

КУРС ЛЕКЦИЙ
по учебной дисциплине
**«Переходные процессы в
электроэнергетических
системах»**

Раздел 4 **Электромеханические
переходные процессы в ЭЭС**

ЛЕКЦИЯ 9(Вводная) **Общие вопросы
устойчивости ЭЭС**

Учебные вопросы лекции:

1. **Характеристика мощности**
2. **Понятие о статической устойчивости**
3. **Понятие о динамической устойчивости**

Аварии, связанные с нарушением устойчивости параллельной работы ЭЭС влекут за собой расстройство, а иногда и прекращение электроснабжения больших районов и городов

Ликвидация таких аварий и восстановление нормальных условий работы ЭЭС представляют большие трудности, требуют много времени и внимания диспетчера и остального дежурного персонала.

При сравнительно небольшом числе аварий, вызывающих нарушение устойчивости, наибольший аварийный недоотпуск энергии падает именно на этот вид аварий.

Тяжелые последствия таких аварий заставляют уделять значительное внимание вопросам увеличения устойчивости как при проектировании электрических станций и сетей, так и их эксплуатации.

Проблема устойчивости наложила глубокий отпечаток на схемы коммутации, режимы работы и параметры оборудования электрических систем. Здесь можно указать на применение быстродействующих выключателей, релейной защиты [использование систем автоматического регулирования возбуждения генераторов, систем противоаварийной автоматики], а также проведение других мероприятий, которые способствовали резкому уменьшению аварийности в электрических системах.

Исключительно велико значение проблемы устойчивости при передаче энергии на большие расстояния. Можно утверждать, что устойчивость систем является одним из основных факторов, ограничивающих пропускную способность электропередач переменного тока большой протяженности.

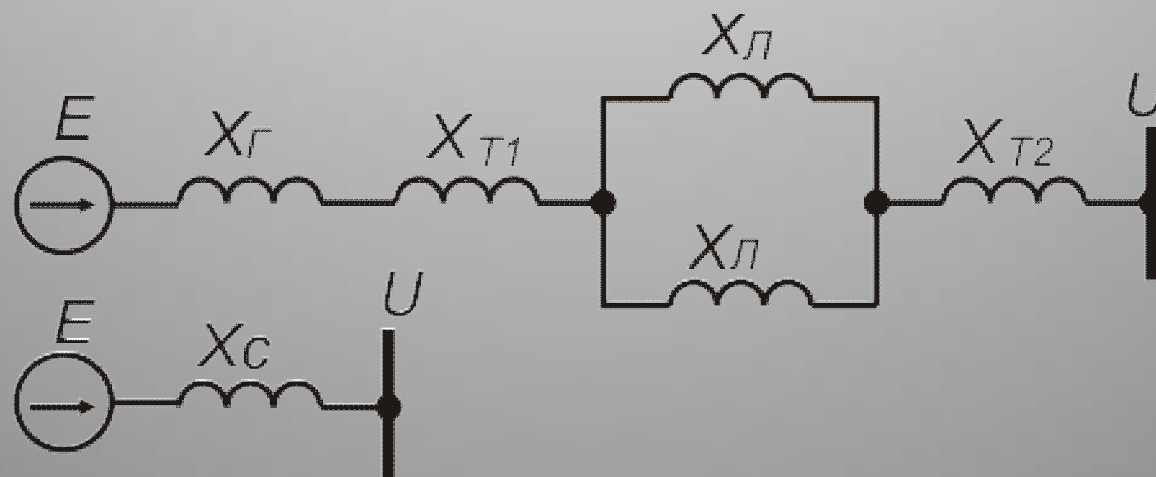
В проблеме устойчивости следует различать статическую и динамическую устойчивость, к рассмотрению которых мы и перейдем.

