

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ

**СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ
НАГРУЗКИ**

Действительный предел мощности

- Нагрузка электрической системы оказывает влияние на устойчивость генераторов электрических станций. Если мощность приёмной системы соизмерима с мощностью электропередачи, то напряжение на шинах нагрузки не остаётся постоянным при изменении режима работы электропередачи. В этом случае предел передаваемой мощности, называемый **действительным пределом**, существенно ниже предела при постоянном напряжении на шинах нагрузки. С другой стороны, колебания напряжения на шинах нагрузки могут вызвать неустойчивость работы синхронных и асинхронных двигателей, входящих в состав нагрузки, т.е. неустойчивость самой нагрузки.

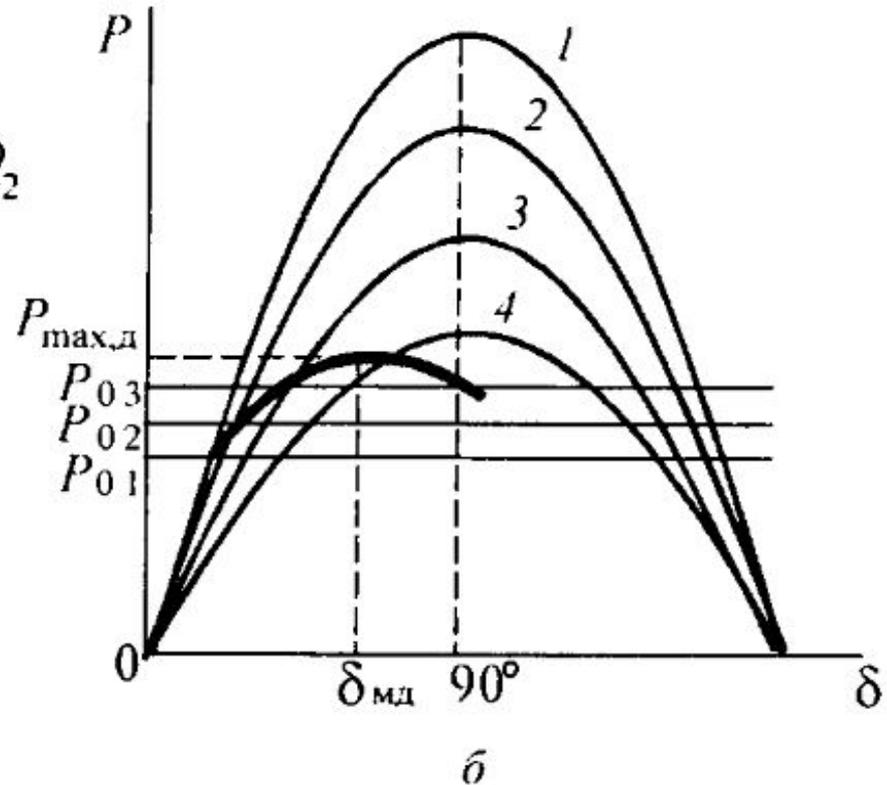
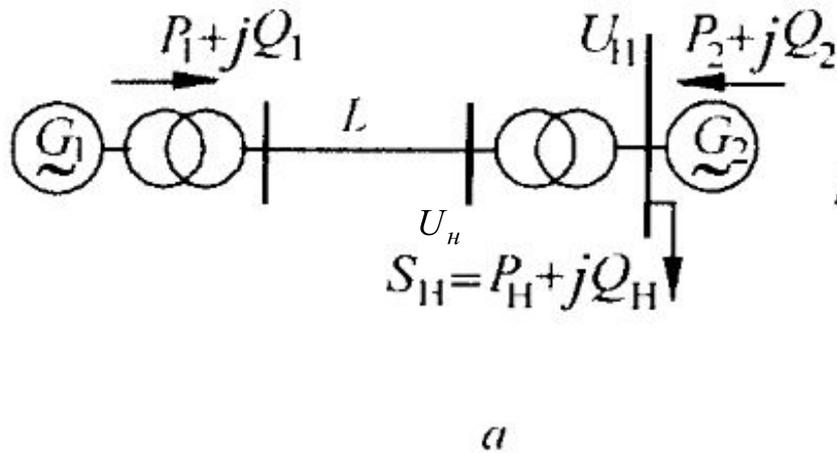
Действительный предел мощности

- Рассмотрим электропередачу, в которой приёмная система представлена нагрузкой и местной электростанцией (рис.13.1, а). Мощность этой электростанции соизмерима с мощностью нагрузки, поэтому при увеличении передаваемой активной мощности от электростанции G_1 напряжение на шинах нагрузки U_n будет уменьшаться. Построив семейство характеристик мощности для различных значений напряжения U_n , можно получить действительную характеристику мощности.

