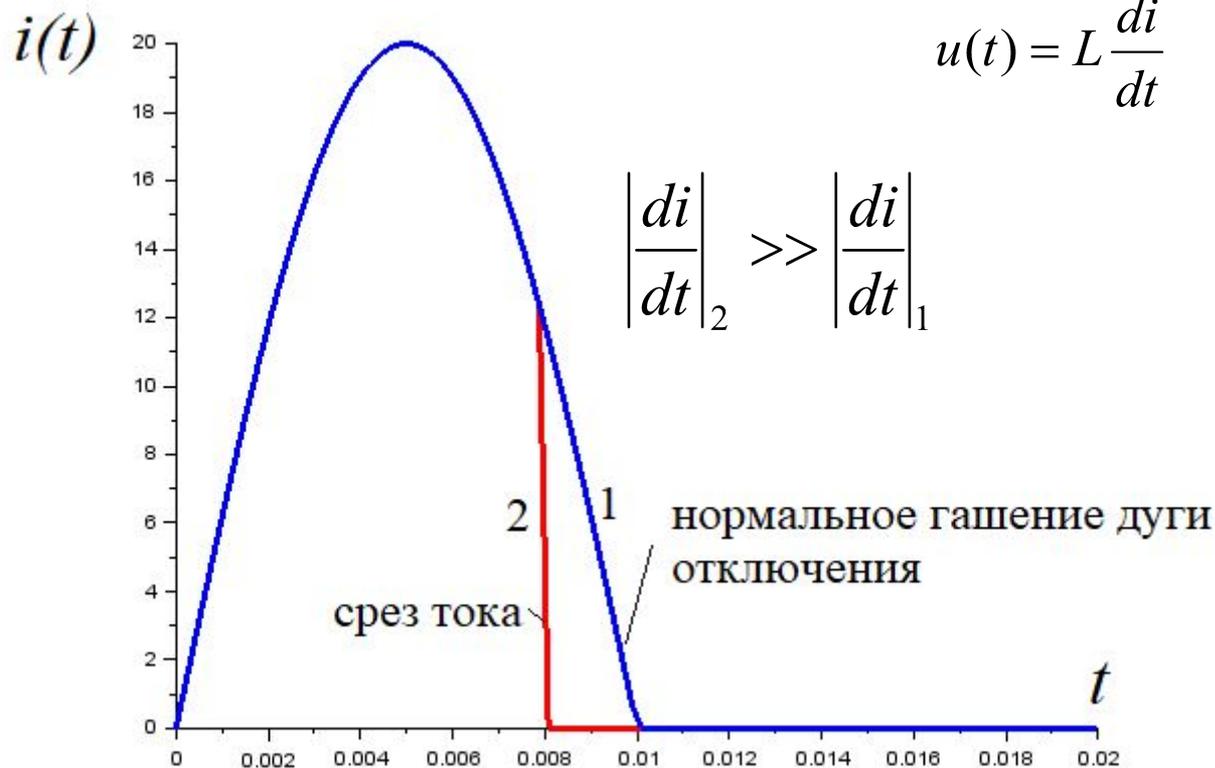


# ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ОТКЛЮЧЕНИИ МАЛЫХ ИНДУКТИВНЫХ ТОКОВ

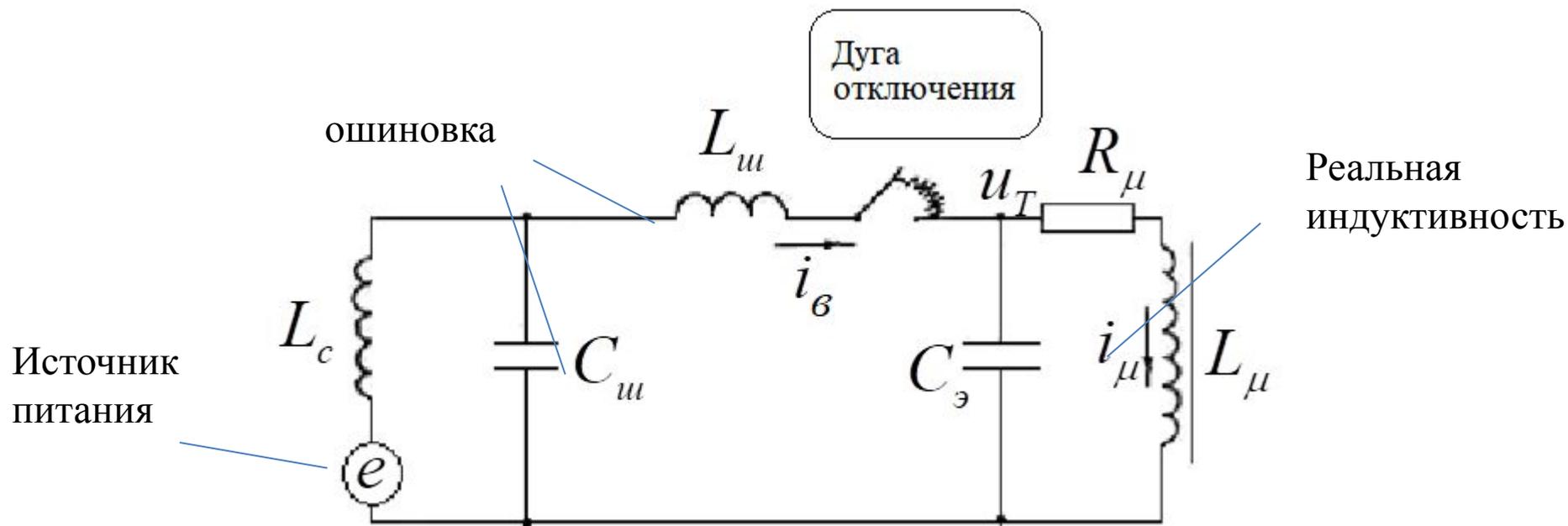
## определение

Малые индуктивные токи – токи величиной 10-20 А, протекающие в индуктивных элементах – ненагруженные трансформаторы, реакторы, двигатели

Напряжение на индуктивном элементе



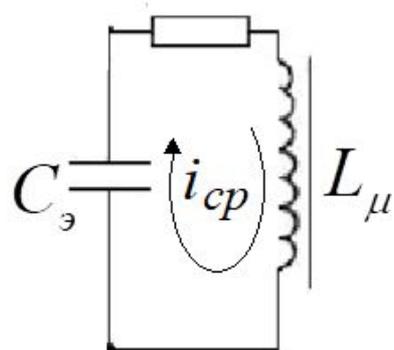
# Схема замещения для расчета перенапряжений при отключении индуктивности



После гашения дуги

Без учета потерь в стали

С учетом потерь в стали



$$U_{\max} = \frac{I_{\mu \max}}{\sqrt{C_{\varepsilon} / L_{\mu}}}$$