Вопрос 1. Характеристика мощности

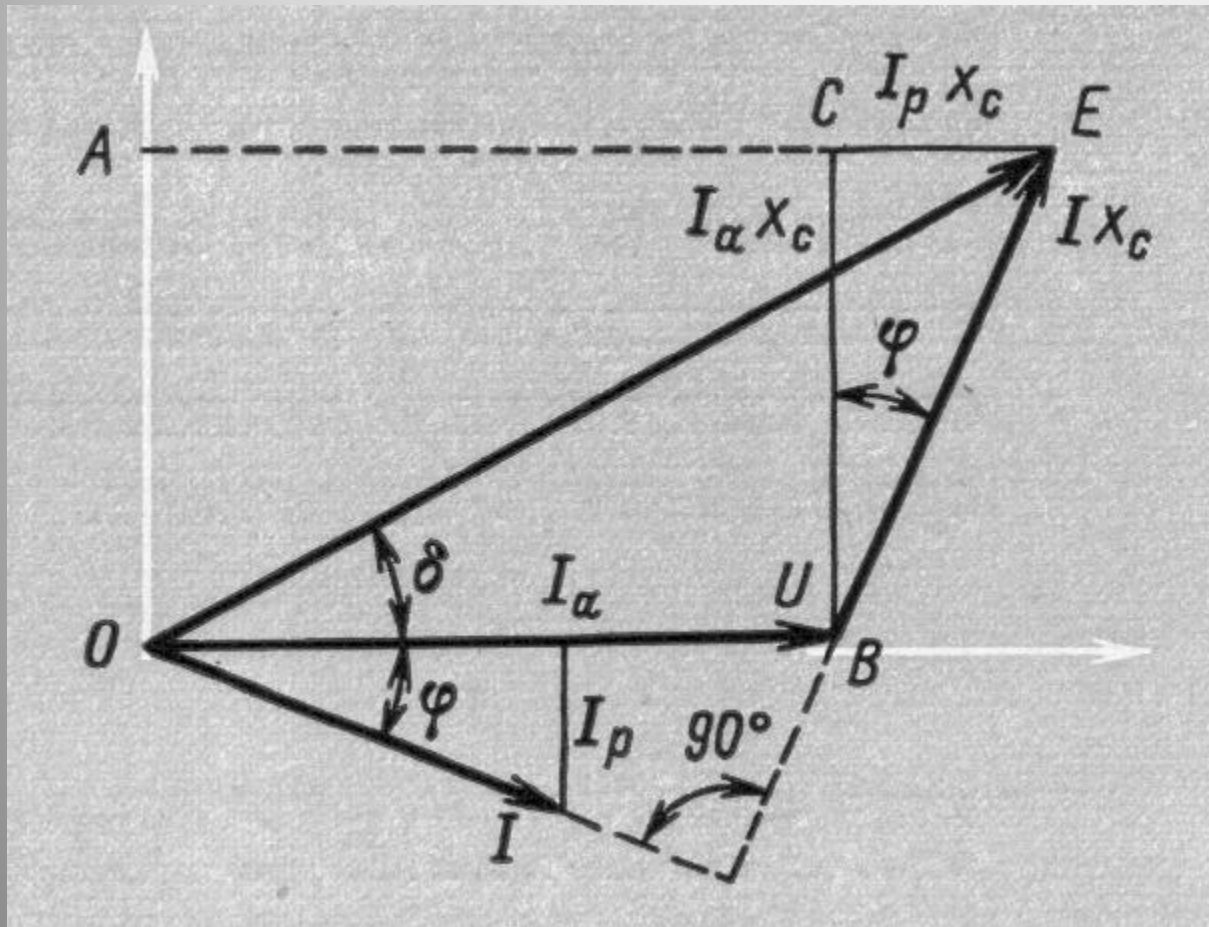


Принципиальная схема электропередачи и схема её замещения

$$x_c = x_{\Gamma} + x_{T1} + 0,5x_{\text{Л}} + x_{m2}$$



Векторная диаграмма нормального режима работы электропередачи



$$OA = E \sin \delta$$

$$BC = I_a x_c$$

$$I_a x_c = E \sin \delta$$

I_a — **активный ток;**

δ — **угол сдвига вектора э. д. с. относительно вектора напряжения приемной системы U .**

Умножая обе части равенства на $\frac{U}{x_c}$
получим:

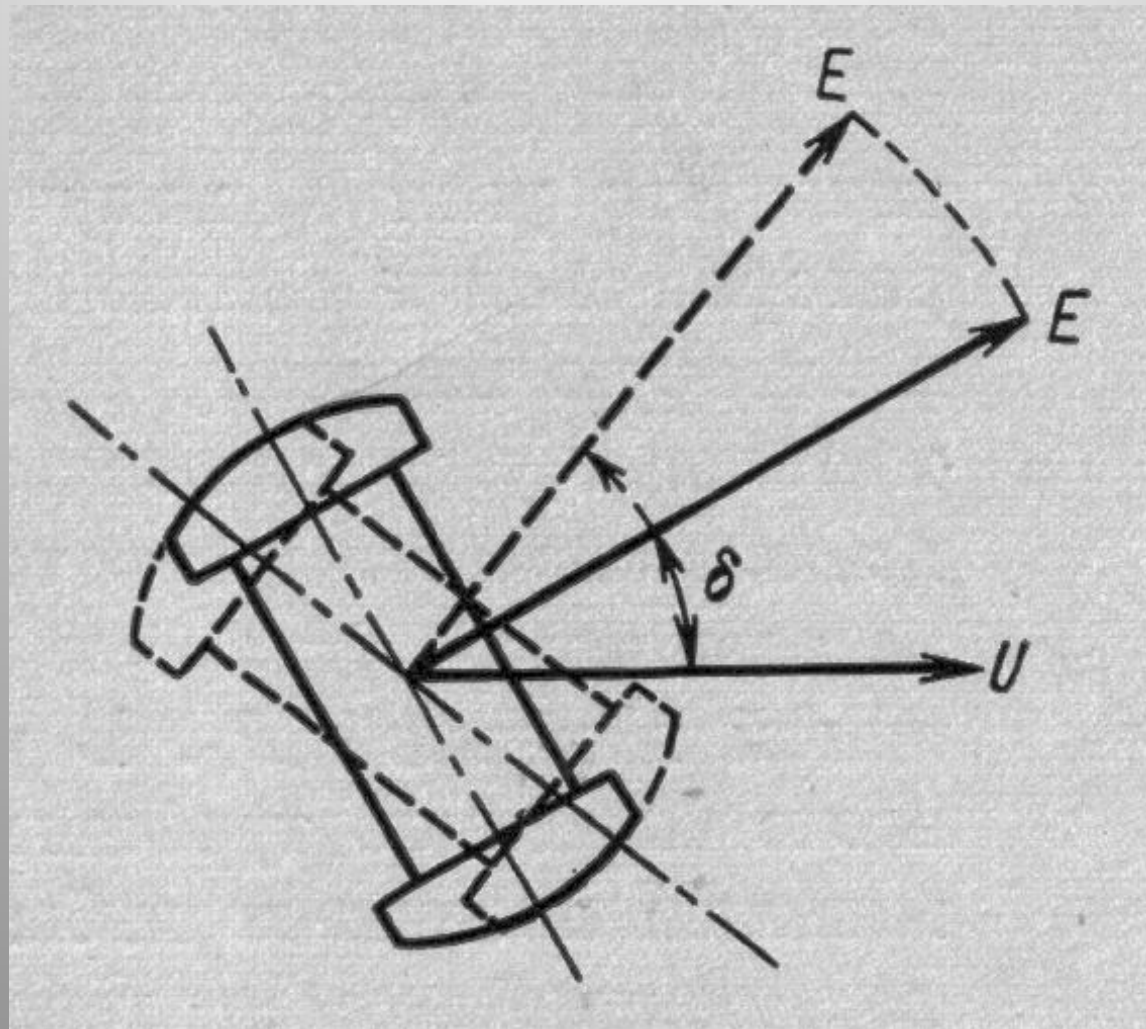
$$UI_a = \frac{EU}{x_c} \sin \delta \quad \text{или} \quad P = \frac{EU}{x_c} \sin \delta \quad (1)$$

где P — активная мощность, выдаваемая генератором.

При постоянстве э. д. с. и напряжения U изменение передаваемой мощности P может быть обусловлено лишь соответствующим изменением угла.

Изменение мощности, отдаваемой генератором, на станции осуществляется воздействием на регулирующие органы турбины. В исходном режиме мощность турбины уравнивается мощностью генератора, который вращается с неизменной частотой вращения. По мере открытия регулирующих клапанов (или направляющего аппарата у гидравлических турбин) мощность турбины возрастает и равновесие вращающего и тормозящего моментов турбины и генератора нарушается, что вызывает ускорение его вращения.

