

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ И ЗАЩИТА ОТ НИХ

определение

Перенапряжение – всякое превышение напряжения по отношению к **наибольшему рабочему напряжению $U_{нр}$** $U_{нр} = U_n k_p$

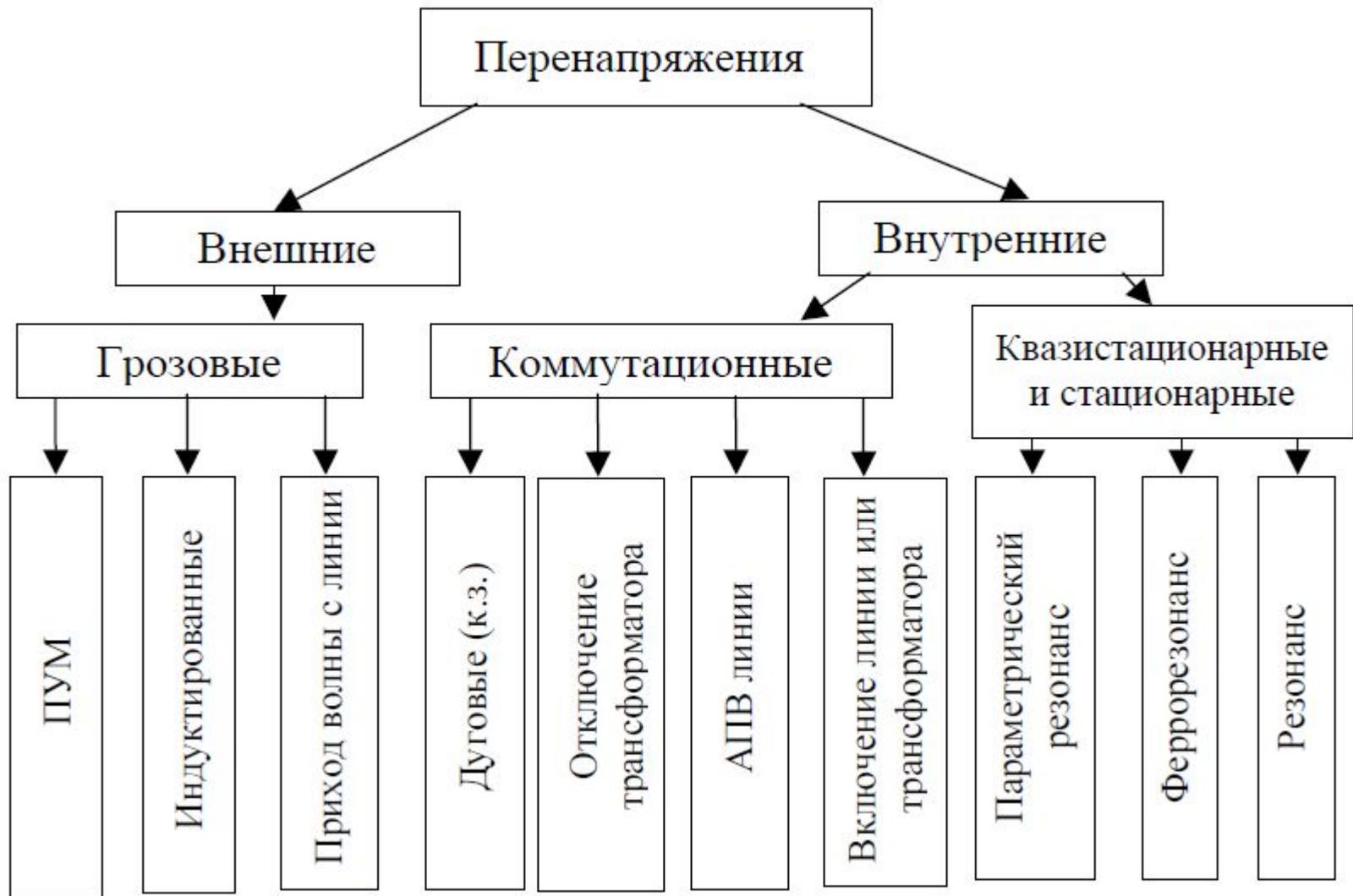
<i>Класс напряжения, кВ</i>	<i>3-20</i>	<i>35-220</i>	<i>330</i>	<i>500-1150</i>
<i>k_p</i>	<i>1.2</i>	<i>1.15</i>	<i>1.1</i>	<i>1.05</i>

определение

$$K = \frac{U_m}{U_{нрт}}$$

Кратность перенапряжения K - отношение амплитуды воздействующего напряжения к амплитуде наибольшего рабочего напряжения

КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ



*) ПУМ - прямой удар молнии

Характеристики перенапряжений:

