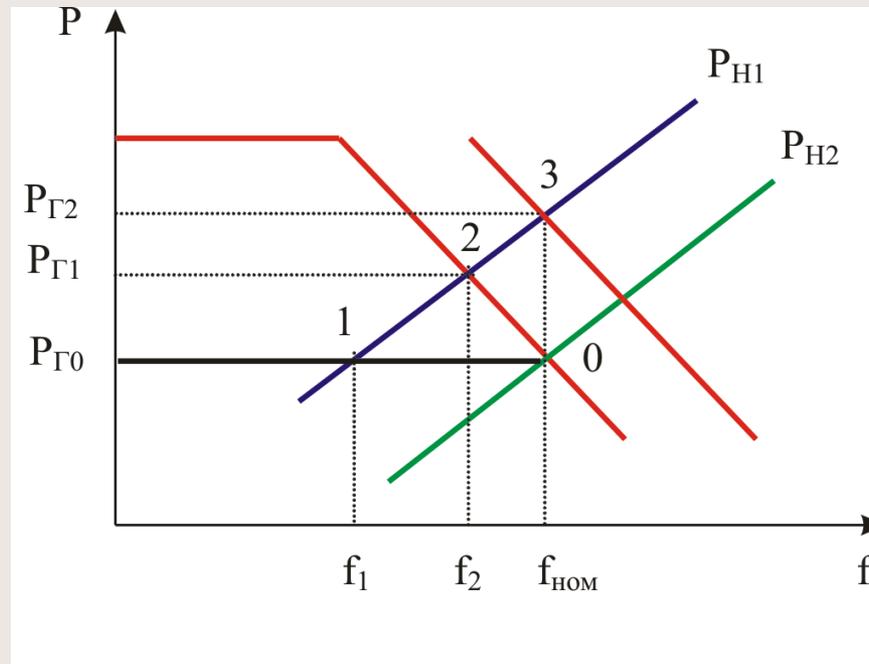
Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

В результате вторичного регулирования статическая характеристика турбины перемещается параллельно самой себе до тех пор, пока частота не станет номинальной (точка 3), мощность генератора при этом увеличивается до $P_{Г2}$.



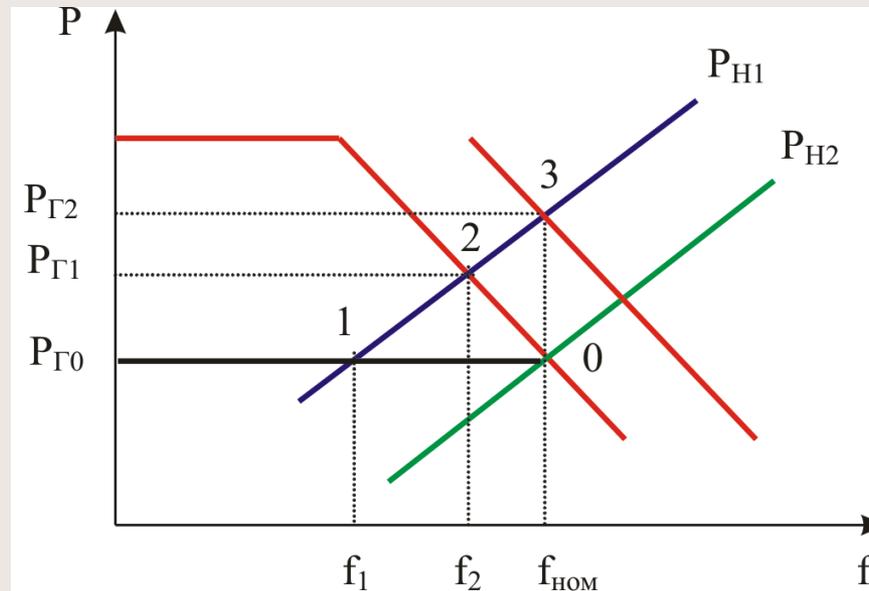
Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

Наилучшее качество частоты может быть достигнуто при автоматическом регулировании, если оно осуществляется совместно с экономическим распределением активных нагрузок между станциями.