Действительный предел мощности

- Для этого необходимо при увеличении угла перемещать рабочую точку с одной характеристики на другую в соответствии с уменьшением напряжения. Максимум действительной P_H характеристики мощности, который называют действительным пределом мощности, достигаются при угле меньше 90° (рис.13.1, б). Величина максимума значительно ниже предела мощности при условии $U_H = U_{0H}$. Следовательно, снижение U_H ухудшает статическую устойчивость рассматриваемой системы.

Действительный предел мощности



а) – принципиальная схема; б) – характеристики мощности при $U_H = 1,0; 0,9; 0,8; 0,7$

Действительный предел мощности

- Влияние нагрузки на напряжение U_H определяется регулирующим эффектом нагрузки, т.е. степенью снижения активной и реактивной мощностей нагрузки с уменьшением напряжения на её шинах. Увеличение активной мощности, передаваемой от станции G_1 к нагрузке, сопровождается снижением напряжения на её шинах; подразумевается, что напряжение на шинах станции G_1 поддерживается постоянным. Но с уменьшением напряжения уменьшается и мощность, потребляемая нагрузкой и $\cdot P_H$ Q_H

Действительный предел мощности

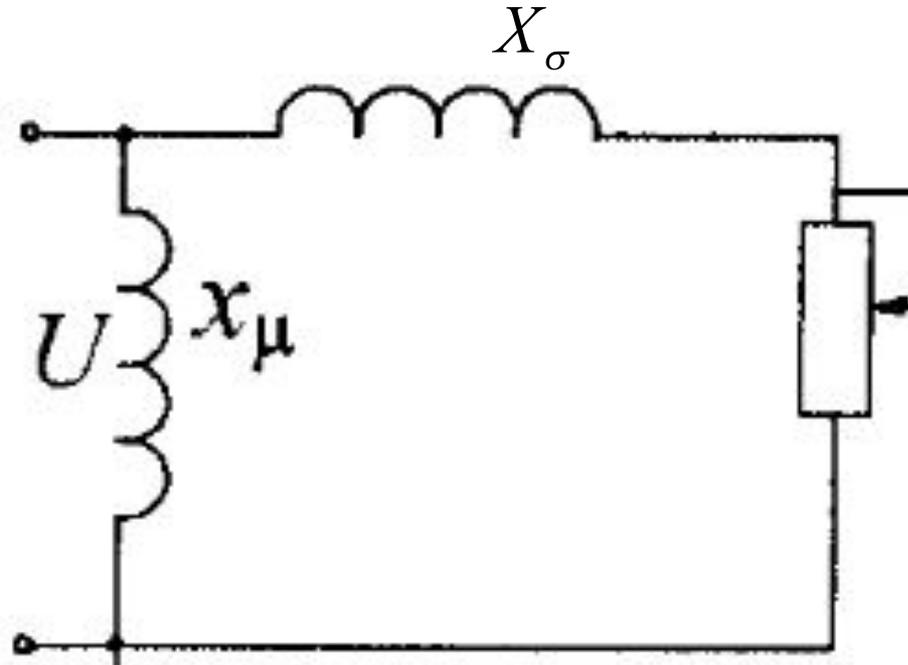
- Уменьшение мощности, передаваемой по линии, приводит к уменьшению падения напряжения в элементах электропередачи, что в свою очередь уменьшает степень снижения напряжения U_n при увеличении передаваемой мощности. Регулирующий эффект нагрузки оценивается производными dP/dU и dQ/dU в рабочей точке статических характеристик. Регулирующий эффект оказывает значительное влияние на действительный предел мощности, и с ним необходимо считаться в практических расчётах устойчивости.

Статическая устойчивость двигателей нагрузки

Уровень устойчивости синхронных и асинхронных двигателей в большой степени определяется напряжением на её зажимах.

Асинхронные двигатели представляют основную часть нагрузки электрических систем; при значительном снижении напряжения они останавливаются (опрокидываются). Схема замещения асинхронного двигателя приведена на рис. 13.2; в ней не учитываются потери активной мощности в магнитопроводе и активные потери в обмотке. Активная мощность, потребляемая двигателем из сети, определяется как произведение вращающего момента на угловую скорость вращения магнитного потока двигателя.

Статическая устойчивость двигателей нагрузки



Последняя при неизменной частоте питающей сети остаётся постоянной при любом скольжении двигателя, поэтому вращающий момент двигателя пропорционален его активной мощности. В относительных единицах вращающий момент двигателя принимается равным потребляемой им активной мощности.