1) Кратность $K = \frac{U_m}{U_{нрт}}$

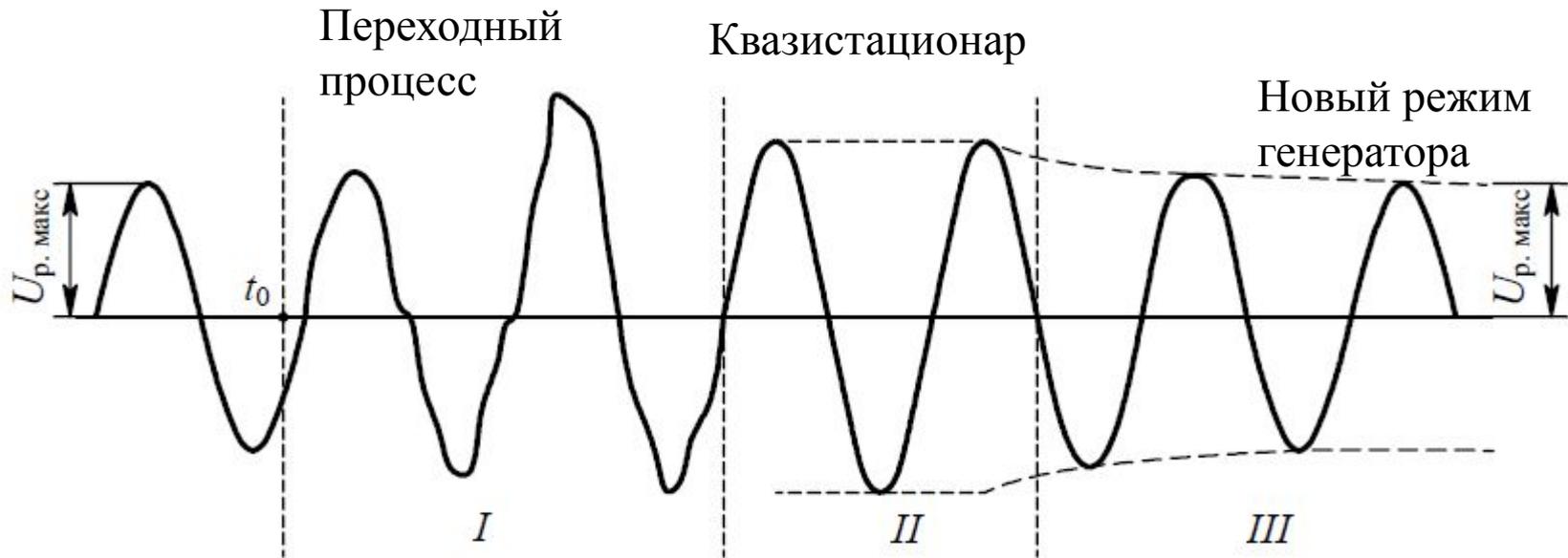
2) Длительность воздействия

3) Форма кривой напряжений (апериодическая, колебательная высокочастотная и т.д.)

4) Широта охвата электрической сети

Внутренние перенапряжения

Причины возникновения: колебания энергии, запасенной в элементах сети (трансформаторы, реакторы, батареи конденсаторов, собственная емкость линий электропередачи и т.п.), вызванные изменениями режима сети.



Вид напряжения сети при появлении внутренних перенапряжений: t_0 — момент коммутации

ВНУТРЕННИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

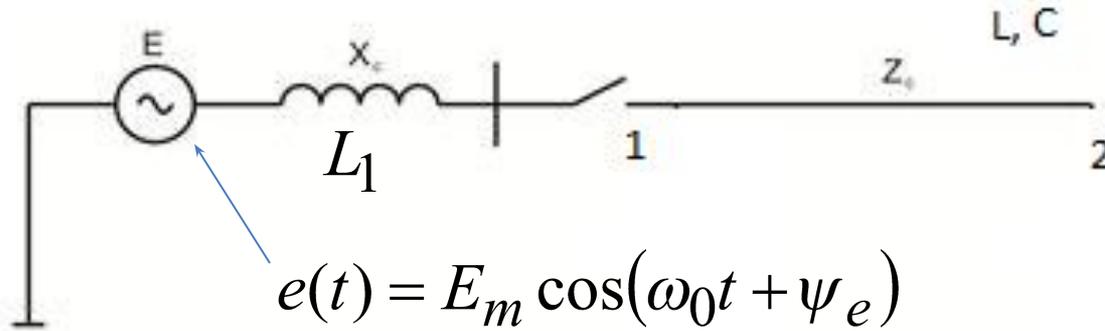
```
graph TD; A[ВНУТРЕННИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ] --> B[Коммутационные]; A --> C[Квазистационарные];
```

Коммутационные

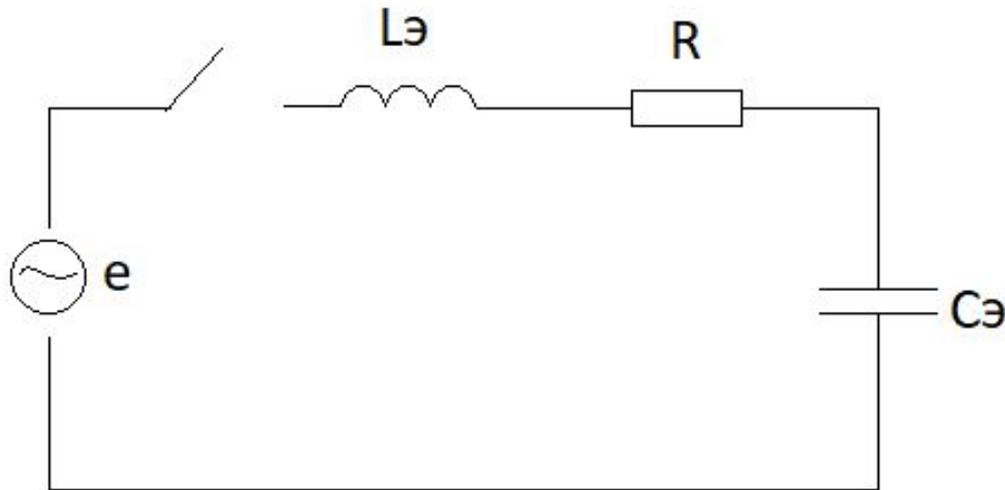
Квазистационарные

КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Включение линии электропередачи (очень простая модель)



Короткая линия: собственная частота колебаний $\omega \gg \omega_0 = 314 \text{ 1/c}$
много больше частоты сети – схема замещения:



$$U_c(t) = E - (E - U_{c0}) \frac{\omega_0}{\omega'} \exp(-\delta t) \cos\left(\omega' t - \arctg \frac{\delta}{\omega'} t\right) \quad \delta = R/2L \quad \omega_0 = 1/\sqrt{L_3 C_3}$$

