



***Электромеханические  
переходные процессы в  
электроэнергетическ  
их системах***

**ЛЕКЦИЯ 5**

**Структурная схема объекта**

**Формирование сигналов регулирования**

**Структурная схема САРВ**

**Характеристическое уравнение и его  
коэффициенты**

**Области колебательной устойчивости**

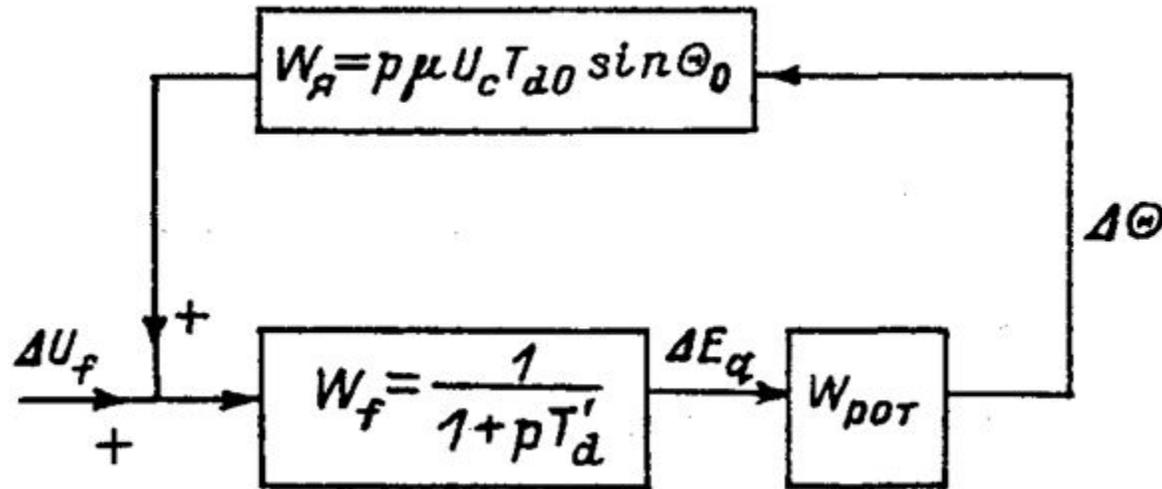
**Динамическая устойчивость**

# Структурная схема для исследования статической устойчивости

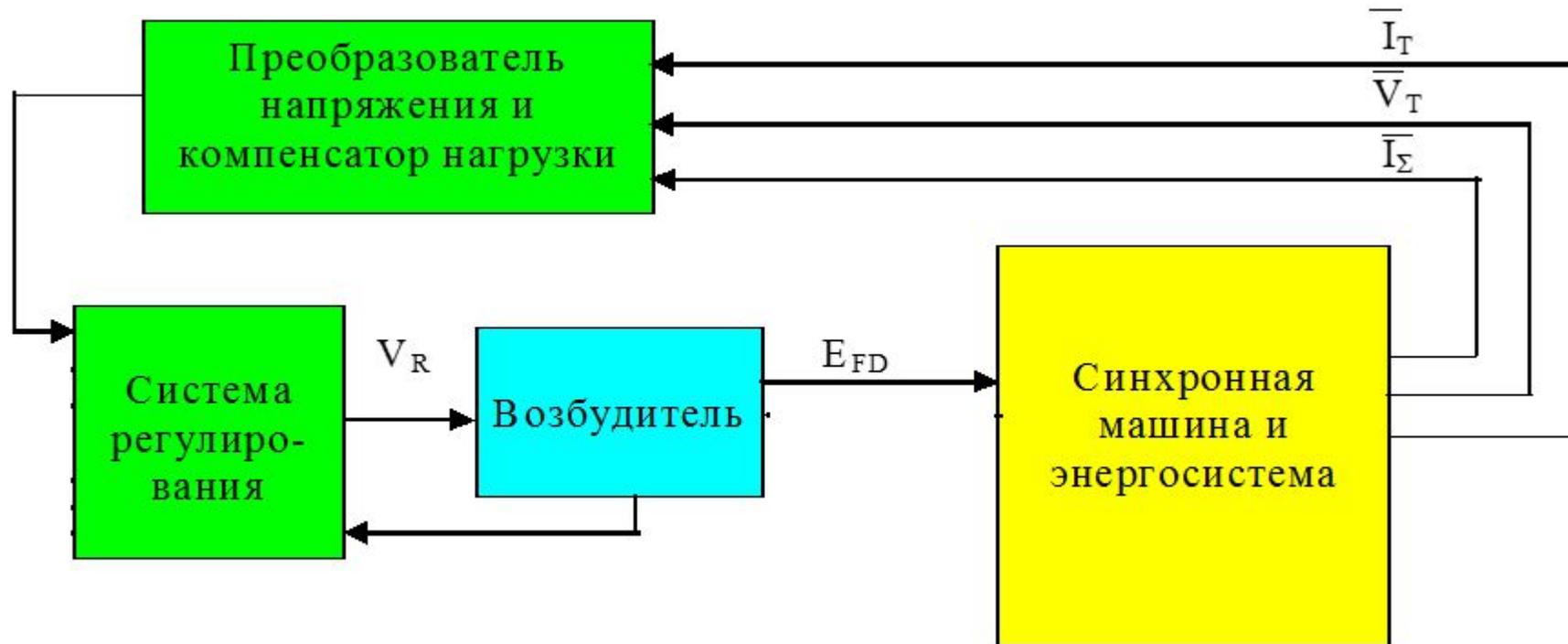
$$\Delta E_q = \frac{\Delta U_f + p \mu T_{d0} U_c \sin \Theta_0 \Delta \Theta}{1 + p T'_d};$$

$$\Delta \Theta = - \frac{U_c \sin \Theta_0}{H_j X_{d\Sigma} p^2 + D X_{d\Sigma} p + E_{q0} U_c \cos \Theta_0 + U_c^2 \cos 2\Theta_0 (X_d - X_q) / X_{q\Sigma}} \Delta E_q$$

$$T'_d = T_{d0} \frac{X'_d + X_{BH}}{X_d + X_{BH}} = T_{d0} \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}} \quad \mu = \frac{X_d - X'_d}{X'_{d\Sigma}}$$



# Структурная схема простейшей регулируемой энергосистемы



# Алгоритм регулирования

$$\begin{aligned} U_f &= U_{f0} - W_{oU} \cdot (\Delta U_\Gamma - K_{CT} \cdot I_{\Gamma r} + K_{КОМП} \cdot I_{\Sigma r}) + \\ &+ U_{P\Phi} - \\ &- K_{1U} \cdot U'_\Gamma - K_{1f} \cdot W_{1f} \cdot I'_f + \\ &+ K_{of} \cdot \Delta f_U + K_{1f} \cdot W_{1f} \cdot f'_U, \end{aligned}$$

# Входные сигналы системы регулирования

$$\Delta U_r = (1 - a) (\cos \Theta_{r0} \Delta E_q - M_r \Delta \Theta);$$

$$\Delta \Theta_{BH} = \frac{(1 - a)}{U_{r0}} (\sin \Theta_{r0} \Delta E_q + L_r \Delta \Theta),$$