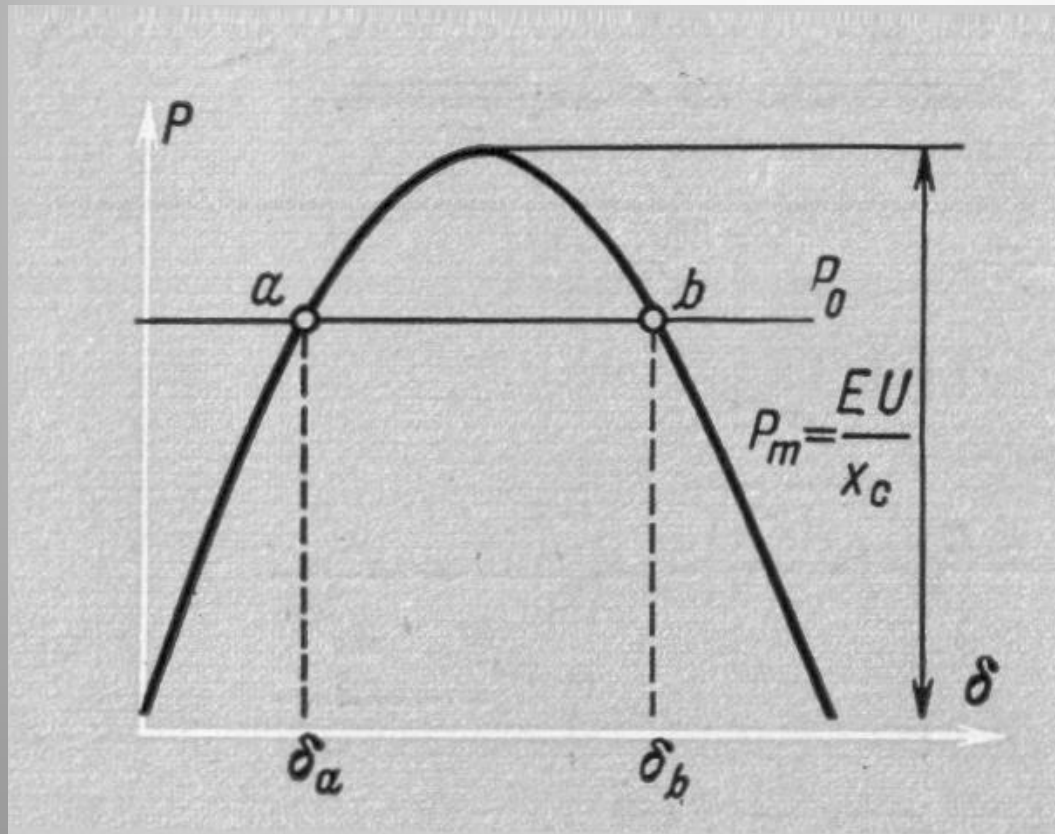
Движение вектора э. д. с. генератора при ускорении генератора



При ускорении генератора вектор э. д. с. перемещается относительно вращающегося с неизменной угловой скоростью вектора напряжения приемной системы U . Связанное с этим увеличение угла δ и обуславливает соответствующее изменение мощности генератора P , возрастающей до тех пор, пока она вновь не уравновесит увеличивающуюся мощность турбины.

Таким образом, величиной, непосредственно определяющей значение активной мощности, отдаваемой генератором приемнику, является угол δ .

Зависимость активной мощности от угла



$$P = \frac{EU}{x_c} \sin \delta$$

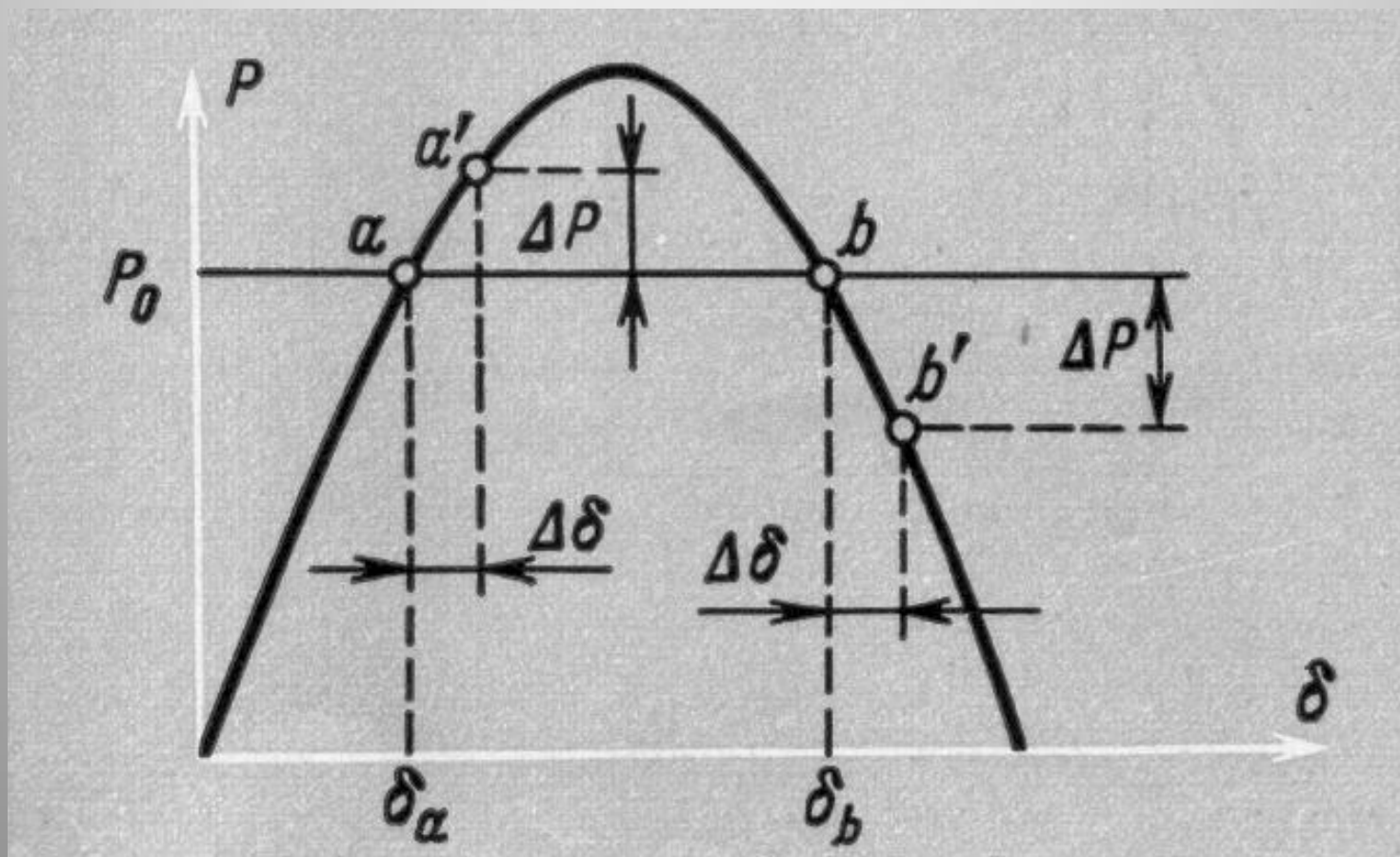
$$P_m = \frac{EU}{x_c}$$

Зависимость мощности от угла имеет синусоидальный характер.