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

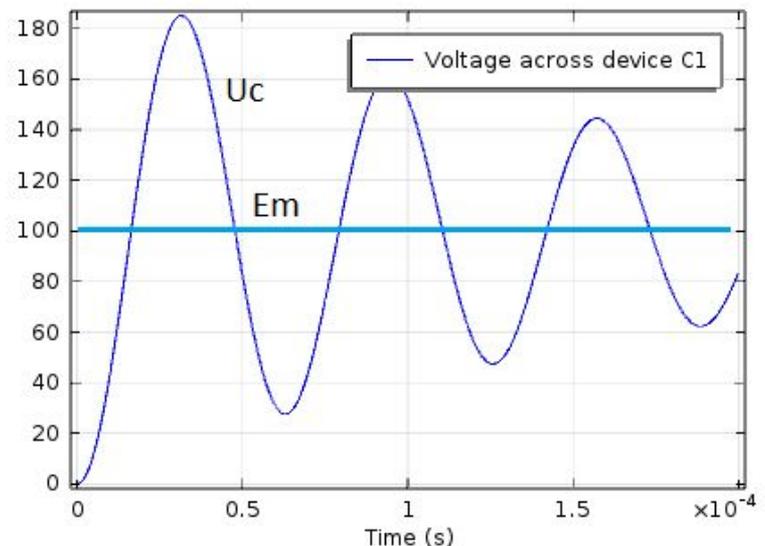
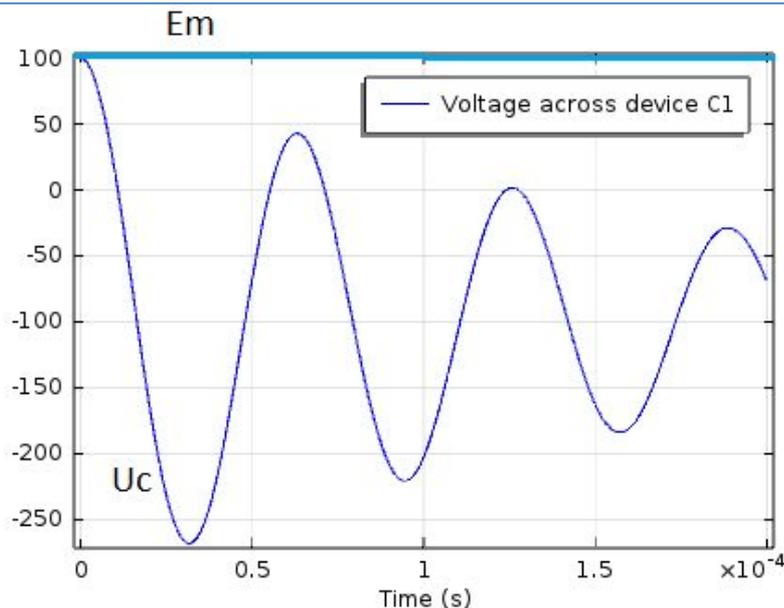
При $\delta=0$ и $\cos() = -1$ $U_{Cm} = 2E - U_{C0}$

Предельная кратность
($U_{c0} = -E_m$)

$$K = \frac{2E_m - (-E_m)}{E_m} = 3$$

Максимально заряженная
линия $K=3$

Незаряженная линия $K=2$



Пример коммутации заряженной линии

Пример коммутации незаряженной линии

Краткая запись для оценки максимального напряжения

$$U_{\max} = U_{\text{нач}} + (U_{\text{уст}} - U_{\text{нач}})K_{\text{уд}}$$

Ударный коэффициент $K_{\text{уд}} = 2-3$

Общий случай (произвольное соотношение между ω и ω_0)

$$K = \chi \cdot V$$

$\chi = U_m / U_{\text{уст } m}$ кратность перенапряжений, создаваемая переходным процессом по отношению к квазистационарному режиму в конце линии $U_{\text{уст } m}$

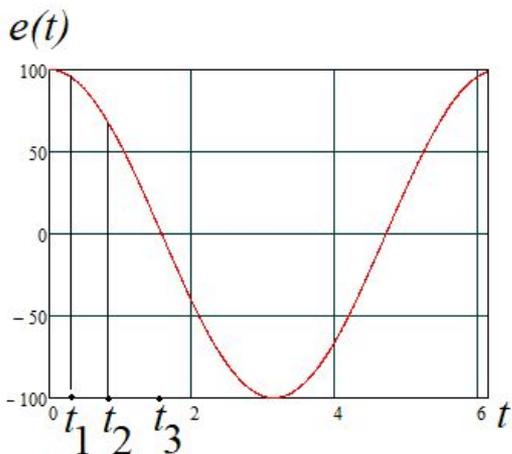
$V = U_{\text{уст } m} / E_m$ - кратность перенапряжений в квазистационарном режиме