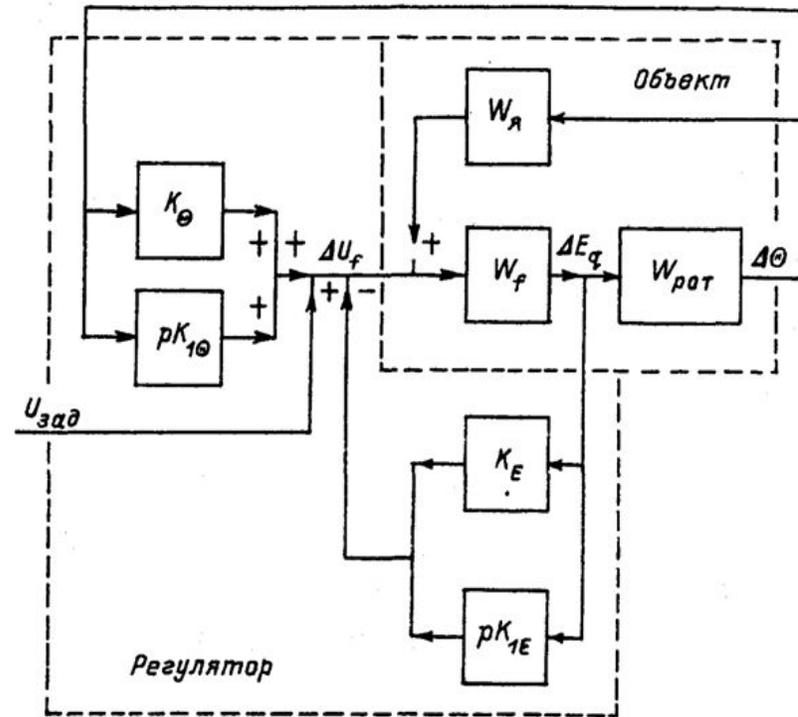
$$\Delta f_u = \frac{1 - a}{U_{r0}} (\sin \Theta_{r0} p \Delta E_q + L_r p \Delta \Theta)$$

$$M_r = E_{q0} \sin \Theta_{r0} + \frac{X_d - X_q}{X_{q\Sigma}} U \sin (\Theta_0 + \Theta_{r0});$$

$$L_r = E_{q0} \cos \Theta_{r0} + \frac{X_d - X_q}{X_{q\Sigma}} U \cos (\Theta_0 + \Theta_{r0})$$

$$\alpha = X_d / X_{d\Sigma}$$

# Структурная схема системы регулирования



$$\Delta U_f = -(K_E + pK_{1E}) \Delta E_q + (K_\theta + pK_{1\theta}) \Delta \Theta, \quad K_E = K_{0u} (1 - a) \cos \Theta_{r0};$$

$$K_{1E} = (K_{1u} (1 - a) \cos \Theta_{r0} + K_{1if} W_{if}) - K_f W_f m \frac{(1 - a)}{U_{r0}} K_r \sin \Theta_{r0}$$

$$K_\theta = K_{0u} (1 - a) M_r \sin \Theta_{r0} \quad K_{1\theta} = (1 - a) \left( K_{1u} M_r \sin \Theta_{r0} + K_{1if} W_{if} L_T m \frac{\cos \Theta_{r0}}{U_{r0}} \right)$$

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0.$$

$$a_1 \geq 0; \quad a_n \geq 0; \quad \Delta_{n-1} \geq 0,$$

$$\Delta_{n-1} = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ 0 & a_4 & a_3 \end{vmatrix} = 0.$$

## Коэффициенты характеристического уравнения

$$a_0 = \tau H_j \left[ T'_d X_{d\Sigma} + X_{\text{BH}} \left( K_{1u} \cos \Theta_r - \frac{K_f \sin \Theta_r}{U_r} \right) \right];$$

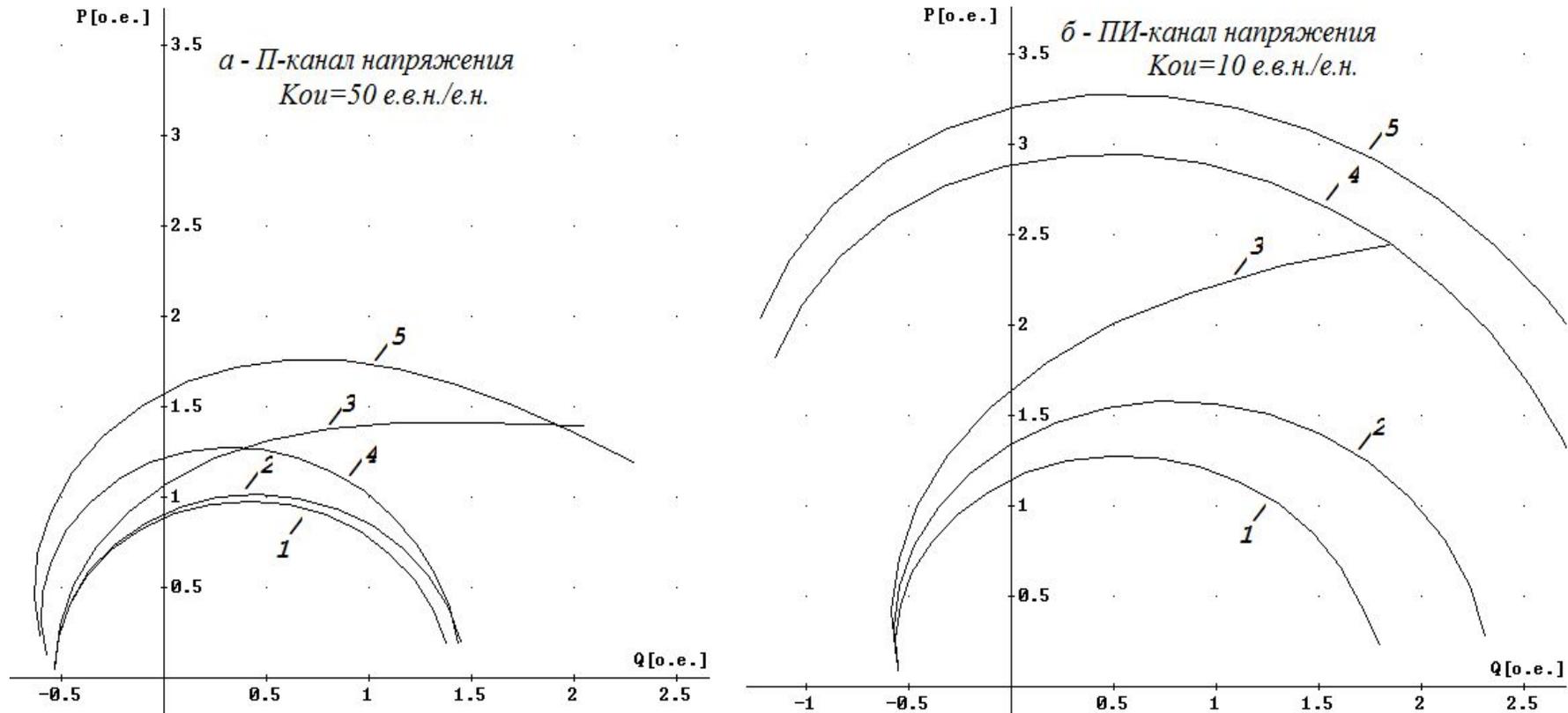
$$a_1 = H_j \left\{ X_{d\Sigma} (K_{1if} + T'_d + \tau) + X_{\text{BH}} \left[ (K_{1u} + \tau K_{0u}) \cos \Theta_r - \frac{K_f \sin \Theta_r}{U_r} \right] \right\};$$

$$a_2 = H_j (X_{d\Sigma} + K_{0u} X_{\text{BH}} \cos \Theta_r) + \tau \left\{ T_{d0} U_c^2 \mu \sin^2 \Theta + E_q U_c [T'_d \cos \Theta + K_{1u} (1-a) \cos \Theta_{\text{BH}} + \frac{(1-a) \sin \Theta_{\text{BH}}}{U_r} K_f] \right\};$$

$$a_3 = T_{d0} U_c^2 \mu \sin^2 \Theta + E_q U_c \left\{ (K_{1if} + T'_d + \tau) \cos \Theta + (1-a) \left[ (K_{1u} + \tau K_{0u}) \cos \Theta_{\text{BH}} + \frac{\sin \Theta_{\text{BH}}}{U_r} K_f \right] \right\};$$