Статическая устойчивость двигателей нагрузки

- Зависимость активной мощности от скольжения определяется выражением:

$$P = \frac{I^2 R_2}{S} = \frac{U^2}{X_\sigma^2 + \left(\frac{R^2}{S}\right)^2} \frac{R_2}{S} = \frac{U^2 R_2}{X_\sigma^2 S^2 + R_2^2} S \quad . \quad (13.1)$$

- Эта зависимость представляет собой характеристику мощности или вращающего момента, показанную на рис. 13.3. Максимум этой характеристики определяется по производной выражения (13.1), взятой по скольжению

$$\frac{dP}{dS} = U^2 R_2 \frac{R_2^2 - X_\sigma^2 S}{(R_2^2 + X_\sigma^2 S)^2} = 0 \quad .$$

Статическая устойчивость двигателей нагрузки

- Из последнего выражения следует, что максимум мощности двигателя достигается тогда, когда выполняется условие $R_2^2 - X_\sigma^2 S = 0$, откуда критическое скольжение

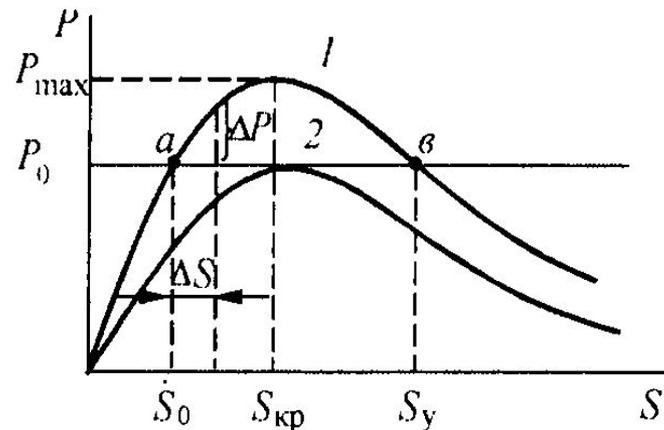
$$S_{кр} = \frac{R_2}{X_\sigma},$$

а максимум мощности

$$P_{\max} = \frac{U^2}{X_\sigma} \quad . (10.2)$$

Статическая устойчивость двигателей нагрузки

- Характеристика тормозного момента не зависит от скольжения и параллельна оси абсцисс (рис.13.3). Установившийся режим работы двигателя возможен в двух точках пересечения характеристики момента двигателя и тормозного момента: точки *a* и *b*



кривая 1 при $U = U_H$ и кривая 2 при $U = 0,7U_H$

Статическая устойчивость двигателей нагрузки

- В точке a с увеличением скольжения двигателя на Δs вращающийся момент возрастает на ΔM на валу двигателя появляется ускоряющий избыточный момент, под влиянием которого его скорость начинает возрастать, а скольжение уменьшаться. В результате этого устанавливается режим работы двигателя в точке a .

Статическая устойчивость двигателей нагрузки

Если двигатель работает со скольжением (точка b), то с увеличением скольжения на валу двигателя возникает тормозной избыточный момент, вызывающий дальнейшее увеличение скольжения и опрокидывание двигателя.

Критерием статической устойчивости двигателя является положительный знак производной

$$\frac{dP}{dS} > 0 \quad .$$

Статическая устойчивость двигателей нагрузки

- При номинальном напряжении на выводах двигателя его максимальная мощность примерно вдвое превышает номинальную мощность. С уменьшением напряжения значение электромагнитной мощности уменьшается по квадратичной зависимости. Максимальная мощность приближается к номинальной при снижении напряжения примерно на 30%. В установившихся режимах такое снижение напряжения недопустимо, поэтому если двигатель включается в сеть к точкам, напряжение в которых поддерживается уровне, определённом ГОСТ 13109–97, то статическая устойчивость гарантируется.