$$V = f(\omega / \omega_0)$$

$$\chi = f(\psi_e, L_1, \tau, T, U_{c0})$$

$$V = f(\omega / \omega_0) \quad \chi = f(\psi_e, L_1, \tau, T, U_{c0})$$

$$\tau = l\sqrt{L'C'} \quad T = L_1 / Z_w \quad Z_w = \sqrt{L'/C'}$$

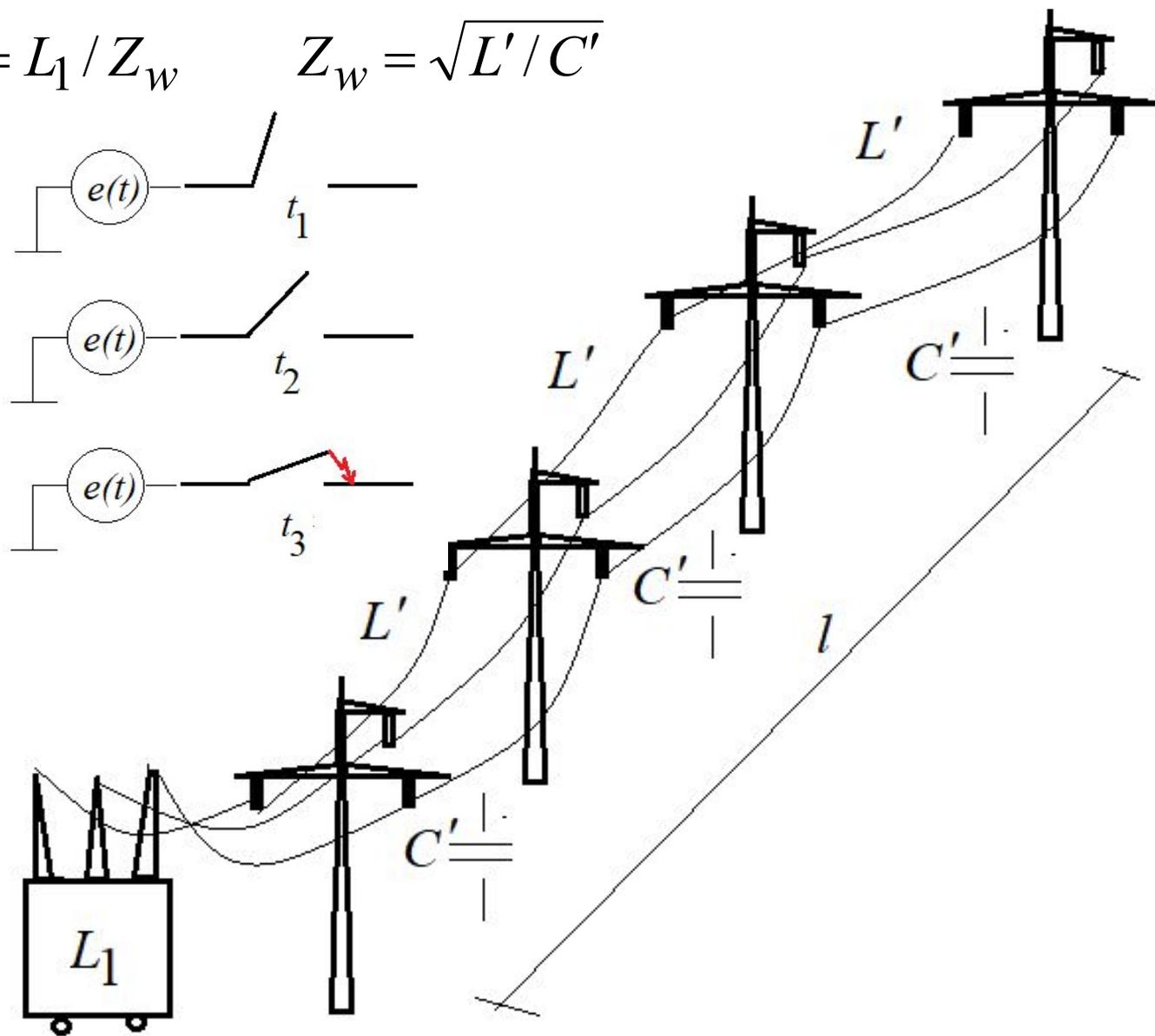


$$\psi_e = \omega_0 t_3$$

В условиях
эксплуатации
значения параметров

$$\psi_e, L_1, E_m$$

определены со
статистической
погрешностью, т.е. это
- случайные величины



Результаты статистических исследований

Вероятность значения коэффициента коммутационных перенапряжений χ

$$P(\chi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\rho}} \int_{\chi}^{\infty} e^{-\frac{(y-\bar{\chi})^2}{2\sigma^2}} dy$$

$\sigma=0.183$ - стандартное отклонение

$\bar{\chi} = 1.64$ - среднее значение

Вынужденное напряжение

На питающем
конце линии
 $\bar{V} = 1.04$

На разомкнутом
конце линии
 $\bar{V} = 1.4 - 1.15$

Мероприятия по снижению коммутационных перенапряжений

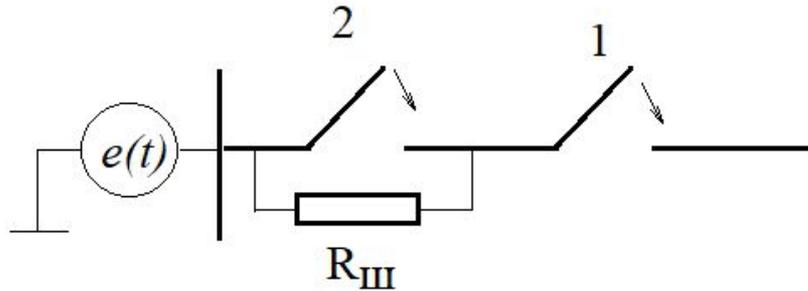
Меры по ограничению вынужденной составляющей V :

- Деление дальних линий на участки 250-300 км с подключением к промежуточным точкам устройств поддержания нормального уровня напряжения
- применение трансформаторов с регулируемым коэффициентом трансформации, шунтирующих реакторов и синхронных компенсаторов
- при включении с двух сторон, первой коммутируется более мощная подстанция

Меры ослабления переходной составляющей

- шунтирующие сопротивления выключателей
- выбор оптимального момента коммутации
- применение аппаратов ограничения перенапряжений (ОПН и разрядники)