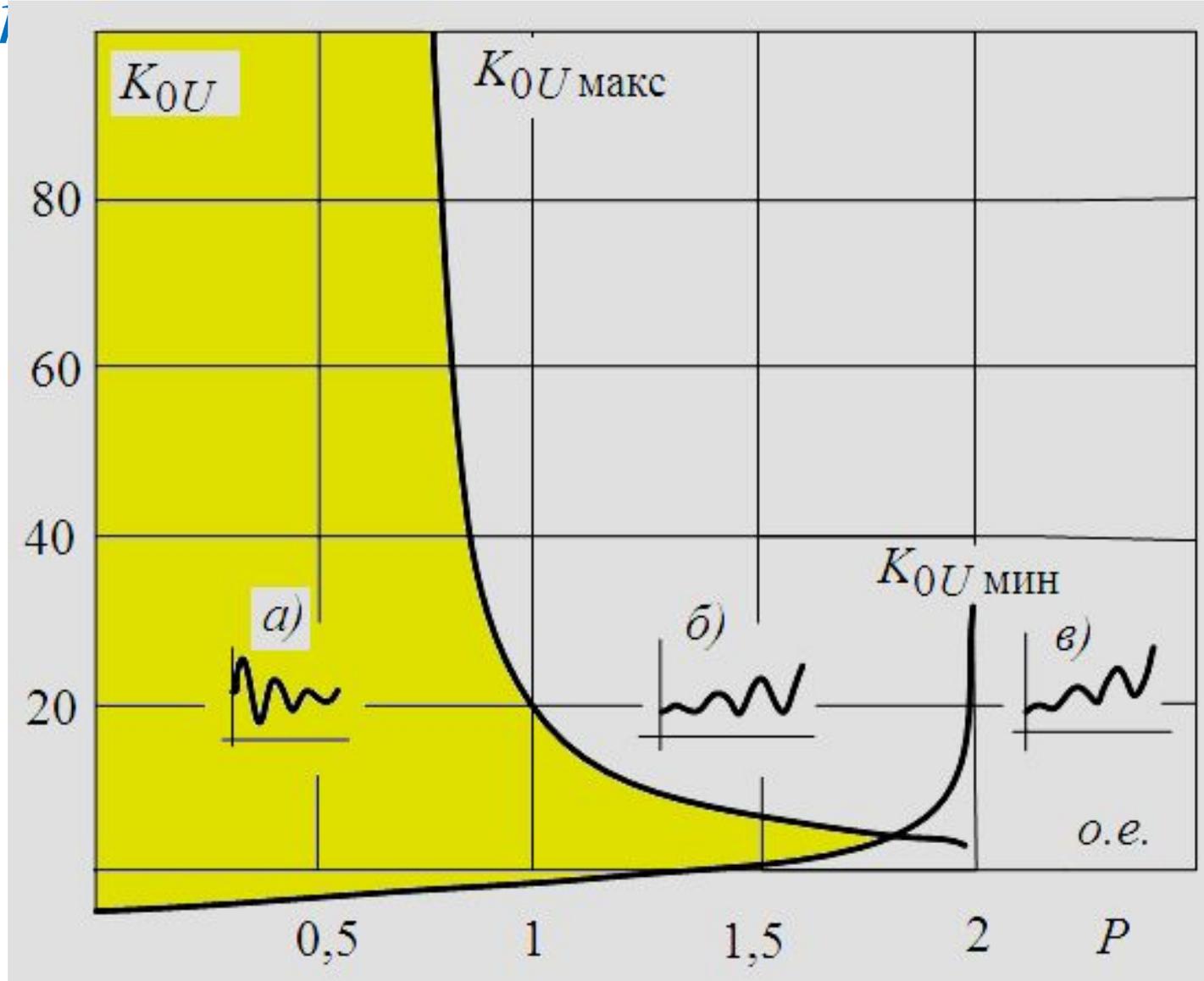
$$a_4 = E_q U_c [\cos \Theta + (1-a) K_{0u} \cos \Theta_{\text{BH}}].$$

## *Качественная иллюстрация влияния алгоритма канала регулирования напряжения на области колебательной устойчивости генератора*



- 1** – включен только канал регулирования напряжения (АРН);
- 2** – включен АРН + производная напряжения  $U'$ ;
- 3** – АРН +  $U'$  + **PSS**;
- 4** – АРН +  $U'$  + производная тока возбуждения;
- 5** – АРН +  $U'$  + **PSS** + производная тока возбуждения

коэффициенты усиления по  
от



# Общие положения теории динамической устойчивости

- Статическая устойчивость – необходимое, но недостаточное условие функционирования ЭЭС
- Более реальны возмущения большой амплитуды  
(КЗ, вкл/откл крупной нагрузки, линий и т.д.)
  - однофазное КЗ 0,12 сек. и откл. фазы на 1 сек. (цикл ОАПВ)
  - двухфазное на землю КЗ 0,12 сек. и откл. ЛЭП на 0,5 сек.
- Трехфазное – самое простое для расчетов, мощность генератора равна нулю
- Для несимметричных КЗ – эквивалентные шунт и ЭДС

## *ЗАДАЧИ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ*

- а) расчет параметров динамического перехода при эксплуатационных или аварийных отключениях нагруженных элементов электроэнергетической системы;**
- б) определение параметров динамических переходов при КЗ в системе с учетом различных факторов:**
  - **возможного перехода одного несимметричного КЗ в другое (например, однофазного в двухфазное);**
  - **работы автоматического повторного включения (АПВ) элемента, отключившегося после КЗ, и т. п.**

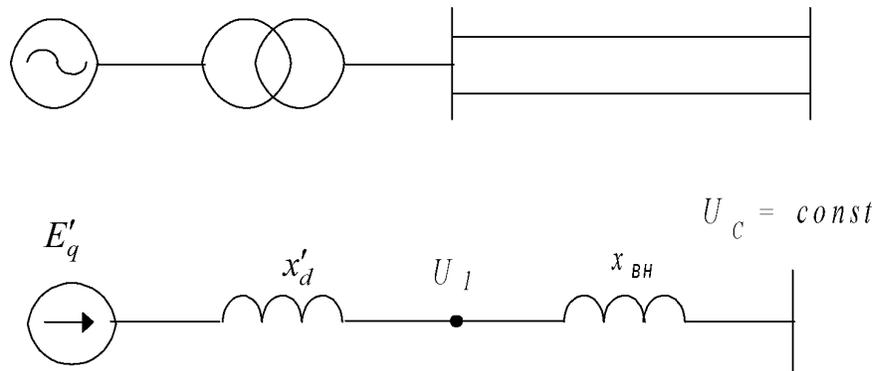
**Основная задача – определение предельных времен отключения и выработка ПА мероприятий**

## ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗЛИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

<i>n</i>	<i>Вид аварии</i>	<i>Обозначение</i>	$\Delta z^{(n)}$	$I_1$	$m^{(n)}$
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<b>1</b>	<b>Трёхфазное к.з.</b>	<b>(3)</b>	<b>0</b>	$\frac{E_1}{z_1}$	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Двухфазное к.з. на землю</b>	<b>(1,1)</b>	$\frac{z_2 \cdot z_0}{z_2 + z_0}$	$z_1 + \frac{z_2 \cdot z_0}{z_2 + z_0}$	<b>1,5÷√3</b>
<b>3</b>	<b>Разрыв одной фазы</b>	<b>(1р)</b>	$z_2 + z_0$		
<b>4</b>	<b>Двухфазное к.з.</b>	<b>(2)</b>	$z_2$	$\frac{E_1}{z_1 + z_2}$	<b>√3</b>
<b>5</b>	<b>Однофазное к.з. на землю</b>	<b>(1)</b>	$z_2 + z_0$	$\frac{E_1}{z_1 + z_2 + z_0}$	<b>3</b>
<b>6</b>	<b>Разрыв двух фаз</b>	<b>(2р)</b>			