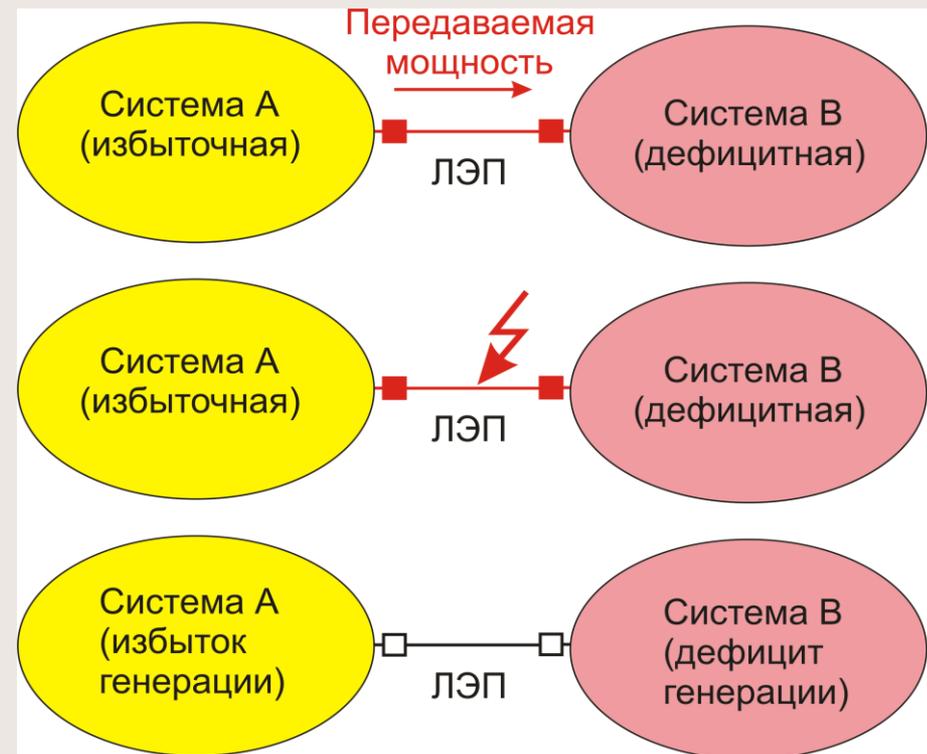
Регулирование частоты в энергосистемах в нормальных режимах

При выборе частоторегулирующих станций (наиболее подходящими для этой цели являются крупные ГЭС) необходимо учитывать пропускную способность линий электропередачи, связывающих электростанции энергосистемы.



Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах

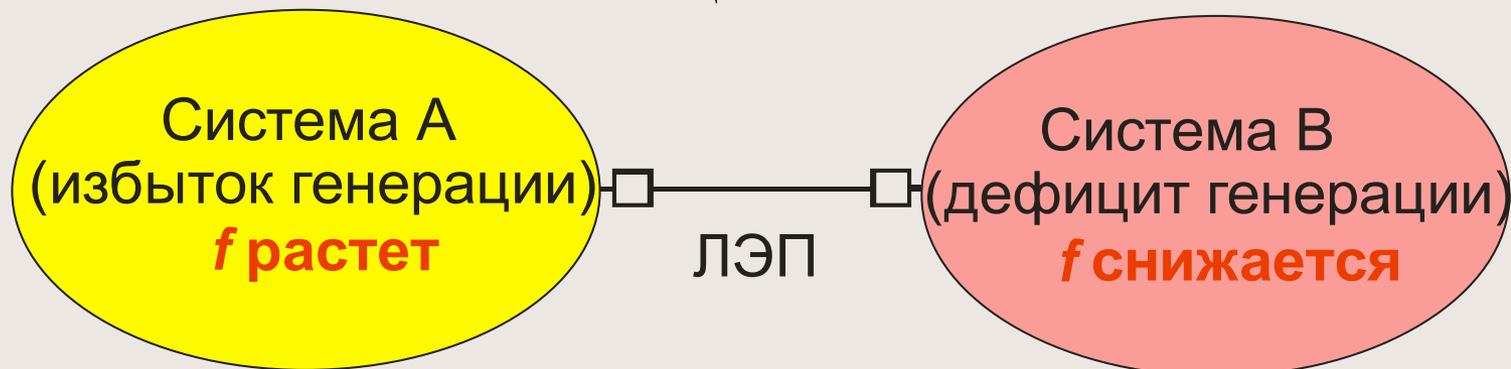
Послеаварийный режим связан со значительными отклонениями частоты, возникающими после отключения части генераторов, а также нагруженных системообразующих или межсистемных линий.



Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах

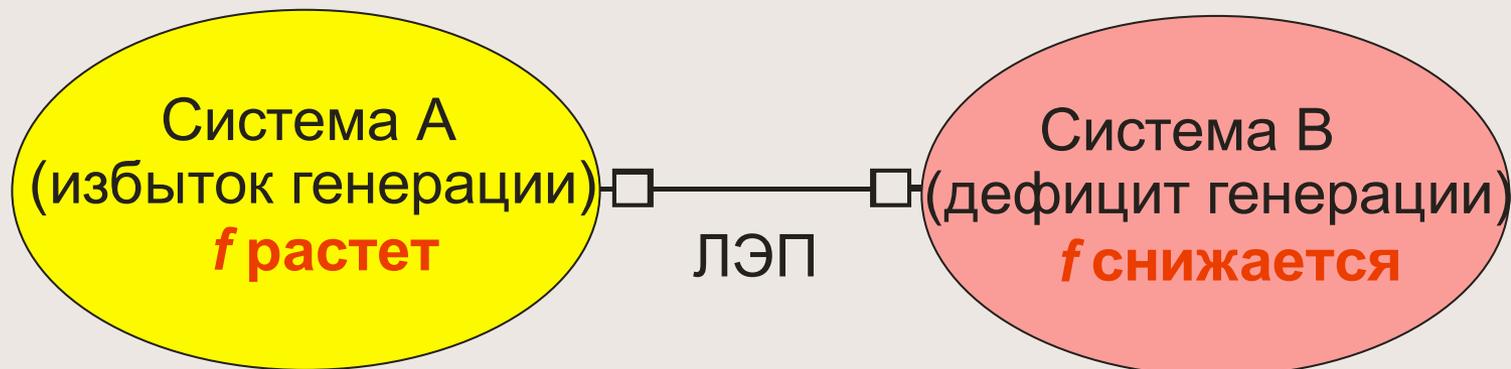
Послеаварийный режим связан со значительными отклонениями частоты, возникающими после отключения части генераторов, а также нагруженных системообразующих или межсистемных линий.

В этом случае **система может оказаться разделенной на части**, в некоторых из этих частей возникает **дефицит** активной мощности и частота падает, а в других – **избыток** активной мощности и частота повышается.



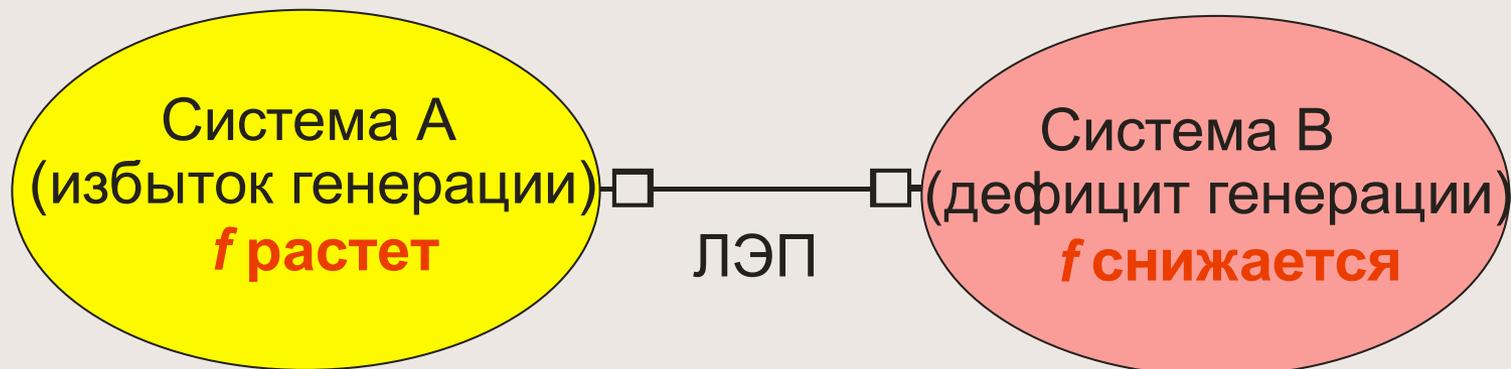
Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах

При увеличении частоты из-за возникшего избытка активной мощности в результате первичного и вторичного регулирования электрические станции могут оказаться на технологическом минимуме, т.к. первичное регулирование будет снимать нагрузку, что, в свою очередь, может привести к недопустимому увеличению температуры и давления пара; эти параметры становятся такими, что происходит **аварийное отключение агрегата**.



Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах

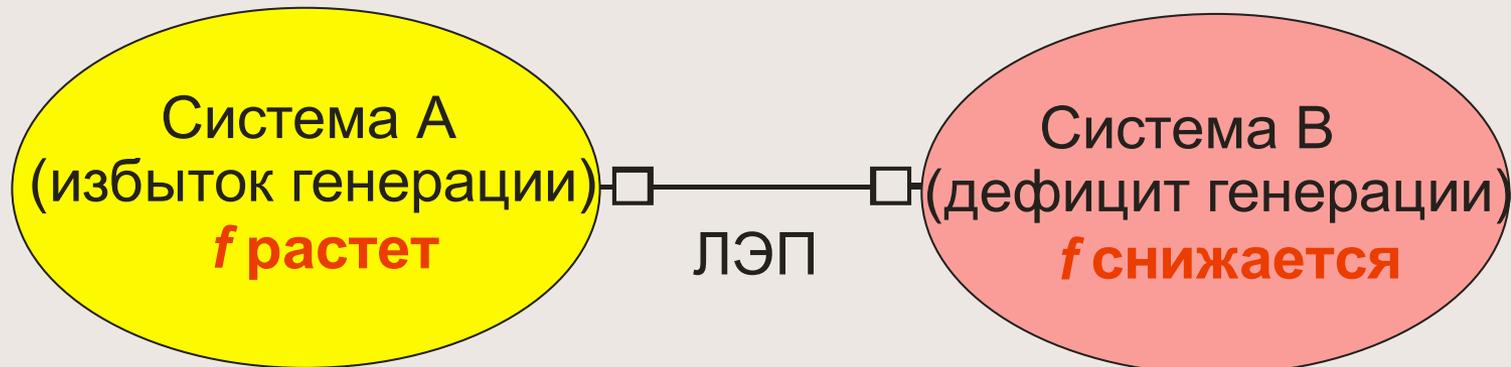
Для предотвращения такого явления прибегают к **полной разгрузке генераторов ГЭС**, а если это не помогает, то к отключению таких агрегатов, которые допускают частые пуски и остановки (т.е. пиковых агрегатов).



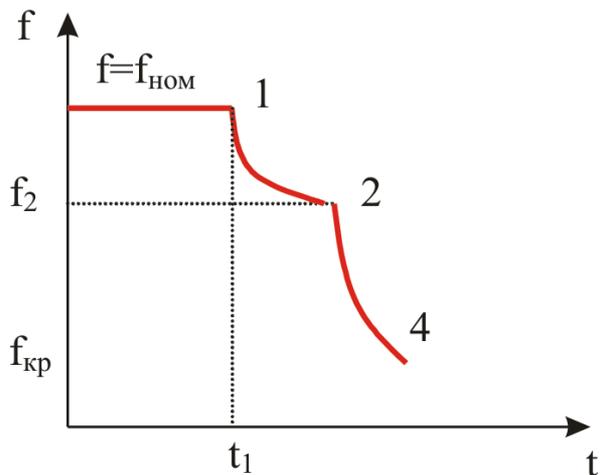
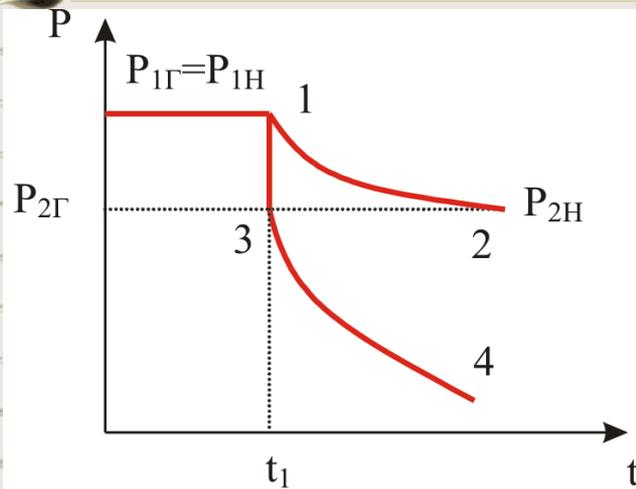
Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах

Наиболее опасно понижение частоты.

При возникновении **большого дефицита активной мощности** в отделившейся части энергосистемы, в результате первичного и вторичного регулирования, все **станции оказываются полностью загруженными**, и если резерва в энергосистеме нет, то частота **восстановиться не может**, тогда создаются **условия для возникновения лавины частоты**.