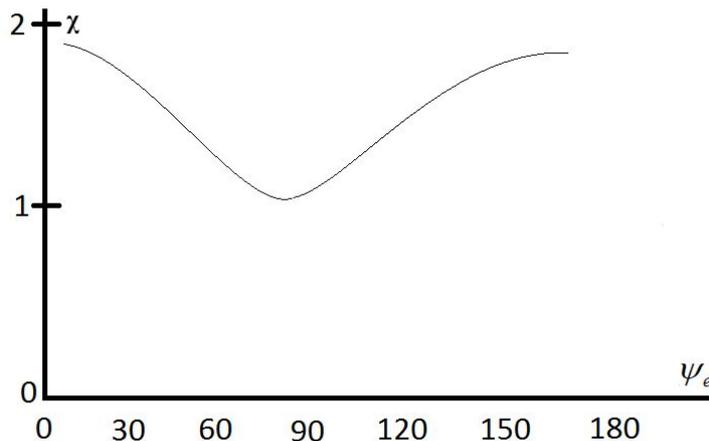
Принцип работы выключателя с шунтирующими сопротивлениями



Снижает кратность до
 $\chi=1.6$

1. Включение выключателя 1 к цепи подключается $R_{ш}= 600 - 1200 \text{ Ом}$,для демпфирования переходного процесса
2. Включение выключателя 2 с задержкой 10-20 мс

«Синхронная коммутация»



Запуск выключателя по команде электронной системы мониторинга напряжения с разрешением 1 мс на питающем конце с упреждением на время работы привода выключателя
Достигается средняя кратность $\chi=1.4$

Ограничители перенапряжений нелинейные

Обеспечивают $\chi=1.6$, однако должны выдерживать квазистационарные воздействия

Перенапряжения при отключении ненагруженной линии

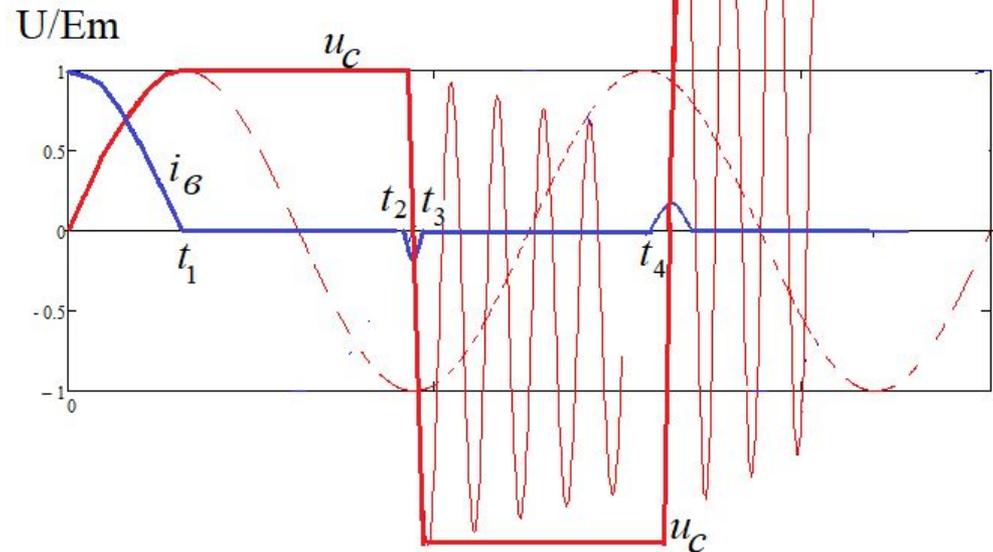
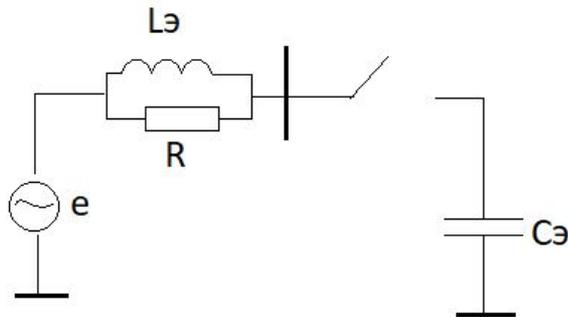
$$U_c(t) = E_m - (E_m - U_{c0}) \frac{\omega_0}{\omega'} \exp(-\delta t) \cos\left(\omega' t - \arctg \frac{\delta}{\omega'} t\right)$$

$$U_{c \max} = U_{нач} + (U_{уст} - U_{нач}) K_{y\delta}, \quad K_{y\delta} \approx 1.8$$

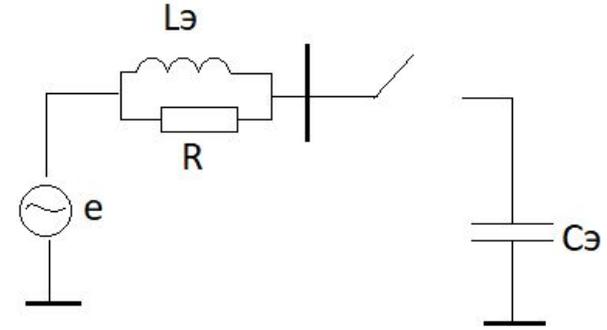
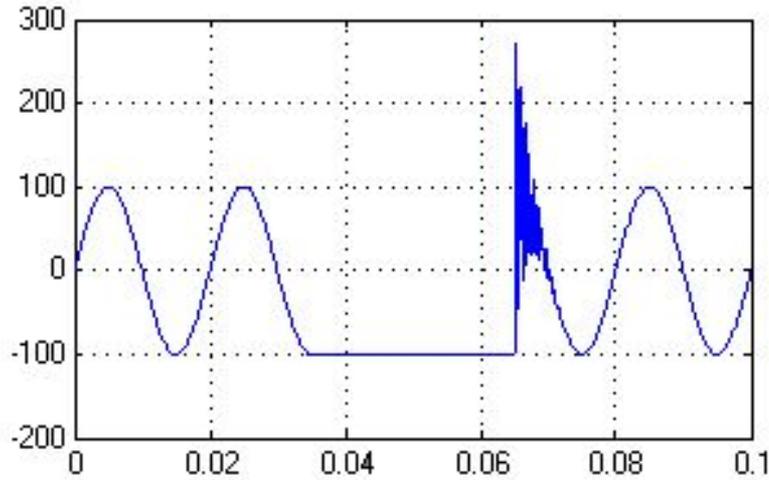
$$t = t_3 \quad U_{c \max} = E_m + (-E_m - E_m) * 1.8 = -2.6E_m$$