# Схема рассматриваемой ЭЭС

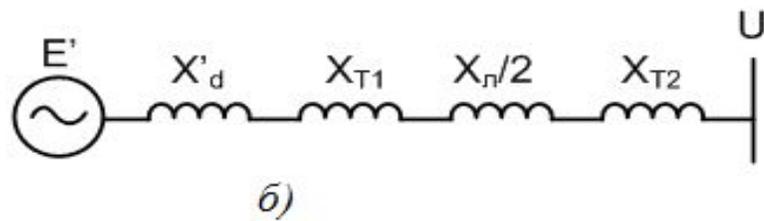
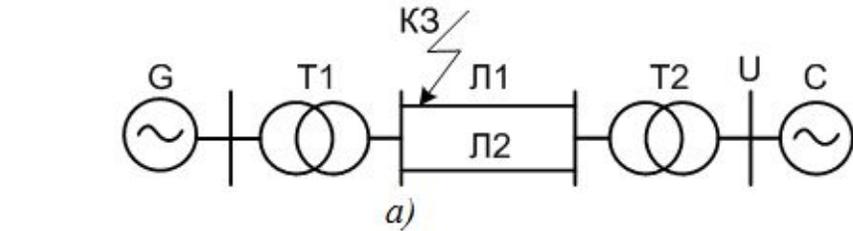
- Простейшая система «машина-линия-ШБМ»



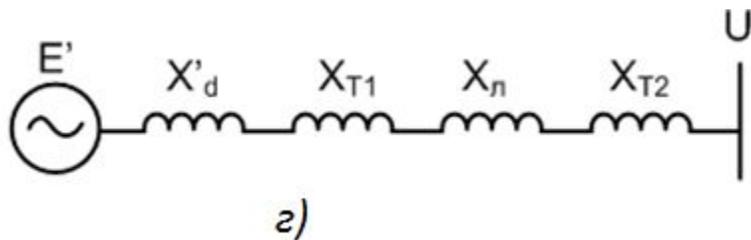
- Характеристика мощности генератора

$$P = \frac{E'_q U_c}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta$$

## СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

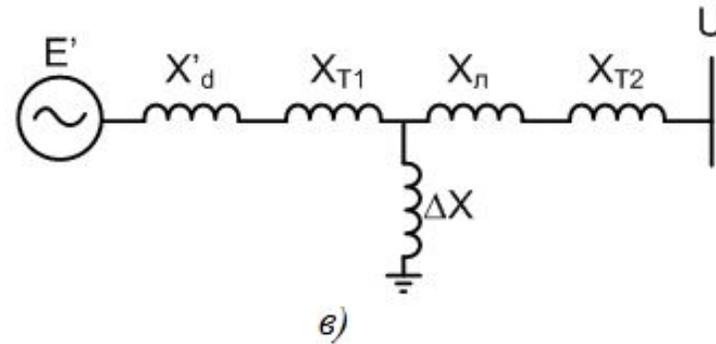


$$X_I = X'_d + X_{T1} + \frac{X_{\text{л}}}{2} + X_{T2}$$



$$X_{III} = X'_d + X_{T1} + X_{\text{л}} + X_{T2}$$

$$P_{mI} = \frac{E' U}{X_I}$$



$$X_{II} = (X'_d + X_{T1}) + \left( \frac{X_{\text{л}}}{2} + X_{T2} \right) + \frac{(X'_d + X_{T1}) \left( \frac{X_{\text{л}}}{2} + X_{T2} \right)}{\Delta X}$$

**Принципиальная схема электропередачи  
(а) и схемы замещения для**

- нормального (б),
- аварийного (в)
- послеаварийного (г)

**режимов**

# Уравнение движения ротора и «простой переход»

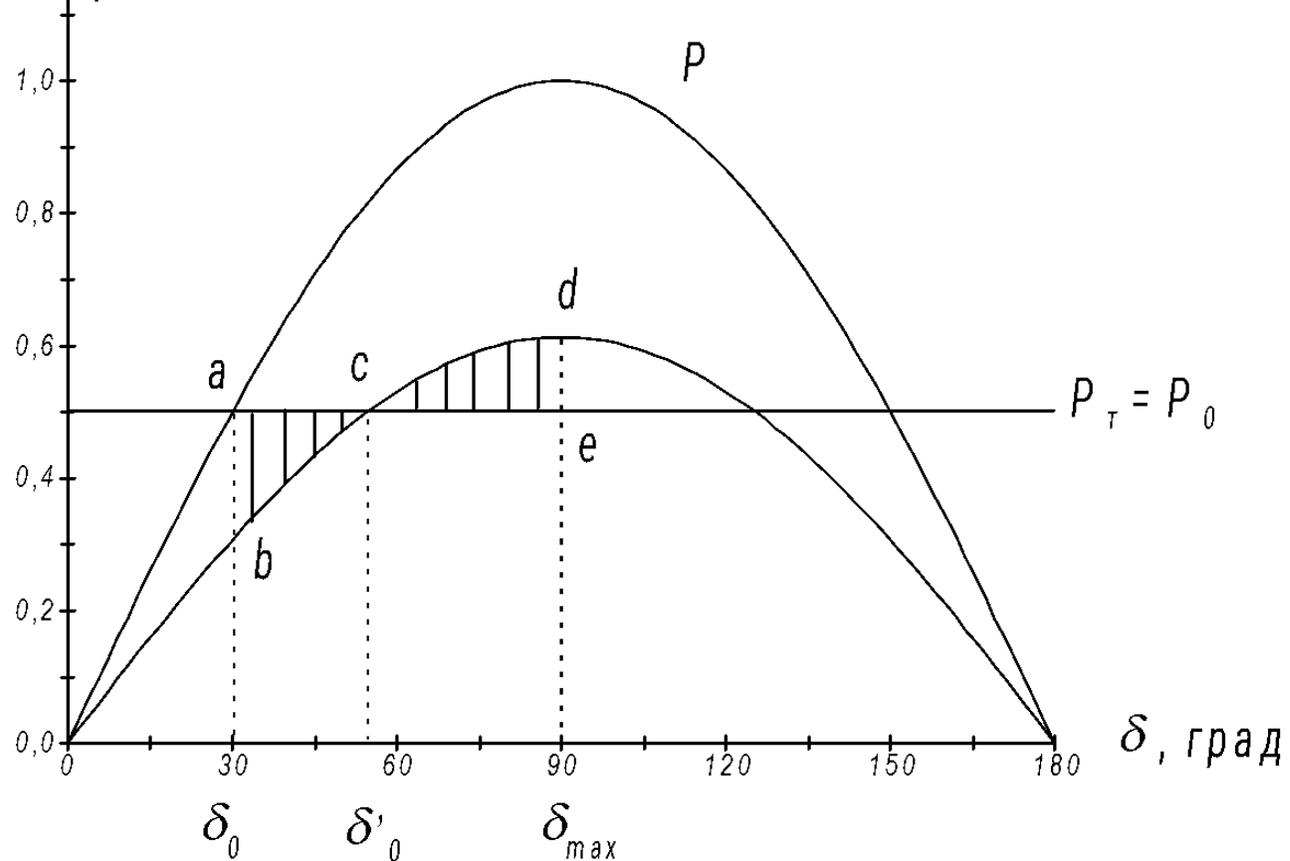
- Уравнение движения ротора генератора

$$\frac{T_J}{\omega_c} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_T - P \quad \text{или} \quad \frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_J} (P_T - P) = \frac{1}{T_J} \Delta P, \quad \frac{d\delta}{dt} = \omega_c s$$