P_m — идеальный предел мощности системы

Равновесие между мощностью турбины и генератора достигается лишь при значениях мощности, меньших P_m , причем данному значению мощности турбины соответствуют, вообще говоря, две возможные точки равновесия на характеристике мощности генератора и, следовательно, два значения угла. Однако в действительности устойчивый установившийся режим работы электропередачи возможен только при угле δ_c . Режим, которому отвечает точка b на падающей части характеристики, неустойчив и длительно существовать не может.

Вопрос 2. Понятие о статической устойчивости

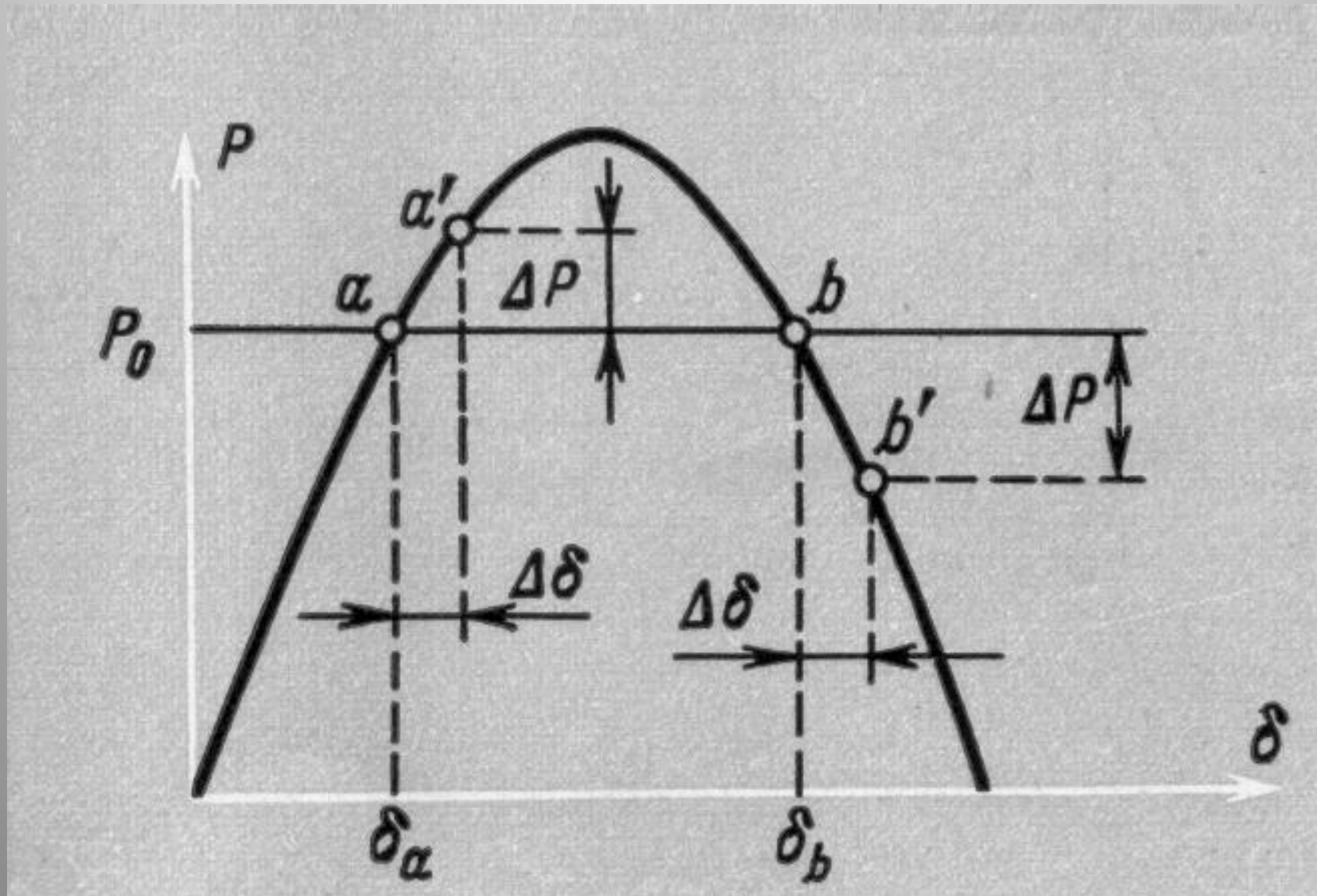


Изменение мощности при приращении угла

Если угол получает небольшое приращение, то мощность генератора, также увеличится.

Мощность турбины не зависит от угла и при любых изменениях последнего остается постоянной. В результате изменения мощности Генератора равновесие моментов турбины и генератора нарушается и на валу машины возникает избыточный момент тормозящего характера, поскольку тормозящий момент генератора в силу положительного изменения мощности преобладает над вращающим моментом турбины.

Выпадение электростанции из синхронизма



В точке b положительное приращение угла сопровождается не положительным, а отрицательным изменением мощности генератора. Изменение мощности генератора вызывает появление избыточного момента ускоряющего характера, под влиянием которого угол не уменьшается, а возрастает. С ростом угла мощность генератора продолжает падать, что обуславливает дальнейшее увеличение угла и т.д. Процесс сопровождается непрерывным перемещением вектора E относительно вектора напряжения U и станция выпадает из синхронизма.