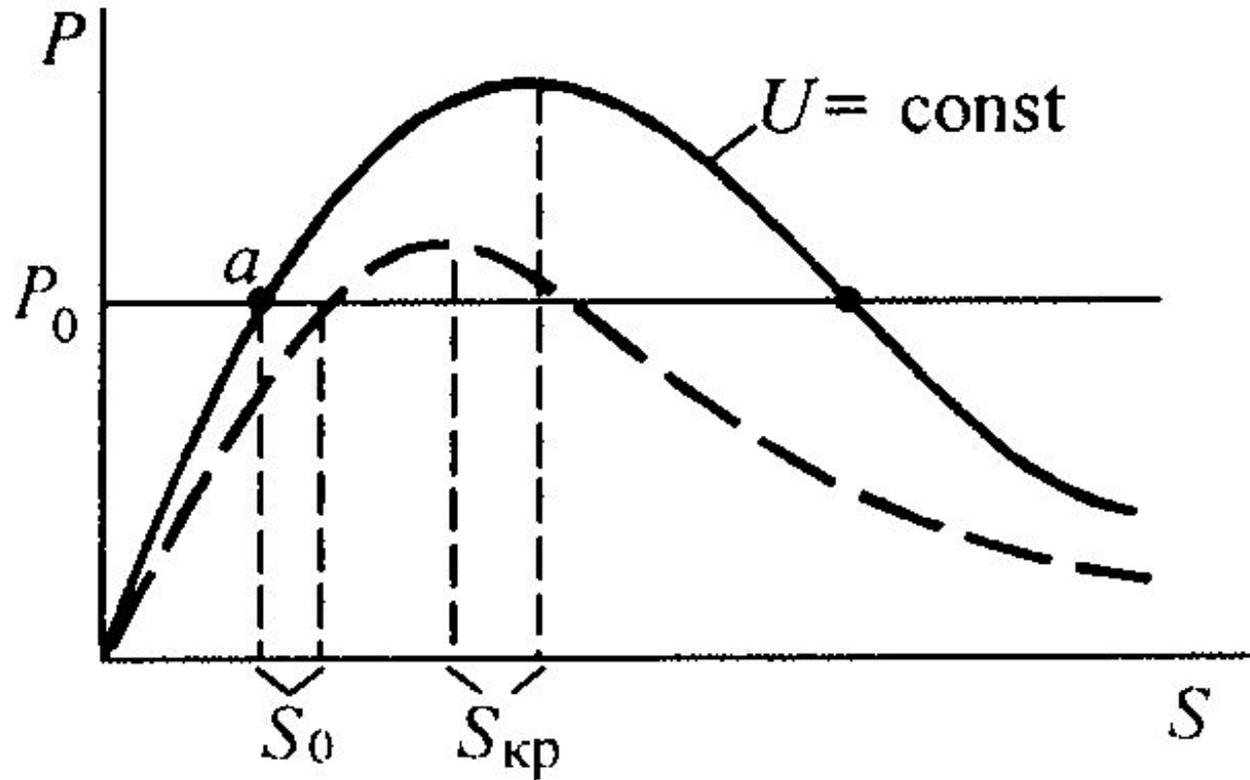
Статическая устойчивость двигателей нагрузки

Если двигатель подключается к этим точкам сети через некоторое внешнее сопротивление, например, кабель, то значение опрокидывающего момента может быть найдено из выражения (при неучёте сопротивления X_{μ} в схеме замещения двигателя) (13.2)

$$P_{\max} = \frac{U^2}{2(X_{\sigma} + X_{вн})} .$$

Изменение характеристики мощности при учёте внешнего сопротивления показано на рис.13.4.

Статическая устойчивость двигателей нагрузки



Зависимости момента от скольжения для асинхронного двигателя
(штриховая кривая построена с учётом внешнего сопротивления)

Статическая устойчивость двигателей нагрузки

- Запас устойчивости двигателя с учётом внешнего сопротивления значительно снижается. При больших внешних сопротивлениях возможны такие режимы, при которых небольшое понижение напряжения на шинах (в допустимых пределах) может привести к нарушению статической устойчивости асинхронного двигателя.

Статическая устойчивость двигателей нагрузки

- Статическая устойчивость синхронного двигателя оценивается также, как и синхронного генератора, с помощью критерия $dP/d\delta > 0$. При отсутствии АРВ максимальная мощность и критическое напряжение находятся с помощью выражений:

$$P = \frac{E_q U}{X_d + X_{вн}}, \quad U_{кр} = \frac{P_0 (X_d + X_{вн})}{E_q},$$

где $X_{вн}$ – сопротивление проводника, с помощью которого двигатель подключается к шинам с напряжением U ; P_0 – мощность двигателя, потребляемая в режиме, в котором оценивается устойчивость.

Статическая устойчивость двигателей нагрузки

- Если двигатель работает с АРВ пропорционального типа, то он имеет такую же схему замещения, как и синхронный генератор: переходная ЭДС $E' = const$ и переходное внутреннее сопротивление X'_d . В этом случае критическое напряжение определяется с помощью выражения:

$$U'_{кр} = \frac{P_0(X'_d + X_{вн})}{E'}$$

- Это напряжение всегда меньше $U_{кр}$, так как $X'_d < X_d$.

Вторичные критерии устойчивости нагрузки

- Нагрузка электрических систем состоит из различного рода потребителей, но двигатели составляют в ней наибольшую долю. Однако применение критерия часто затруднительно из-за невозможности точного определения параметров эквивалентного двигателя, которым бы можно заменить все двигатели рассматриваемой нагрузки. Поэтому часто устойчивость нагрузки рассчитывают с использованием её статических характеристик.