$$t = t_4 \quad U_{c \max} = -2.6E_m + (E_m + 2.6E_m) * 1.8 = 3.3E_m$$

Перенапряжения при повторных зажиганиях дуги

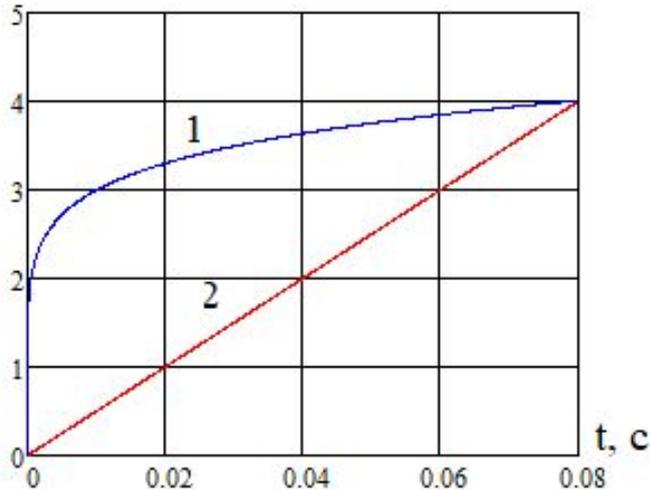


Пример компьютерной симуляции повторного зажигания дуги



Для предотвращения повторных зажиганияй дуги следует использовать современные элегазовые выключатели

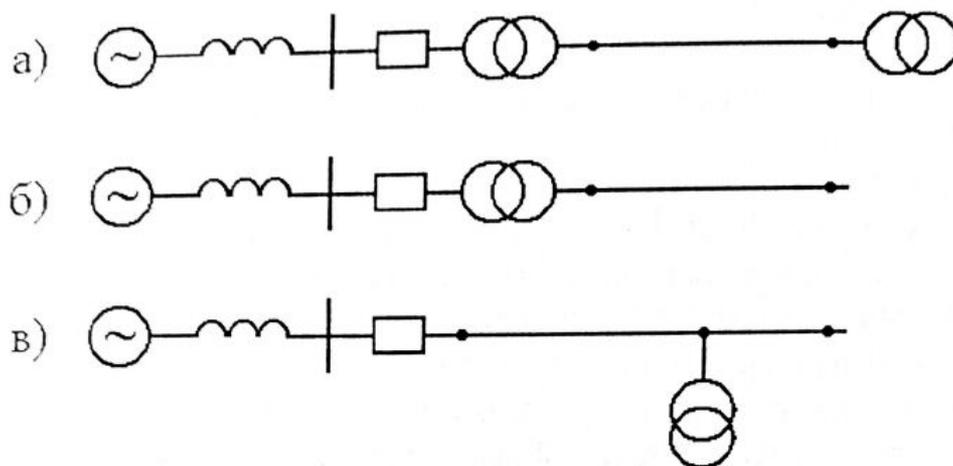
$U_{пр} / E_m$



Изменение во времени электрической прочности межконтактного промежутка:

- 1 – воздушный выключатель
- 2 – масляный выключатель

Особенности перенапряжений при коммутации линий в блоке с трансформатором



✦ При наличии остаточного заряда линии магнитопровод входит в режим насыщения- растут потери в цепи снижаются токи вынужденной и переходной составляющей

— Насыщение магнитопровода ведет к росту тока шунта намагничивания, резкого уменьшения индуктивности – создание опасных условий для резонанса – феррорезонанс. Явление вероятно при длине линии свыше 200-300 км

Автоматическое повторное включение линии электропередачи

В среднем при коммутации АПВ кратность перенапряжений выше, чем при плановых включениях, вследствие неопределенности остаточного заряда линии.

Физически процессы аналогичны коммутациям при повторных зажиганиях дуги.

Наиболее опасны случаи противоположных знаков остаточного напряжения линии U_0 и напряжения источника питания

Тип выключателя	Воздушный		Масляный	
Длительность бестоковой паузы АПВ,с	0.35	1	0.35	1
\bar{U}_0 / E_m	0.63	0.56	0.72	0.66
σU_0	0.22	0.2	0.32	0.29
$\bar{\chi}$	1.75	1.64	-	2
$\sigma \chi$	1.31	0.25	-	0.34
K_τ	3.12	2.77	-	3.52