- При  $P_T > P$  ротор ускоряется,  $P_T < P$  – тормозится
- Угол  $\delta$  не изменяется скачком ни при каких изменениях схемно-режимных условий
- Простой переход – процесс, возникающий вследствие однократного неустранимого изменения схемно-режимных условий
- Абстракция как и «малое возмущение»

# Характеристики мощности в простом переходе

- Нормальный / аварийный (откл. цепи ЛЭП) режимы



# Анализ протекания переходного процесса

- Отключение одной цепи – увеличение экв.инд.сопр.
- Уменьшение характеристики мощности
- Небаланс мощности на валу агрегата – ротор получает положительное ускорение (отрезок «*bc*»)
- За счет инерции ( $T_j$ ) проскакивает точку «*c*»
- Далее ротор тормозится (отрезок «*cd*») и после нескольких периодов колебаний возвращается в точку «*c*»
- Точка «*c*» – более тяжелый режим с меньшим запасом статической устойчивости

# Работа сил ускорения и торможения

- Работа сил – произведение мощности на путь

$$A_{\text{уск}} = \int_{\delta_o}^{\delta_o} \Delta P d\delta \quad A_{\text{торм}} = \int_{\delta'_o}^{\delta_{\text{max}}} \Delta P d\delta$$

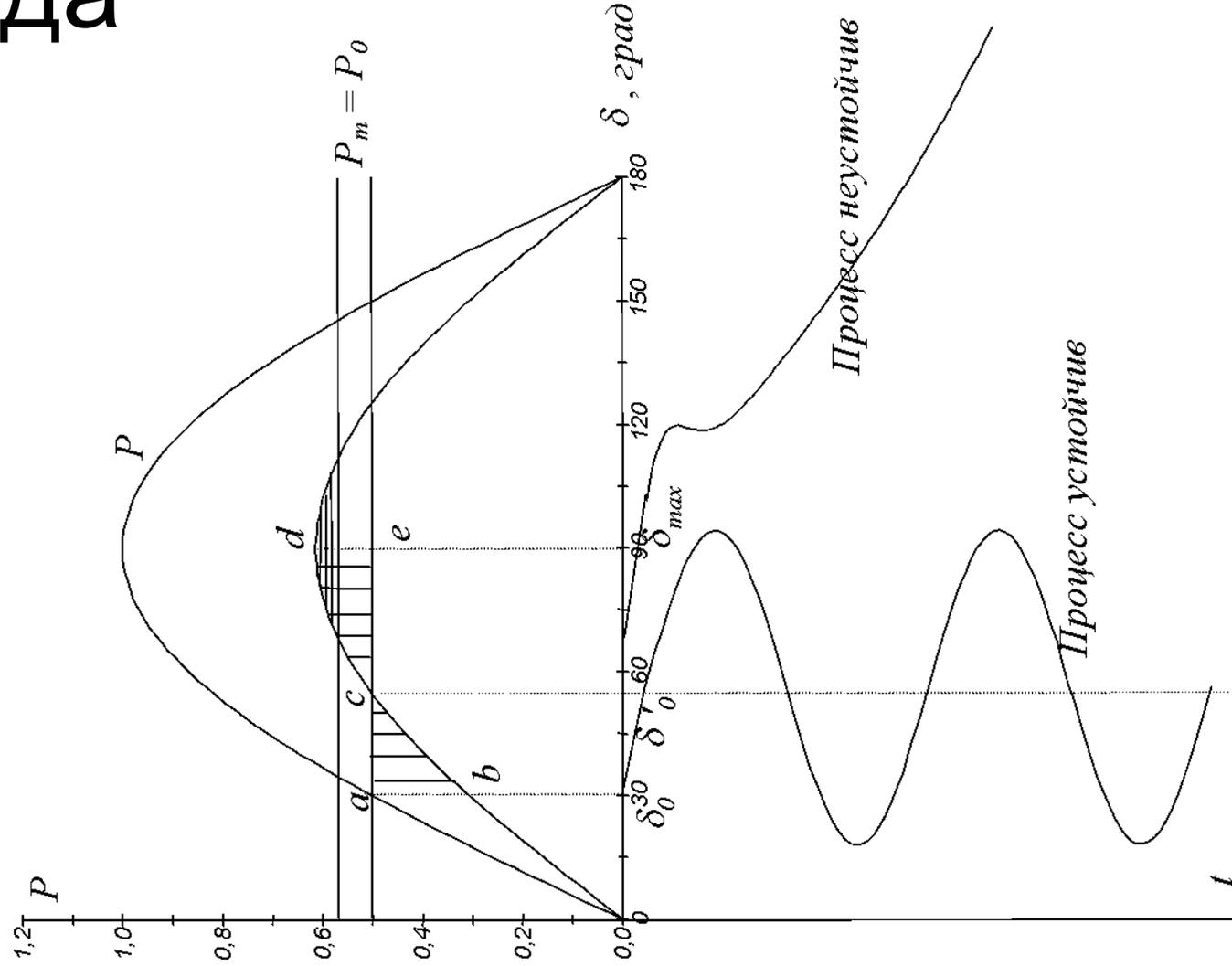
- Энергия запасаемая ротором в процессе ускорения (фигура «*abca*») или торможения (фигура «*cdec*»)

$$\Delta P d\delta = T_J \frac{d\omega_c}{dt} \cdot \omega_c s dt = \omega_c T_J s ds$$