Вторичные критерии устойчивости нагрузки

- Одним из таких критериев является знак производной ЭДС генератора, питающего нагрузку системы по напряжению $dE/dU > 0$.
- Эта производная определяется углом наклона касательной к кривой зависимости $E = f(U)$, которая строится с помощью статических характеристик нагрузки. Любую схему питания нагрузки можно заменить эквивалентной, приведенной на рис.13.5, а.

Вторичные критерии устойчивости нагрузки

- Пусть в исходном режиме эквивалентная ЭДС равна E_0 напряжение на нагрузке U_0 . Снижая напряжение на шинах нагрузки, можно по статическим характеристикам определять значения активной и реактивной мощностей, соответствующие этому напряжению. Затем, выполнив расчёт режима для схемы (рис.13.5, а), находят новое значение E . Проведя ряд расчётов для нескольких значений напряжений, можно построить зависимость $E = f(U)$ (рис.13.5, б).

Вторичные критерии устойчивости нагрузки

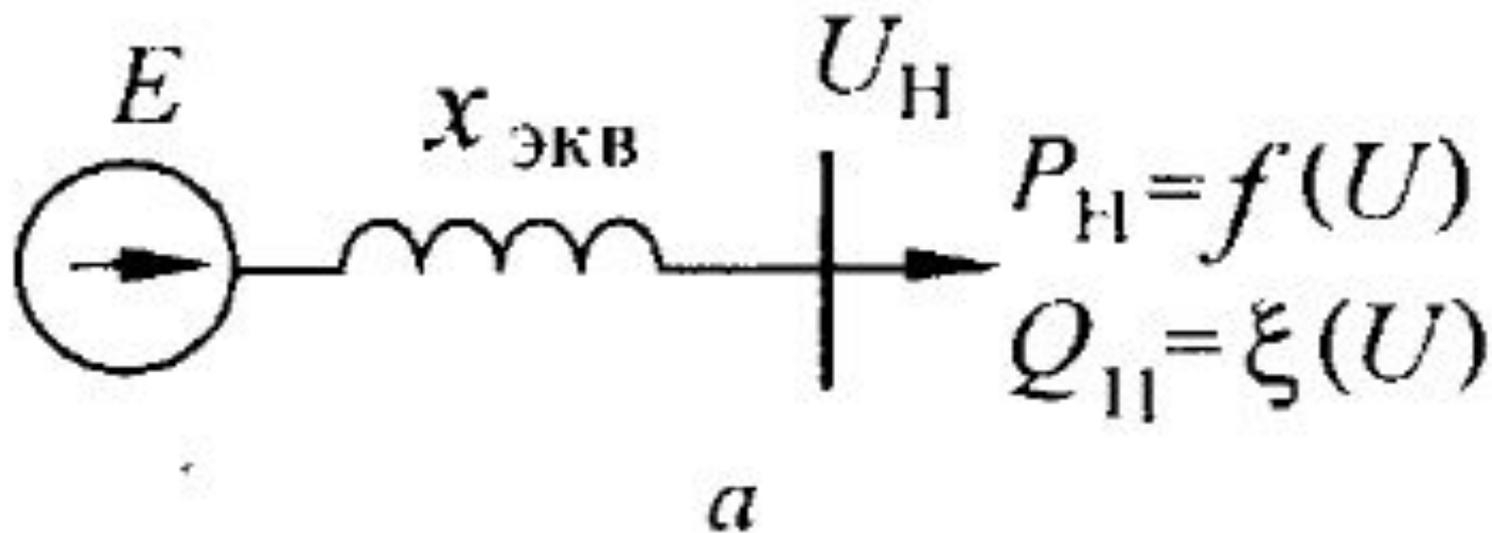
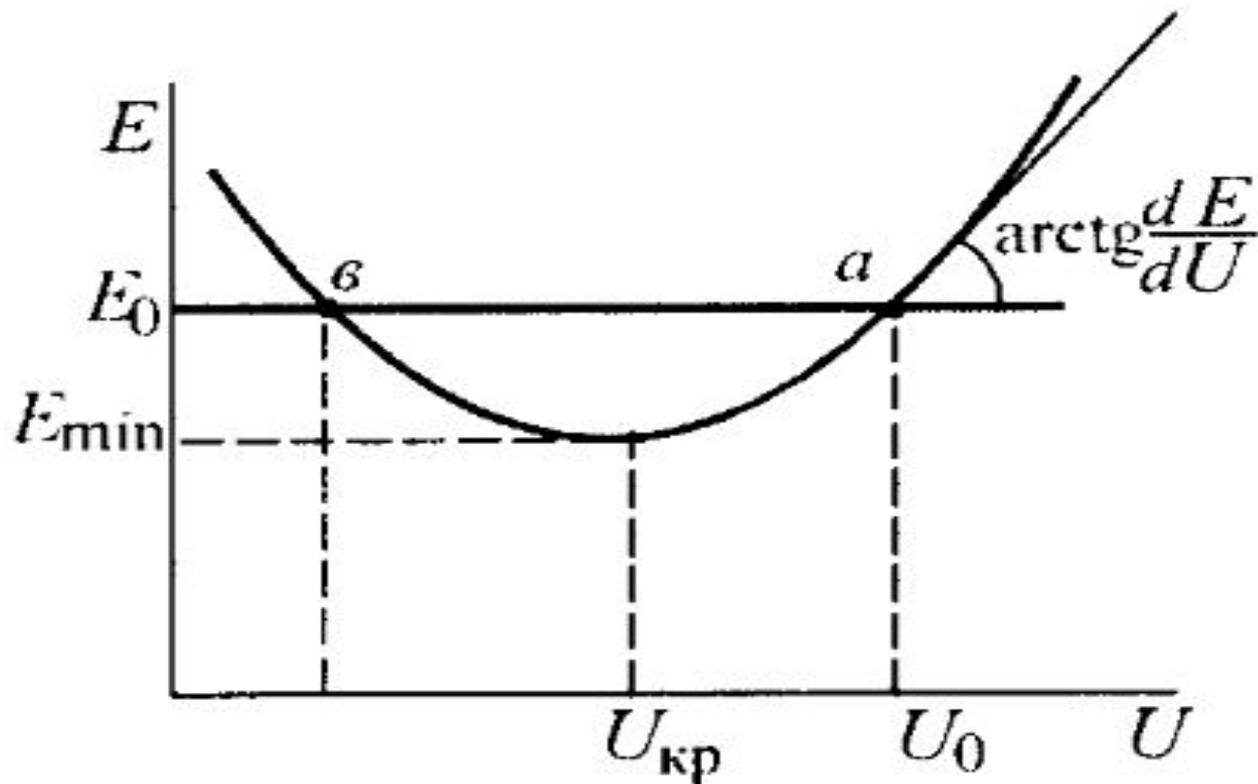