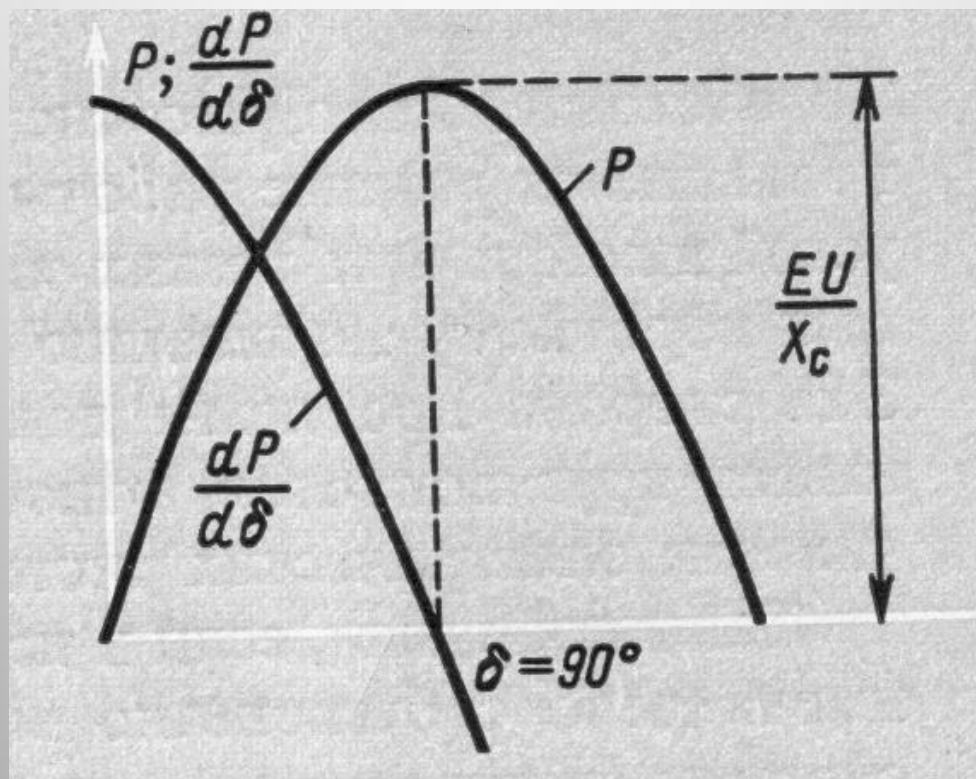
Точка a и, любая другая точка на возрастающей части характеристики мощности отвечают статически устойчивым режимам и, наоборот, все точки падающей части характеристики – статически неустойчивым.

формальный признак статической устойчивости системы: **приращения угла и мощности генератора P должны иметь один и тот же знак, т. е.**

$$\frac{dP}{d\delta} > 0$$

Данная производная, носит название синхронизирующей мощности.

Зависимость синхронизирующей мощности от угла



Производная мощности по углу согласно (1)

равна:
$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{EU}{x_c} \cos \delta$$

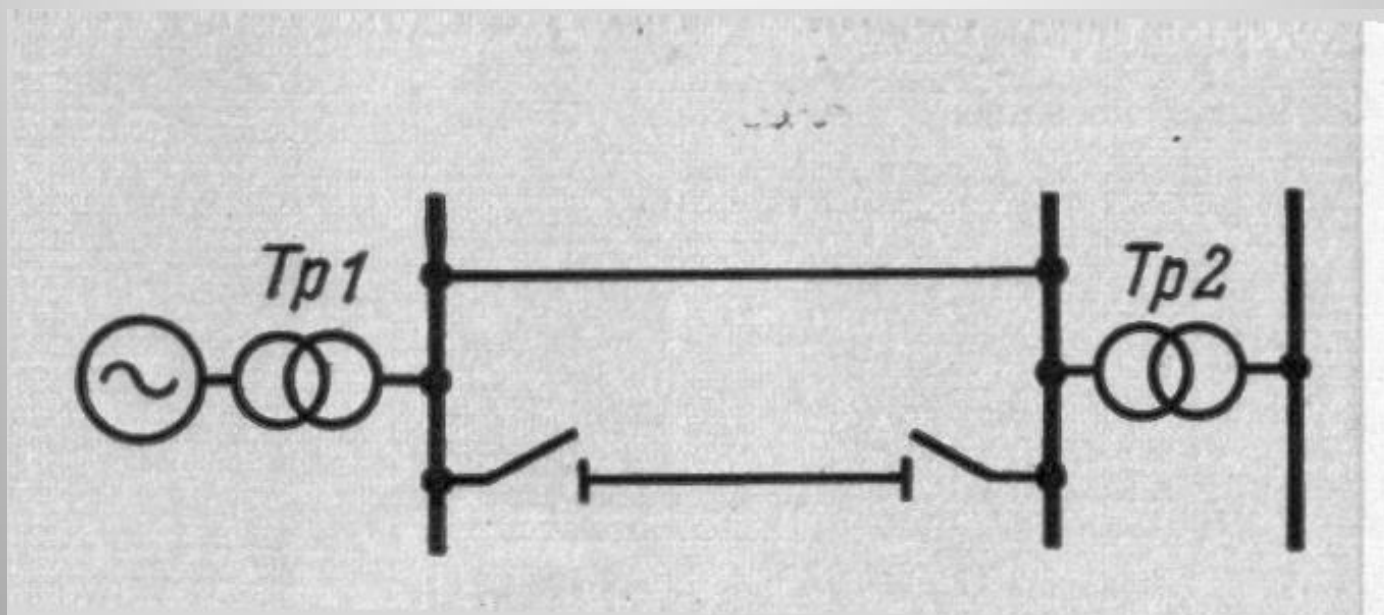
Очевидно, что она положительна при $\delta < 90^\circ$

Вопрос 3. Понятие о динамической устойчивости

Обладая статической устойчивостью ЭЭС при резких внезапных нарушениях режима ее работы, подобных КЗ, отключению генераторов или линий и т. д. может быть динамически неустойчива.

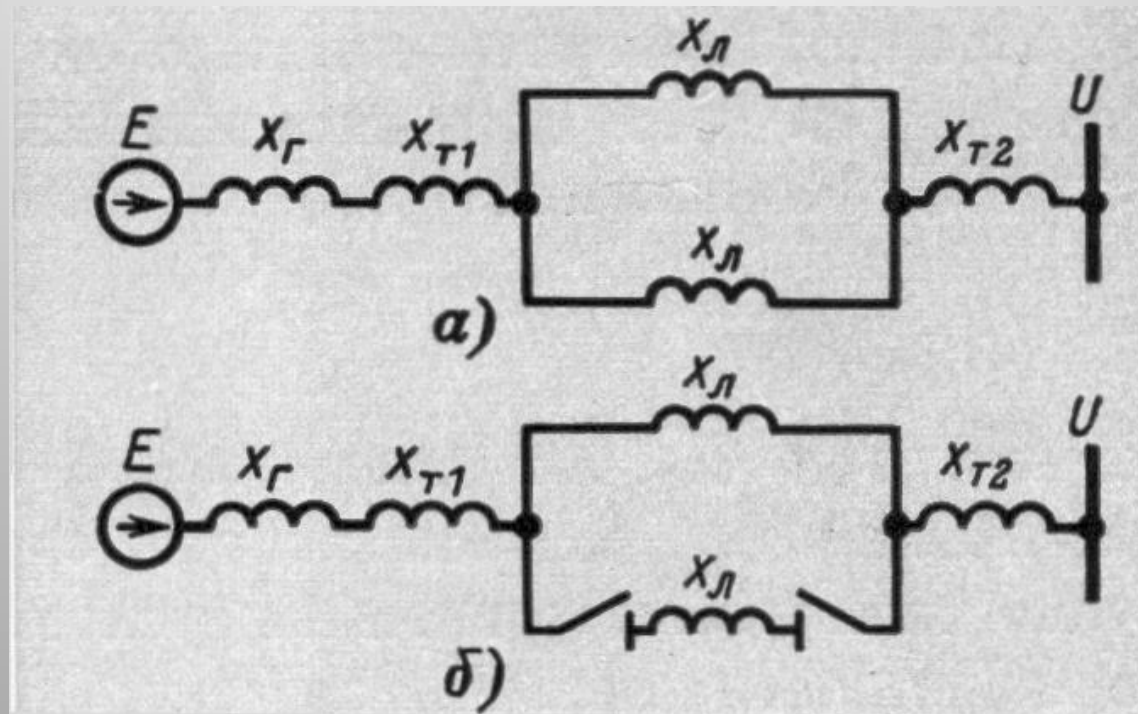
Предметом исследования динамической устойчивости являются значительные возмущения, причем существенное значение приобретают сам характер и размеры возмущения.