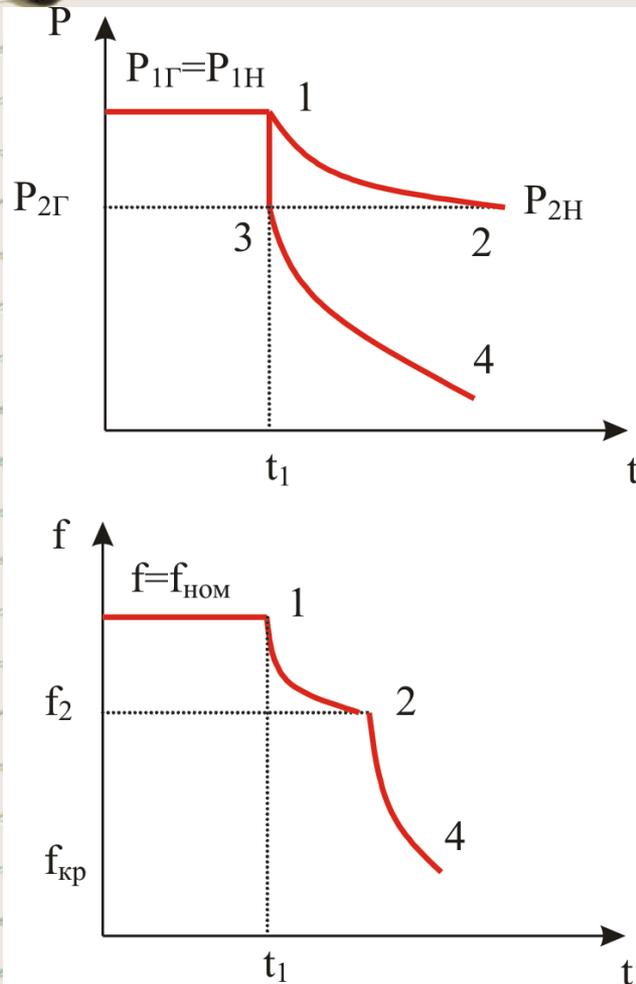
Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах



Лавина частоты

Это явление лавинообразного снижения частоты в энергосистеме, вызванного нарастающим дефицитом активной мощности.

Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах

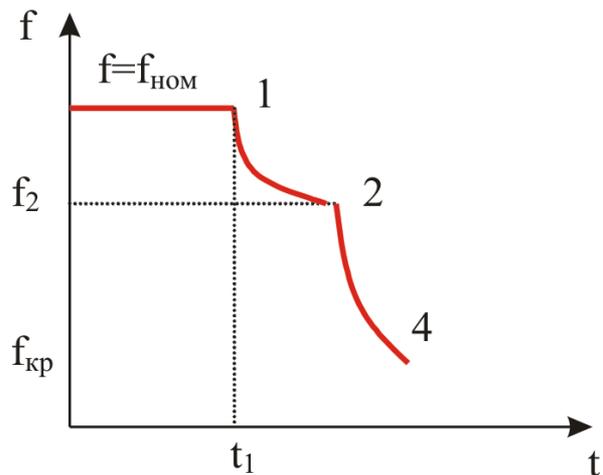
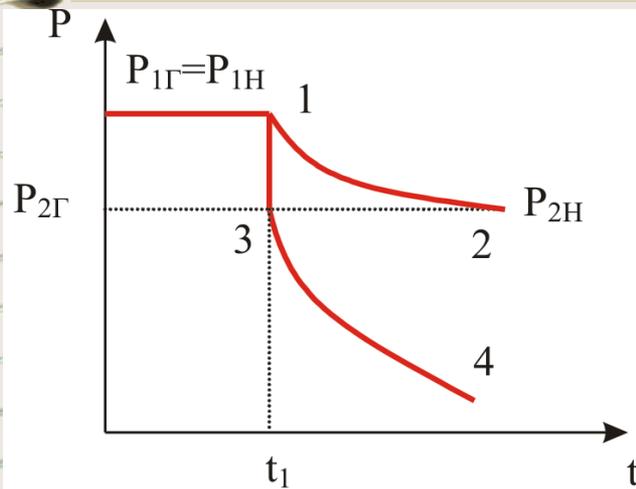


Лавина частоты

Пусть в начальный момент времени t_1 : $f = f_{ном}$ и $P_{1Г} = P_{1Н}$. Предположим, что резерв мощности в энергосистеме отсутствует. По одной из перечисленных выше причин в момент времени t_1 возникает дефицит активной мощности:

$$P_{1Г} - P_{2Г}.$$

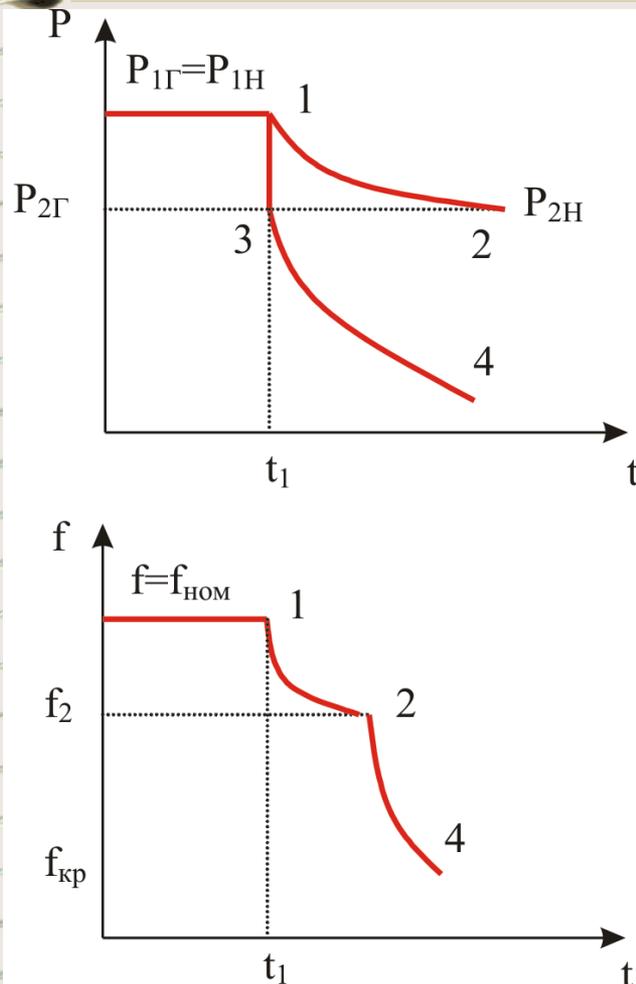
Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах



Лавина частоты

При этом становится невозможным вращение двигателей питательных насосов с прежней скоростью, поэтому уменьшается впуск пара в турбину, а значит, снижается частота (кривая 1-2). Нагрузка также реагирует на снижение частоты и по статической характеристике снижает потребляемую мощность до $P_{2Н}$ (точка 2).

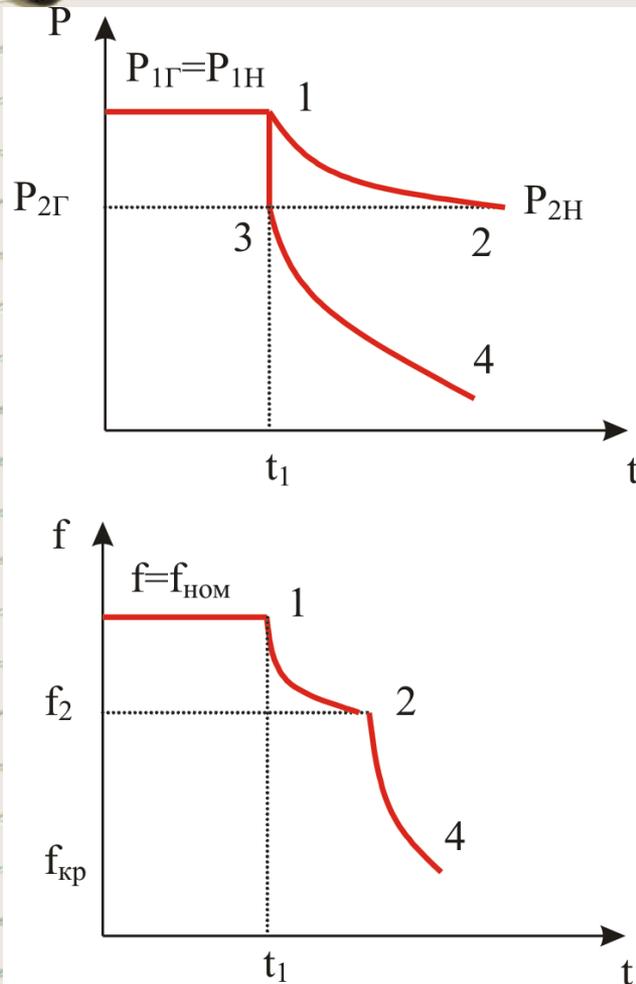
Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах



Лавина частоты

Если частота больше снижаться не будет, то при f_2 возможен новый баланс $P_{2Г} = P_{2Н}$, но для этого нужен **резерв мощности генераторов**, чтобы поднять или поддержать на этом уровне производительность питательных насосов.

Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах

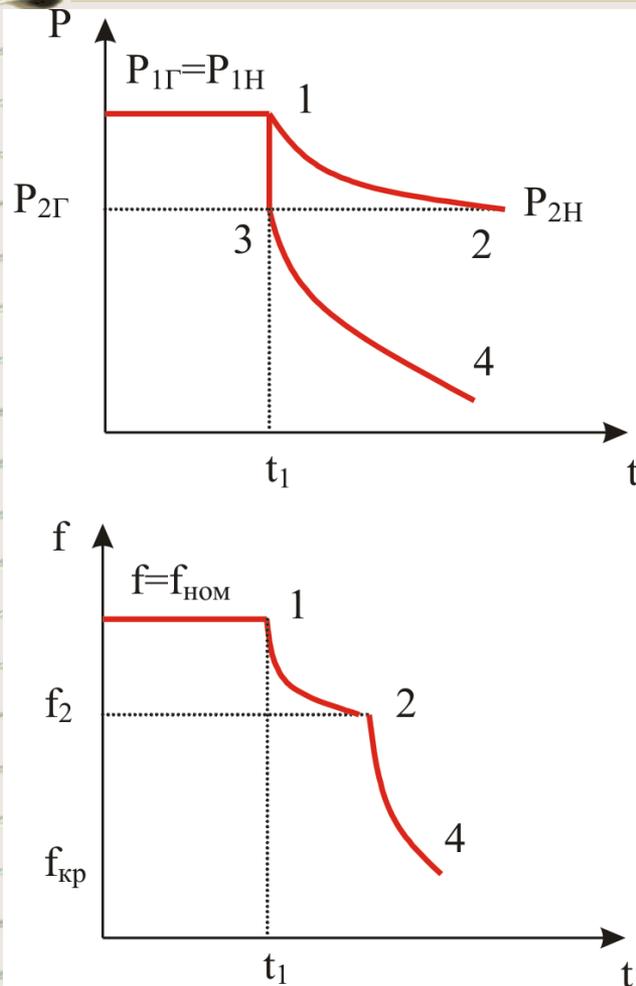


Лавина частоты

Если такого **резерва нет**, то снижение частоты приводит к тому, что скорость, а значит, и производительность питательных насосов падает, воды в котел поступает меньше, вырабатывается меньше пара, и P_r снижается (кривая 3-4).

Дефицит мощности растет, это **приводит к дальнейшему снижению частоты** (кривая 2-4).

Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах



Лавина частоты

При достижении критического значения частоты $f_{кр} = 46-45 \text{ Гц}$ мощность тепловой станции снижается до нуля и частота резко падает.

Оставшиеся в работе генераторы резко затормаживаются. **Такой процесс приводит к развалу системы.**

Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах

Лавина частоты

Для предотвращения лавины частоты во всех режимах должен быть определен **резерв мощности**, реализуемый при соответствующем росте нагрузок. Резерв может быть **горячим** (генераторы загружаются до мощности меньше номинальной и быстро набирают нагрузку при внезапном нарушении баланса активной мощности) и **холодным**, для ввода которого нужен длительный промежуток времени.

Кроме резерва мощности на электростанциях необходим **резерв по энергии**: на ТЭС должен быть обеспечен соответствующий запас топлива, а на ГЭС - запас воды.

Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах

Лавина частоты

Если резерв станций исчерпан, а частота в системе не достигла номинального значения, то должны быть приняты автоматические быстродействующие мероприятия, которые называются **АЧР** (автоматическая частотная разгрузка).

АЧР представляет собой предусмотренное заранее отключение очередями потребителей электрической энергии при понижении частоты в электрической системе, осуществляемое устройствами автоматики.

Действие АЧР должно начинаться при частоте **48,5Гц**.

Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах

Лавина частоты

Для исключения лишних отключений нагрузки систему АЧР разбивают на категории **АЧР I**, **АЧР II**, каждая из которых выполняется в виде нескольких очередей.

В АЧР I очереди отличаются **установками по частоте**, интервал между ними **0,1 Гц**, а единая установка по времени **0,1-0,15 с**.

В АЧР II очереди отличаются **установками по времени**: начальная **5-10 с.**, конечная **60-70 с.**; интервал между очередями ≈ 3 с.; единая **установка по частоте** та же, что у АЧР I или несколько больше.

Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах

Лавина частоты

Наряду с действием АЧР в энергосистемах предусмотрено **ЧАПВ** (частотное автоматическое включение).

После восстановления частоты в системе ЧАПВ очередями подключает отключенных потребителей.