$\tau=20$ лет

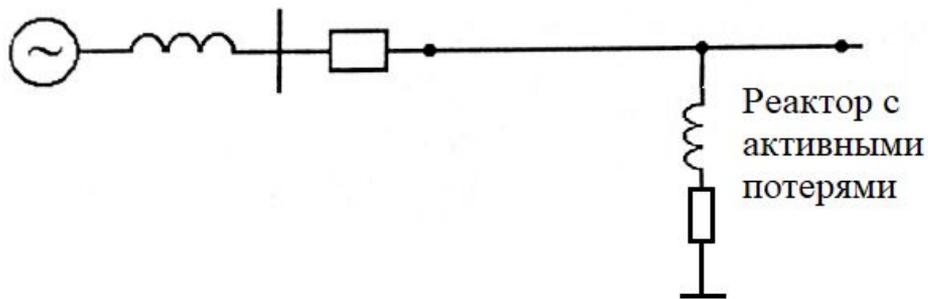
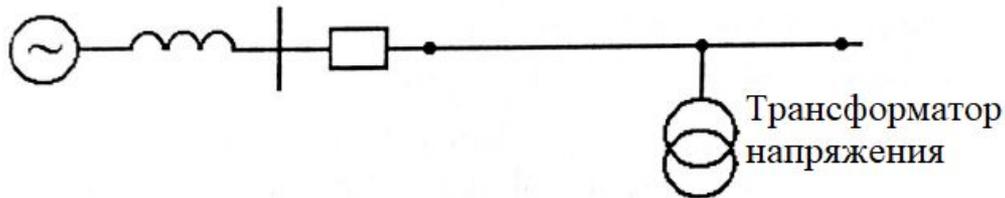
Автоматическое повторное включение линии электропередачи

Наиболее опасны перенапряжения при АПВ на устойчивое короткое замыкание, кратность растет вследствие роста амплитуды установившегося напряжения здоровых фаз вследствие несимметрии.

Системные мероприятия по ограничению перенапряжений при АПВ

Подключение элементов стекания заряда

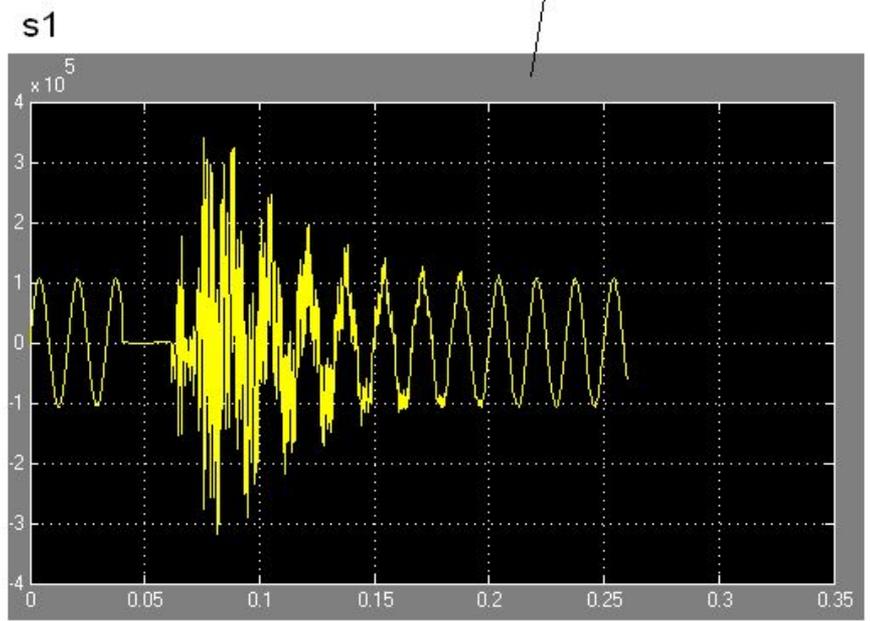
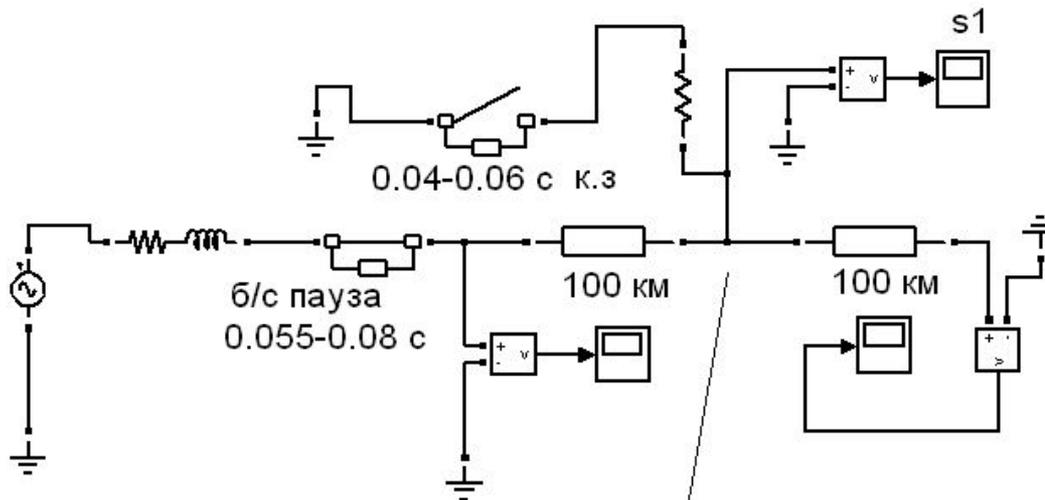
Применение ОАПВ вместо АПВ