схема подключения нагрузки

Вторичные критерии устойчивости нагрузки



б

определение критерия $\frac{dE}{dU}$

Вторичные критерии устойчивости нагрузки

- Для ЭДС возможны два режима работы генератора на характеристике $E = f(U)$ – в точках a и b . В точке a производная $dE/dU > 0$, в точке b – $dE/dU < 0$. Каждой точке характеристики $E = f(U)$ соответствует своё скольжение, возрастающее с уменьшением напряжения U . Аналогично, как и в характеристике мощности асинхронного двигателя, точка a зависимости $E = f(U)$, соответствующая меньшему скольжению, является точкой устойчивого режима нагрузки, точка b – неустойчивого. Предельный режим определяется значением ЭДС E_{min} в точке, где

$$dE/dU = 0$$

Вторичные критерии устойчивости нагрузки

- Запас устойчивости нагрузки по напряжению при этом вычисляется по формуле

$$K_3 = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} 100\% \quad .$$

Вторичные критерии устойчивости нагрузки

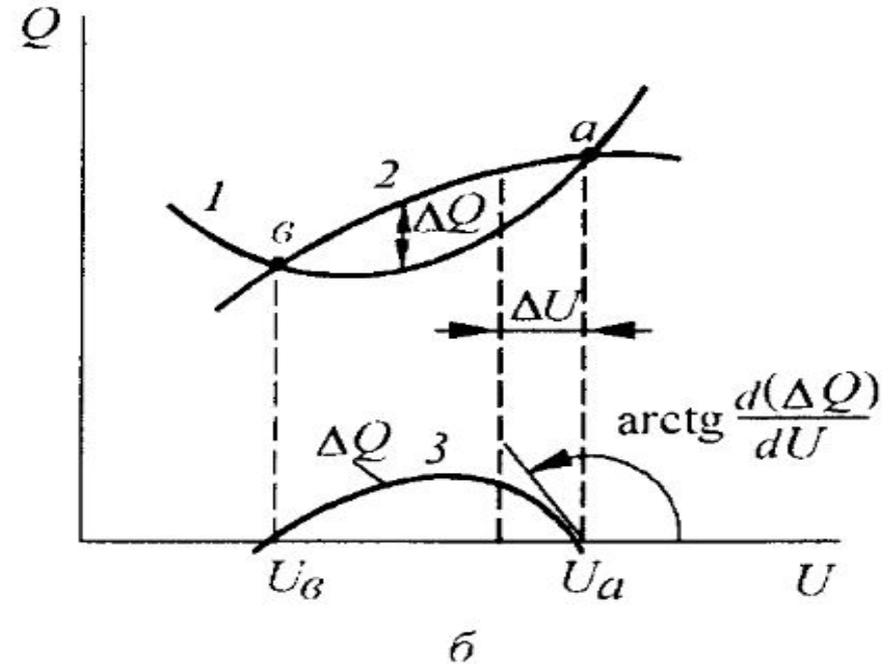
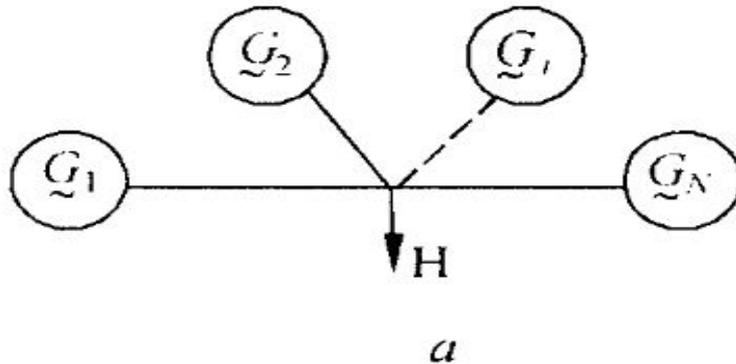
- При расчётах устойчивости нагрузки в системе, состоящей из группы электростанций, объединённых общей узловой точкой (рис.13.6, а), к которой подключена нагрузка, удобно использовать критерий

$$\frac{d\Delta Q}{dU} < 0 \quad , \quad (13.3)$$

где

$$\Delta Q = \sum Q_G - \sum Q_H \quad .$$

Вторичные критерии устойчивости нагрузки



К определению критерия статической устойчивости нагрузки

а – схема подключения нагрузки

Вторичные критерии устойчивости нагрузки

- На рис.13.6, б показаны характеристики реактивной мощности эквивалентного генератора и нагрузки. Характеристика реактивной мощности генератора может быть найдена при неизменной ЭДС генератора и имеющемся напряжении при условии, что активная мощность генератора изменяется в соответствии с активной мощностью нагрузки ($P_G = P_H$). Мощность нагрузки при этом вычисляется по статической характеристике $P_H = f(U)$.

Вторичные критерии устойчивости нагрузки