Принципиальная схема электропередачи при отключении цепи



Рассмотрим явления, возникающие при внезапном отключении одной из двух параллельных цепей ЛЭП, связывающей удаленную станцию с шинами неизменного напряжения.

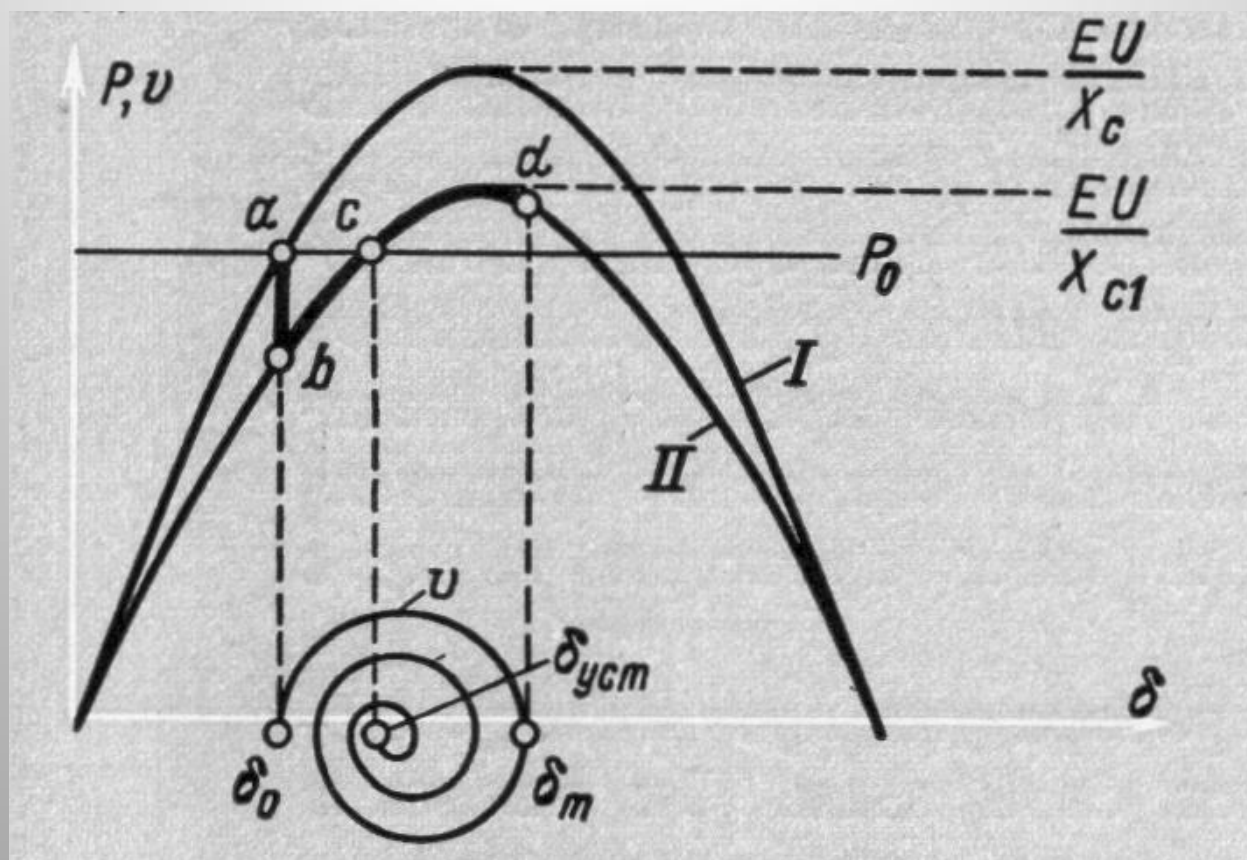
Схема замещения электропередачи при нормальном режиме (а) и при отключении цепи (б)



При отключении одной из цепей ЛЭП индуктивное сопротивление системы увеличивается до:

$$x_{C1} = x_{\tilde{A}} + x_{\dot{O}1} + x_{\ddot{E}} + x_{\dot{O}2}$$

Колебания мощности при отключении цепи



I - характеристика мощности при нормальном режиме;

II - при отключении цепи.

Если режим работы, предшествовавший отключению цепи, определялся точкой a на характеристике мощности нормального режима, то после отключения этому режиму должна соответствовать новая характеристика мощности, причем нетрудно установить какая именно точка этой характеристики будет определять режим в момент отключения цепи. Этой точкой является точка b при том же значении угла, что и в нормальном режиме.

Угол сохраняет свое значение в момент отключения, поскольку вектор э. д. с. генератора E может перемещаться относительно вектора напряжения приемной системы U только при изменениях частоты вращения ротора генератора. Последняя же не может претерпевать скачкообразные изменения в силу существования механической инерции у ротора генератора.

В момент отключения цепи режим работы характеризуется точкой b на новой характеристике, что обуславливает внезапное уменьшение мощности генератора. Мощность турбины остается при этом неизменной, так как регуляторы турбин реагируют на изменение частоты вращения агрегата, которая в момент отключения цепи сохраняет свое нормальное значение. В дальнейшем скорость машины будет изменяться, однако в этой стадии процесса можно считать, что регуляторы не успевают заметно повлиять на мощность, развиваемую турбиной.

Неравенство мощностей, а следовательно, и моментов на валу турбины и генератора вызывает появление избыточного момента, под влиянием которого агрегат турбина-генератор начинает ускоряться. Связанный с ротором генератора вектор э. д. с. E начинает вращаться быстрее, чем вращающийся с неизменной синхронной угловой скоростью вектор напряжения шин приемной системы U .