- Критерий динамической устойчивости –  
правило площадей

$$A_{\text{уск}} = A_{\text{торм}}$$

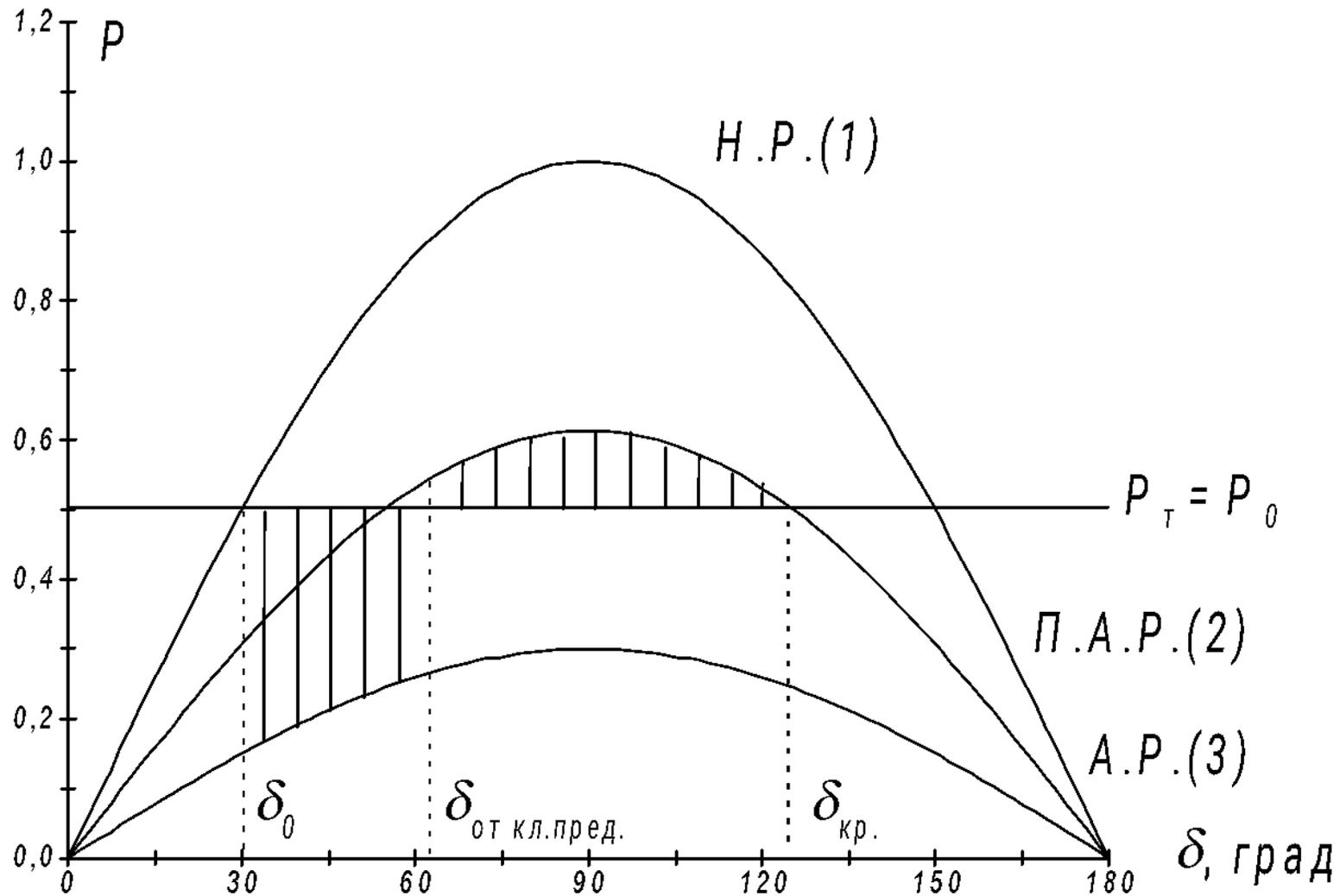
# Пример устойчивого / неустойчивого перехода



# Общий случай расчетов динамической устойчивости

- Реальный расчетный случай –  $K^{(1)}$  или  $K^{(1,1)}$
- При  $K^{(1,1)}$  посадки напряжения в сети чрезвычайно велики
- Последующее отключение цепи ЛЭП
- Т.о., рассматривается три режима при аварии
  - нормальный режим (две цепи ВЛ в работе)
  - аварийный режим  $K^{(1,1)}$
  - послеаварийный режим (отключена одна цепь)
- В приближенных расчетах значения шунтов выбираются для обеспечения посадки напряжения на 30, 60 и 100%

# Характеристики мощности для НР, АР и ПАР



# Правило площадей для НР, АР и ПАР

- Общие выражения для площадок ускорения и торможения

$$A_{\text{уск}} = \int_{\delta_0}^{\delta_{\text{откл}}} (P_o - P_{m \text{ АР}} \sin \delta) d\delta, \quad A_{\text{торм}} = \int_{\delta_{\text{откл}}}^{\delta_{\text{кр}}} (P_o - P_{m \text{ ПАР}} \sin \delta) d\delta$$

- Равенство площадок и доп.преобразования дают (при постоянстве ускоряющей мощности  $\Delta P_{\text{ср}}$ )

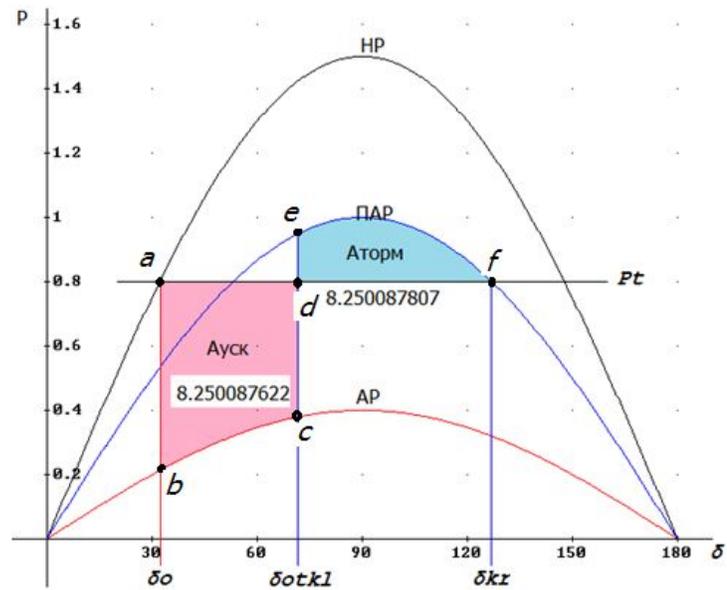
$$\Delta t_{\text{КЗ пред}} = \sqrt{\frac{2\Delta\delta_{\text{КЗ}} T_J}{\omega_C \Delta P_{\text{ср}}}}$$

где

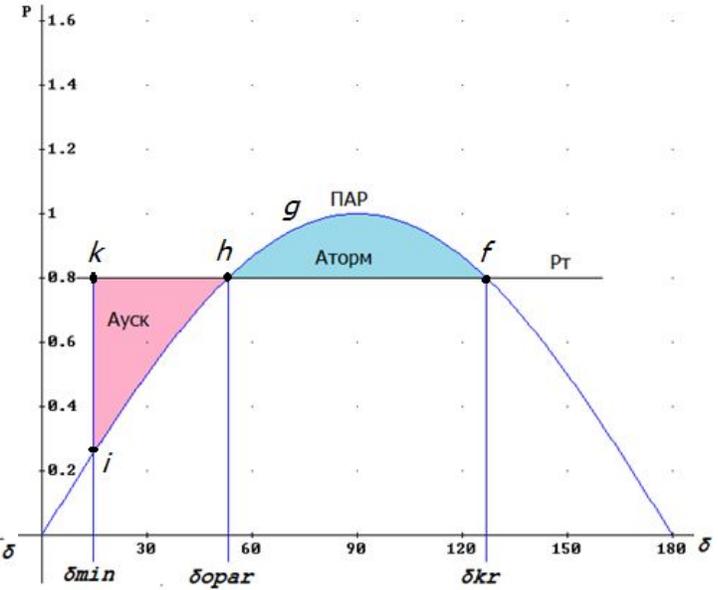
$$\Delta\delta_{\text{КЗ}} = \delta_{\text{откл.пред.}} - \delta_0$$