- Характеристики реактивной мощности имеют две точки пересечения, определяющие возможные режимы работы: точку a и точку b . Эти точки, очевидно, совпадают с одноимёнными точками на характеристике мощности двигателя (рис.13.3). Точка a , соответствующая большему напряжению, а, следовательно, меньшему скольжению, является точкой устойчивой работы, точка b – неустойчивой. Если исходный режим работы устойчив и определяется точкой a , то при подключении к нагрузке индуктивности, потребляющей реактивную мощность, её напряжение уменьшится на величину ΔU . При этом положительному значению ΔU соответствует отрицательное значение ΔQ , что подтверждает критерий (13.3).

$$\Delta U$$

Нормативные и методические указания по анализу статической устойчивости энергосистем

- Анализ устойчивости проводится в соответствии с руководящими указаниями, периодически выпускаемыми Министерством энергетики РФ. В этих указаниях вводится понятие перетоков в сечениях, т. е. таких отключаемых элементов, которые соединяют две какие-либо части системы. Разрыв таких связей делит систему на две изолированные части. Перетоки в сечениях при установившихся режимах подразделяют на нормальные, утяжелённые и вынужденные.

- Утяжелённые перетоки допускаются при отсутствии необходимых резервов мощности, недостаточной маневренности оборудования тепловых и атомных электростанций или неблагоприятном наложении плановых и аварийных ремонтов основного оборудования электростанций и сетей.
- Вынужденные перетоки допускаются при предотвращении ограничений потребителей, а также невозможности уменьшения перетока из-за недостаточной маневренности АЭС.

- Запас статической устойчивости режима качественно определяется близостью к режиму, соответствующему границе области, в которой появляется апериодическое или колебательное нарушение устойчивости. Запас количественно характеризуется коэффициентами запаса по перетокам активной мощности в сечениях системы и по напряжению в узлах нагрузки . K_U

Переток в сечении	Минимальные коэффициенты запаса	
	по активной мощности	по напряжению
Нормальный	0,20	0,15
Утяжелённый	0,15	0,15
Вынужденный	0,08	0,10

Коэффициент запаса по активной мощности определяется из выражения

$$K_P = \frac{P_{\max} - P - \Delta P}{P_0},$$

где ΔP соответствует увеличению передаваемой мощности за счёт нерегулярных колебаний активной мощности в сечении.