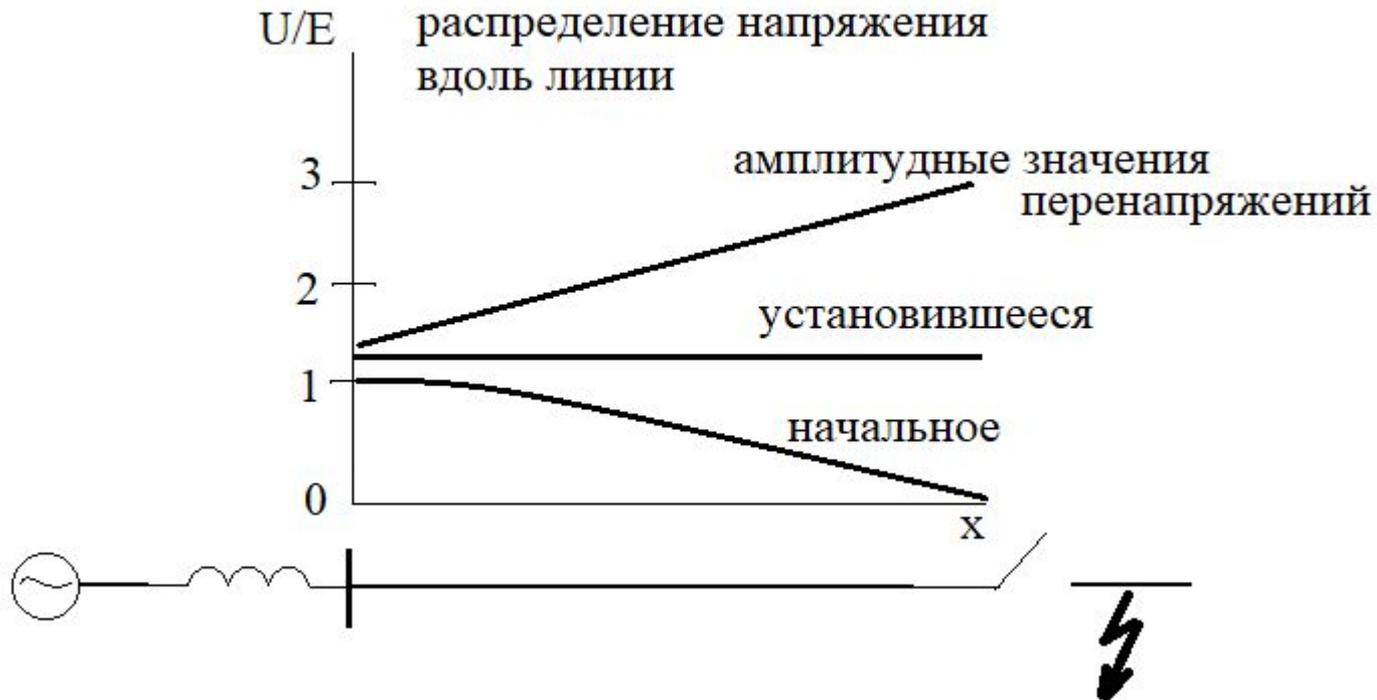
ТН в сетях 500 кВ полностью снимаю проблему перенапряжений при АПВ приравнивая их к плановым включениям

Пример компьютерной симуляции

Перенапряжения при АПВ. КЗ в середине 200 км линии электропередачи



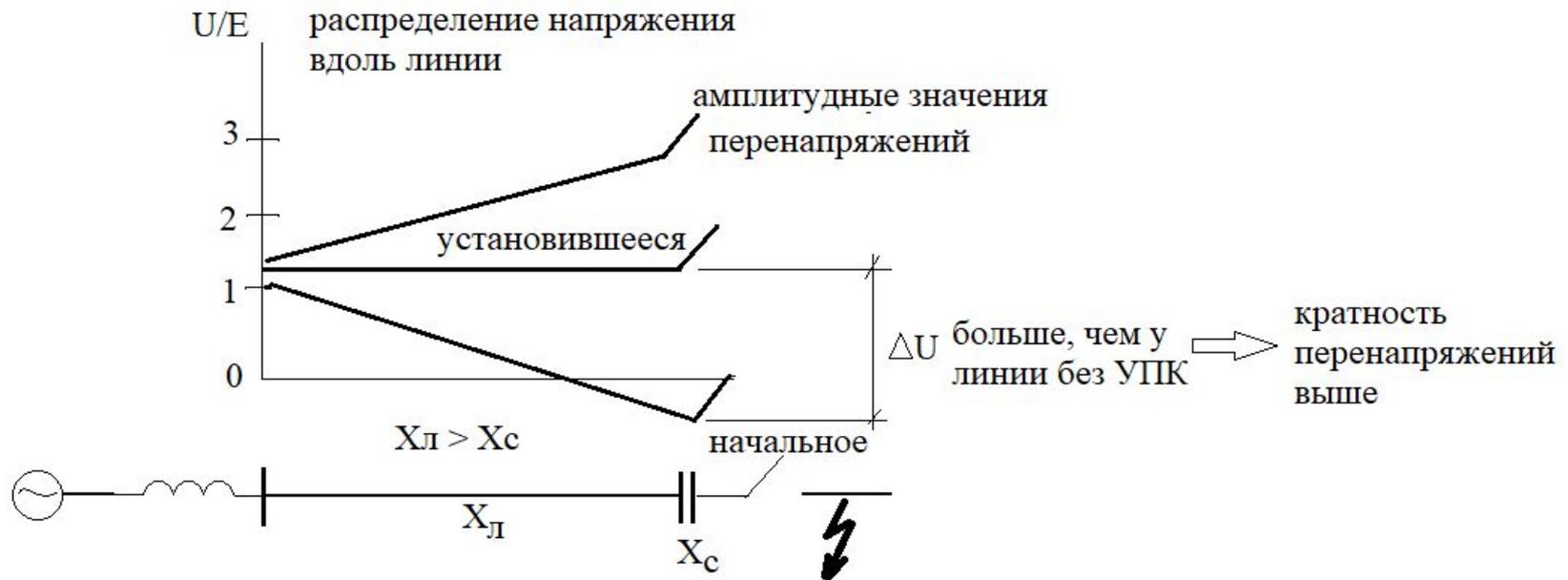
Перенапряжения при отключении короткого замыкания



$$U_{c \max} = U_{нач} + (U_{уст} - U_{нач})K_{уд}, \quad K_{уд} \approx 2$$

Кратность $K < 2.6$

Отключение короткого замыкания линии с устройством продольной компенсации (УПК)



Системные мероприятия – автоматическое шунтирование батареи конденсаторов