Применение правила площадей для анализа динамической устойчивости генератора

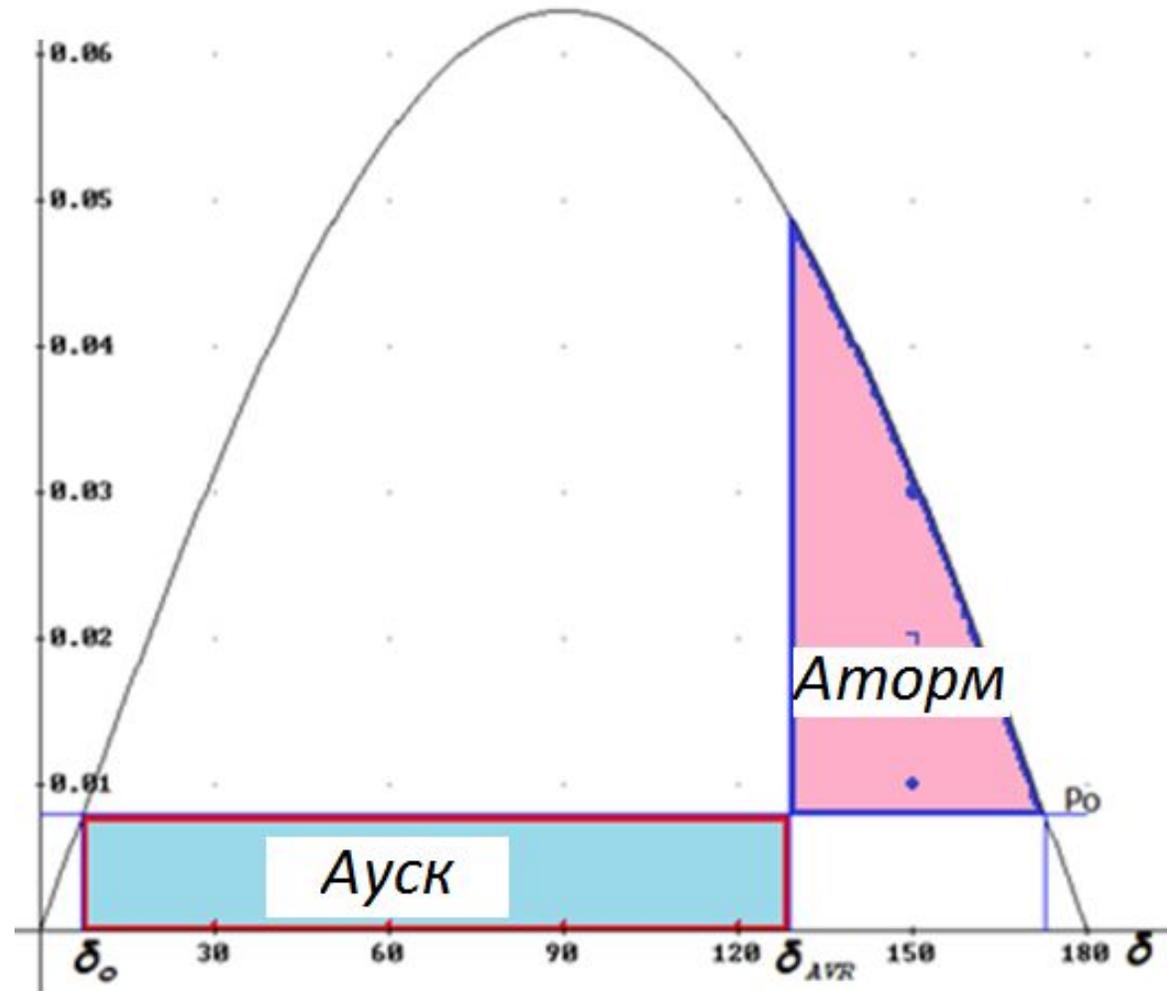
### Ускорение ротора



### Торможение ротора



# АВАРИЙНЫЙ РЕЖИМ ПРИ ПРЕДЕЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ОТКЛЮЧЕНИЯ КЗ



# Времена отключения коротких замыканий

- Нормативные времена отключения
  - 220 кВ 0,16 сек.
  - 330, 500 кВ 0,12 сек.
  - 750 кВ 0,1 сек.
  - 1150 кВ 0,08 сек.
- Минимальные времена с учетом современных технических средств (релейная защита + выключатель) – 0,05-0,06 сек.

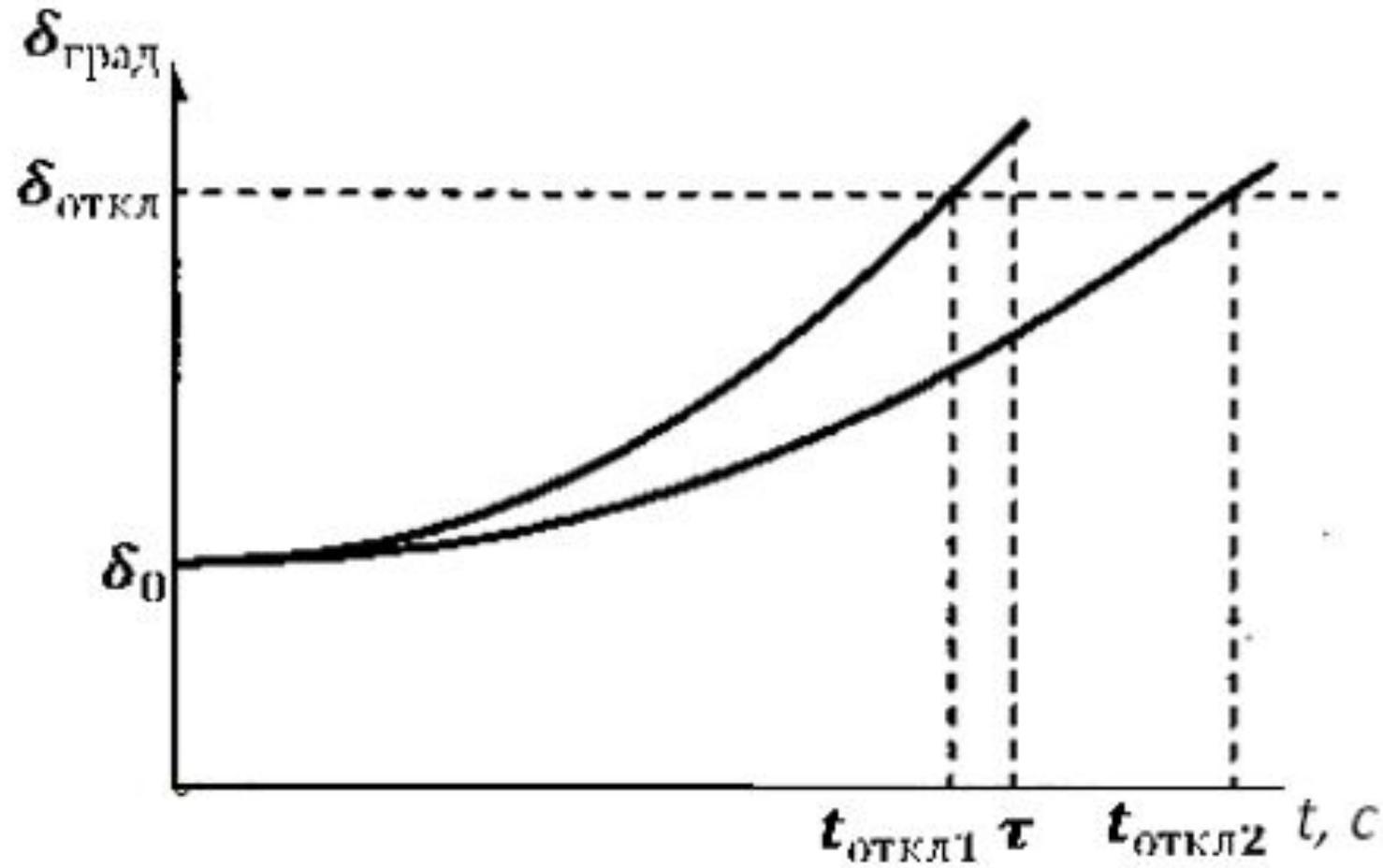
# Меры повышения динамической устойчивости (1)

- Сокращение времени отключения КЗ
- Электрическое торможение (последовательное / параллельное) генератора
- Отключение нагрузки
- Отключение генераторов
- Воздействия в УПК