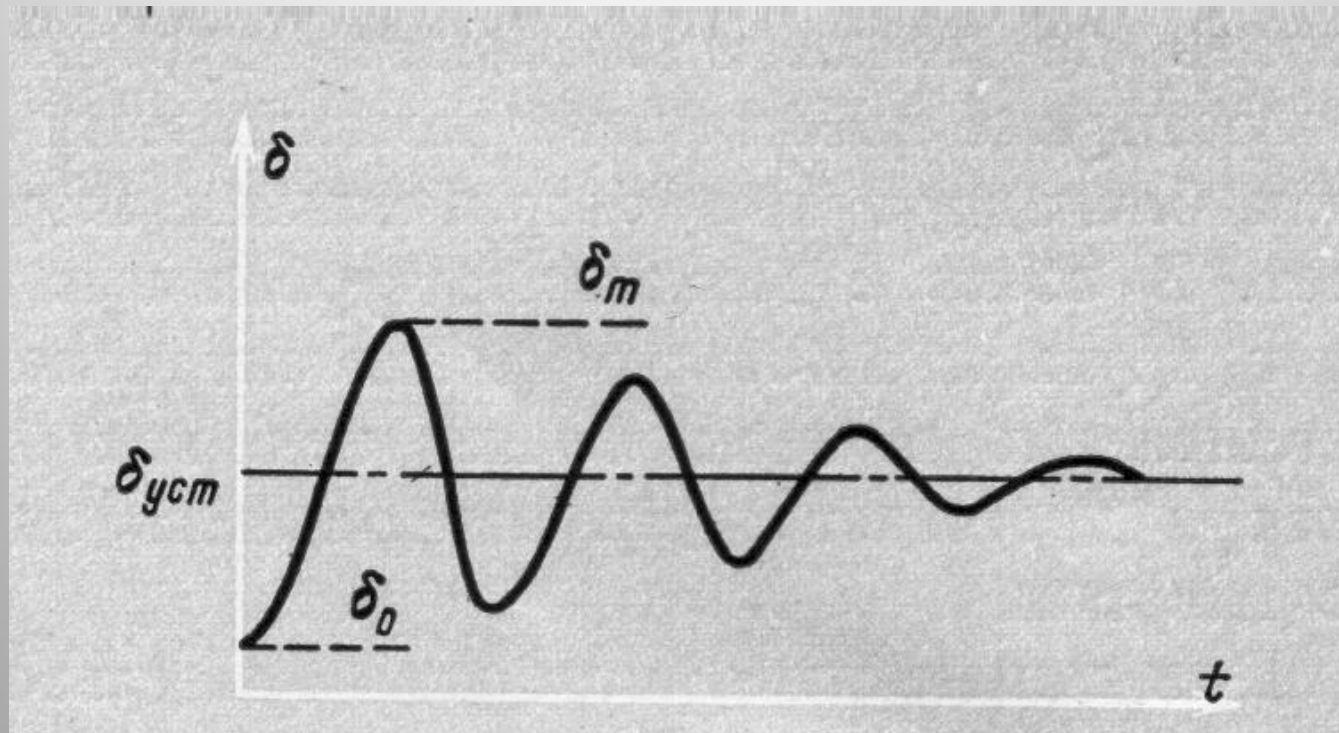
Возникновение относительной скорости вращения приводит к увеличению угла, и на характеристике мощности генератора при отключённой цепи рабочая точка перемещается из точки b по направлению к точке c . При этом мощность генератора начинает возрастать. Однако вплоть до точки c мощность турбины все еще превышает мощность генератора и избыточный момент, хотя и уменьшается, но сохраняет свой знак благодаря чему относительная скорость вращения непрерывно возрастает. В точке c мощности турбины и генератора вновь уравниваются друг друга и избыточный момент равен нулю. Однако процесс не останавливается в этой точке, так как относительная скорость вращения ротора достигает здесь наибольшего значения и ротор проходит точку c по инерции.

При дальнейшем росте угла мощность генератора уже превышает мощность турбины и избыточный момент изменяет свой знак. Он начинает тормозить агрегат. Относительная скорость вращения теперь уменьшается и в некоторой точке d становится равной нулю. Это означает, что в точке d вектор э. д. с. E вращается с той же угловой скоростью, что и вектор напряжения U , и, следовательно, угол между ними больше не возрастает. Угол в этой точке достигает своего максимального значения. Однако и теперь процесс не останавливается

Вследствие неравенства мощностей турбины и генератора на валу агрегата существует избыточный момент тормозящего характера, под влиянием которого частота вращения продолжает уменьшаться и относительная скорость становится отрицательной.