Величина нерегулярных колебаний устанавливается по данным измерений и может быть определена по формуле

$$\Delta P = K \sqrt{\frac{P_{H1} P_{H2}}{P_{H1} + P_{H2}}},$$

где P_{H1} , P_{H2} – суммарные мощности нагрузки с каждой из сторон рассматриваемого сечения, МВт; коэффициент K принимается равным 1,5 при ручном регулировании мощности и 0,75 при автоматическом регулировании частоты и мощности.

- Коэффициент запаса по напряжению в узле нагрузки определяется по формуле

$$K_U = \frac{U - U_{кр}}{U} ,$$

- где U – напряжение узла нагрузки в исходном режиме; $U_{кр}$ – критическое напряжение узла, значение которого принимается не менее $0,7 U_{ном}$ и $0,75 U_{норм}$ ($U_{норм}$ – напряжение в узле в нормальном режиме).
- Запас устойчивости определяется последовательными утяжелениями режима энергосистемы. Утяжеление режима и расчёт предельного перетока в сечении производится в предположении отключения любых устройств, препятствующих достижению предельного перетока в данном сечении. Предельные перетоки определяются с учётом перегрузок всего оборудования, допустимых в течение 20 минут.

Утяжеление исходного режима энергосистемы

- Рекомендуются следующие способы утяжеления режима или их комбинации:
- 1) перераспределение активных мощностей между электрическими станциями;
- 2) увеличение нагрузки на наиболее загруженных узловых подстанциях;
- 3) снижения напряжения в узлах системы.
- Первый способ применяется для систем, содержащих протяжённые или сильно загруженные линии электропередачи. Этот способ позволяет определить пропускную способность рассматриваемых линий. Для оценки апериодической устойчивости используется критерий $dP/d\delta > 0$.

Утяжеление исходного режима энергосистемы

- Для каждой системы выбираются передающая и балансирующая станции с таким расчётом, чтобы увеличивающийся поток активной мощности проходил по линиям электропередачи исследуемого направления или через определённое сечение. При этом надо учитывать, насколько данная траектория утяжеления режима вероятна в условиях рассматриваемой энергосистемы.

Утяжеление исходного режима энергосистемы

- При утяжелении режимов концентрированных систем (в которых электрические станции и узлы мощной нагрузки расположены недалеко друг от друга) рассматриваются увеличение нагрузки основных узлов приёмной части системы или снижение напряжения в узловых точках. Эти способы следует применять при исследовании статической устойчивости узлов нагрузки. Предельный режим в обоих случаях определяется по знаку свободного члена характеристического уравнения или по практическим критериям:

$$\frac{d\Delta Q}{dU} < 0 \quad \text{или} \quad \frac{dE}{dU} > 0$$

Утяжеление исходного режима энергосистемы

- В проектных расчётах последовательно утяжеляемых режимов допускается перегрузка части оборудования, но если при подходе к пределу устойчивости перегрузки оказываются во много раз больше допустимых, то это означает, что выбранный способ утяжеления неприемлем. Вопрос о необходимости учёта ограничений следует решать в зависимости от того, является ли расчёт проектным, исследовательским или эксплуатационным.

Утяжеление исходного режима энергосистемы

- В проектных расчётах можно не учитывать ряд ограничений, поскольку часто неизвестны такие факторы, как размещение резервов в системе, точные параметры нагрузок и т.п. Для решения эксплуатационных задач следует провести серию расчётов режимов с проверкой устойчивости при длительно допустимых эксплуатационных ограничениях. Под эксплуатационными ограничениями понимаются ограничения, обусловленные тепловым режимом машин и элементов сети, уровнем напряжения в заданных точках системы, желаемыми перетоками в некоторых линиях электропередачи, располагаемой мощностью синхронных машин и т.д.

Утяжеление исходного режима энергосистемы

- Если достигается предел устойчивости системы, то расчёт заканчивается. Если предел устойчивости не достигнут, а нарушается какое-либо из ограничений, то может быть проведена вариация расчётов режимов в пределах заданных эксплуатационных ограничений. Если эта возможность исчерпана, то эксплуатационные ограничения могут быть сняты и заменены кратковременно допустимыми техническими ограничениями.

Утяжеление исходного режима энергосистемы

- Технические ограничения – это кратковременно возможные перегрузки машин и трансформаторов, кратковременно допустимые изменения значения напряжений и т.д.
- Таким образом, получается достаточно полная и реальная оценка запаса устойчивости. Запас устойчивости определяется для заданных режимных параметров: допустимого изменения нагрузки, перетока в линиях или напряжений в узлах системы.