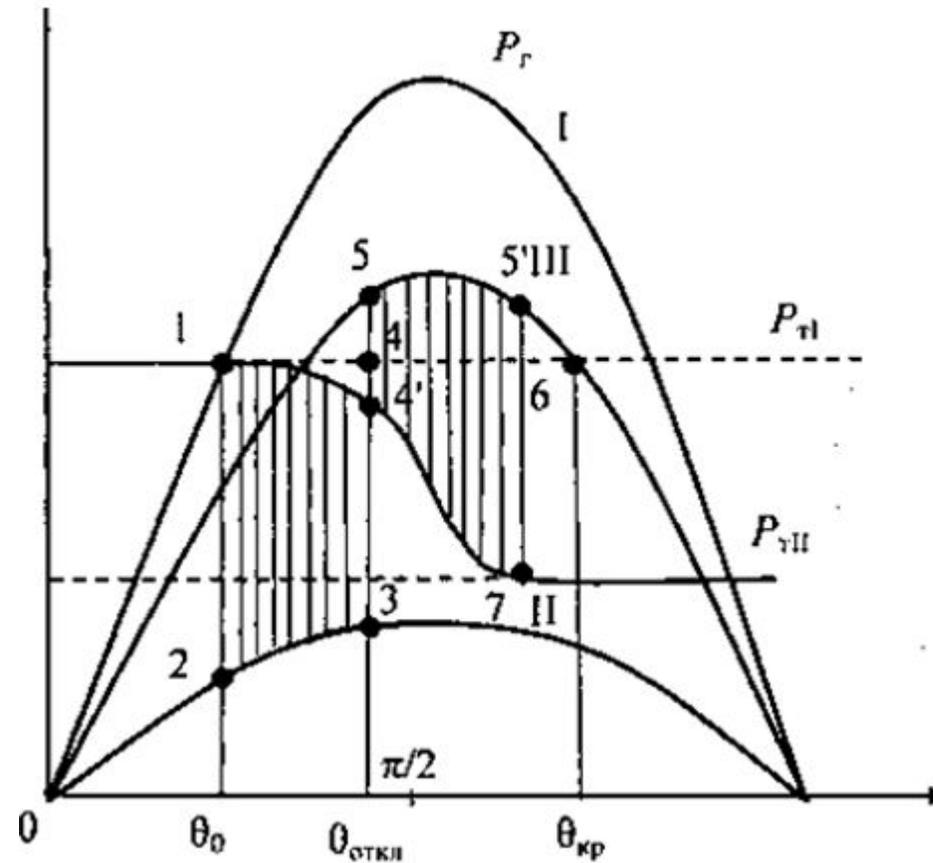
# Меры повышения динамической устойчивости (2)

- Автоматическое повторное включение
  - снижение тока подпитки дуги до 50-70 А происходит за 0,2-0,4 сек.
  - важна проверка цикла ОАПВ (РЗ+выключатель, дуга, обратная подготовка к включению)
- Регулирование мощности турбины
  - каскады крупных ГЭС
    - ОЭС Северо-Запада – Путкинская (г.Кемь) в Карелии, Князегубская ГЭС за Полярным кругом
    - ОЭС Центра – каскад Волжских ГЭС
  - экономическое стимулирование за счет увеличения закупочных цен на эл/эн
  - быстрые парогазовые установки (типа СЗ ТЭЦ)

# МОМЕНТА ИНЕРЦИИ И ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ



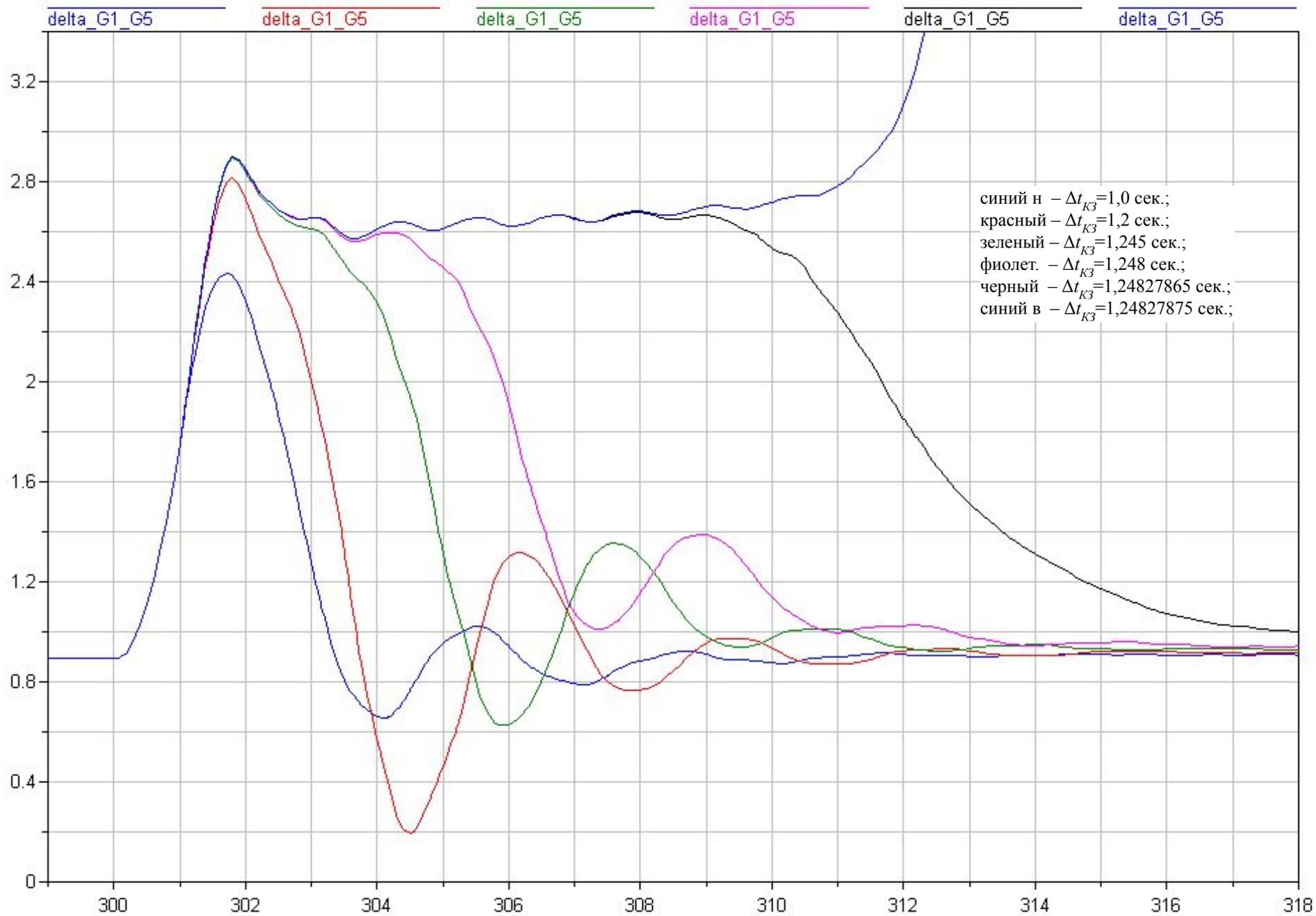
# ВЛИЯНИЕ АВАРИЙНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТУРБИН



# Расчеты динамической устойчивости в реальных ЭЭС

- Extended Equal Area Criteria (EEAC)
  - эквивалентирование реальной модели ЭЭС до простейшей системы «машина-шины»
  - рассмотрение правила площадей
- Аналитических методов исследования *нелинейных* систем а-ля ЭЭС на данный момент *не существует*
- Численное моделирование переходных процессов с учетом выполняемых коммутаций, ограничений и пр.
  - в проектных организациях – программа МУСТАНГ-95
  - кафедра «ЭСиС» – модели ЭЭС на основе объектно-ориентированного языка моделирования динамических систем Modelica (реализованное на основе программы Dymola)

Пр  
тр:



# Спасибо за внимание!!!



Адрес в Интернет:

[www.eps.spbstu.ru](http://www.eps.spbstu.ru)

кафедра «Электрические Системы и Сети»,  
СПбГПУ, Россия