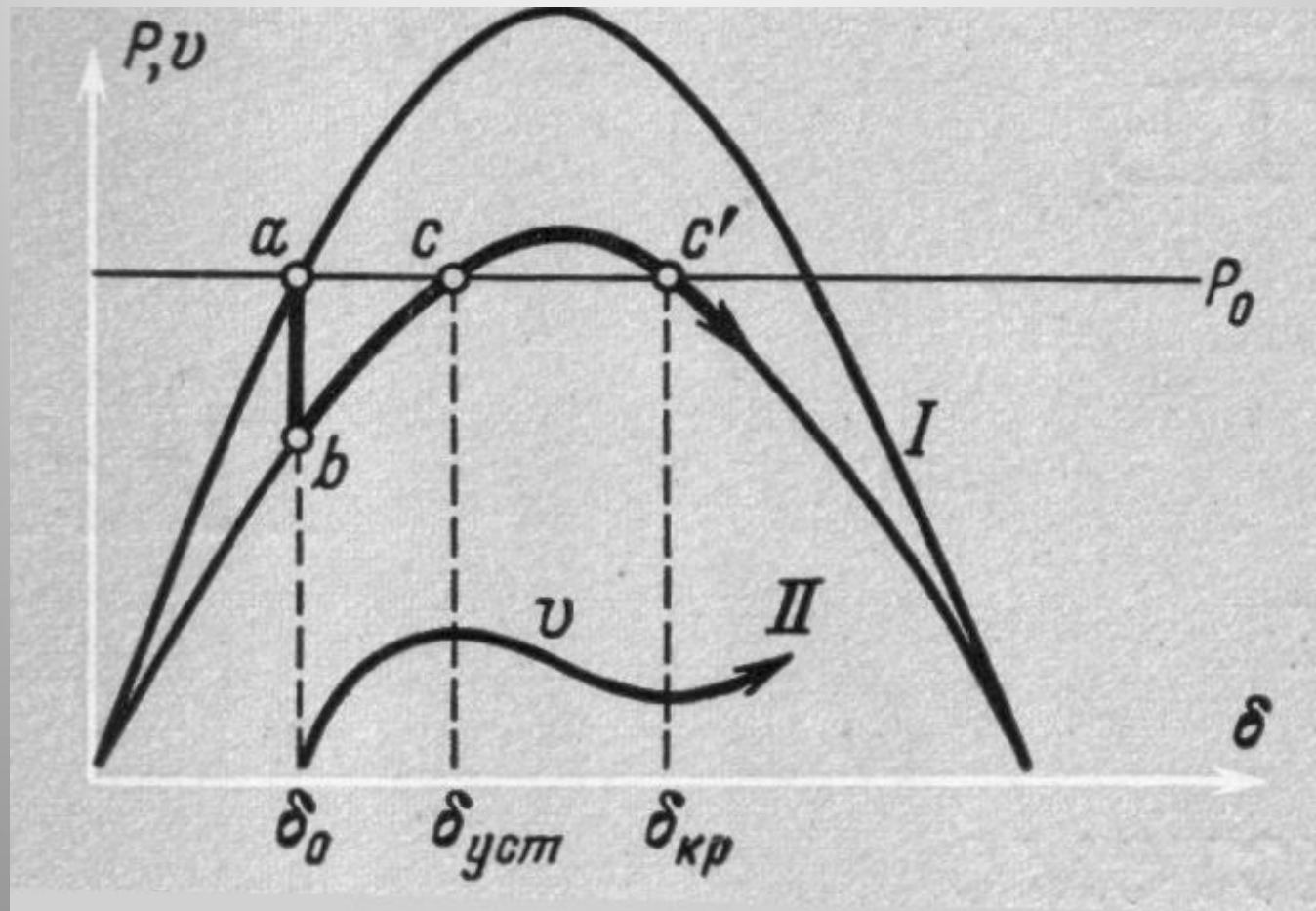
Угол начинает уменьшаться, и рабочая точка, характеризующая процесс на характеристике мощности, перемещается в обратном направлении к точке c . Эту точку ротор вновь проходит по инерции, и около точки b угол достигает своего нового минимального значения, после чего вновь начинает возрастать. После ряда постепенно затухающих колебаний в точке c устанавливается новый установившийся режим с прежним значением передаваемой мощности P_0 и новым значением угла.

Колебания угла при отключении одной параллельной цепи электропередачи



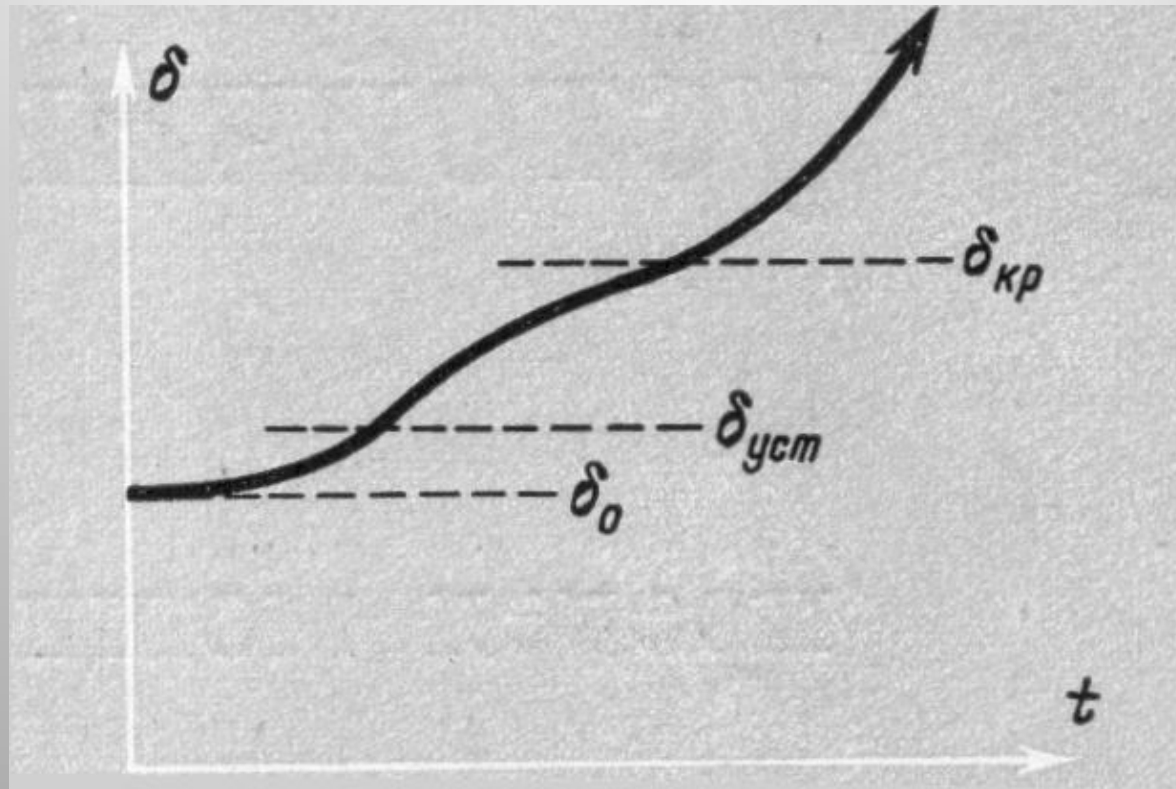
Постепенное уменьшение амплитуды обуславливается потерями энергии при колебаниях частоты вращения генератора.

Нарушение динамической устойчивости при отключении одной параллельной цепи ЛЭП



Торможение ротора, начиная с точки с, уменьшает относительную скорость вращения. Однако угол в этой фазе процесса все еще возрастает, и если он успеет достигнуть критической величины в точке с на пересечении падающей ветви синусоиды мощности генератора с горизонталью мощности турбины прежде чем относительная скорость упадет до нуля, в дальнейшем избыточный момент на валу машины становится вновь ускоряющим, скорость начнет быстро возрастать и генератор выпадает из синхронизма.

Нарастание угла при нарушении устойчивости



Если в процессе качаний будет пройдена предельная точка качаний, то возврат к установившемуся режиму уже невозможен.

Несмотря на теоретическую возможность существования нового установившегося (и статически устойчивого) режима в точке s , процесс качания машины при переходе к этому режиму может привести к выпадению машины из синхронизма. Такой характер нарушения устойчивости может быть назван динамическим.

Основной причиной нарушений динамической устойчивости электрических машин являются обычно КЗ, резко уменьшающие амплитуду характеристики мощности.