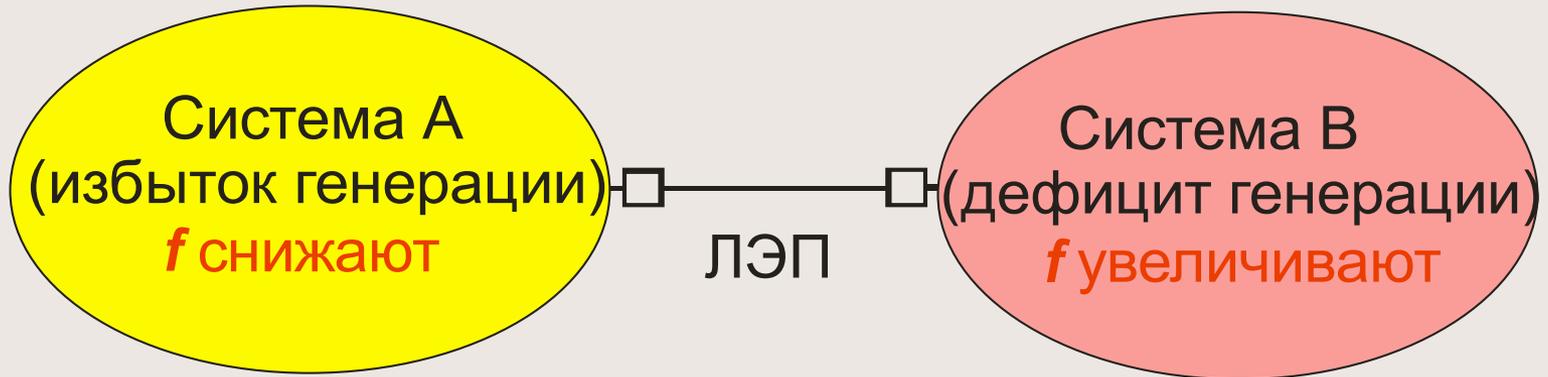
Его обычно настраивают на **49-50Гц** с началом работы **10-20 с.**, чтобы не вызвать повторного снижения частоты

Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах

Для включения систем на параллельную работу необходимо выровнять частоты.

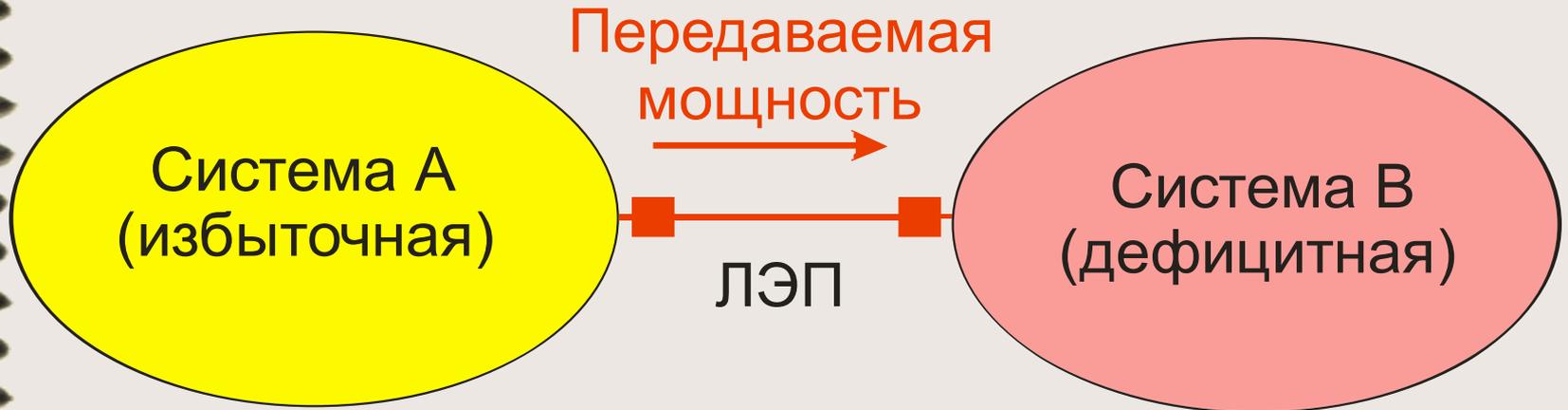
Для этого в системе А частоту уменьшают путем разгрузки генераторов, а в системе В частоту увеличивают за счет отключения потребителей.

При регулировании частоты контролируют перетоки мощности по межсистемным линиям.



Регулирование частоты в энергосистемах в послеаварийных режимах

Для включения систем на параллельную работу
необходимо выровнять частоты.



Источники дополнительных сведений

- **Идельчик В.И. Электрические системы и сети. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 588 с.**
- **Электрические системы. Т. 2. Электрические сети/ Под ред. В.А. Веникова. - М.: Высшая школа, 1971. - 440 с.**
- **Герасименко А. А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. – изд.2-е. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 715, [2] с. – (Высшее образование)**
- **Боровиков В.А. и др. Электрические сети энергетических систем. Изд. 3-е, переработанное. Л., «Энергия», 1977.**
- **Черепанова Г.А., Вычегжанин А.В. Установившиеся режимы электрических сетей в примерах и задачах. - Киров: изд. ВятГУ, 2009 - 114 с.**



Спасибо за внимание!