$$I_{\mu \max} = \frac{\sqrt{2} U_{\text{ном}} K_{\alpha}}{\sqrt{3} \omega L_{\mu}}$$

$$U_{\max} \approx \frac{1.05 I_{\mu \max}}{1 / R_{\mu} + \sqrt{C_{\varepsilon} / L_{\mu}}}$$

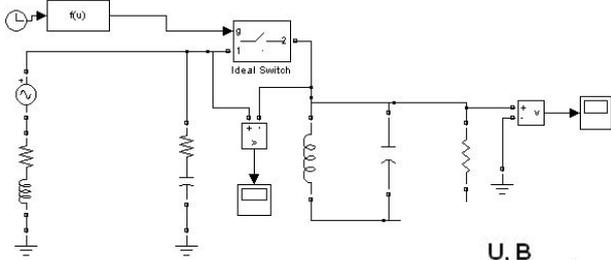
$K_{\alpha}$  – коэффициент формы кривой  $\Psi(i)$

$$R_{\mu} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{P_{\text{xx}}}$$

$$L_{\mu} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{\omega i_{\text{xx}}^* S_{\text{ном}}}$$

Магнитопровод из горячекатанной стали менее склонен к насыщению и имеет относительно меньшие значения  $R_{\mu}$ ,  $L_{\mu}$ , что является причиной более высоких перенапряжений

# Пример компьютерной симуляции



$$L_C = 5.8 \text{ мГн}$$

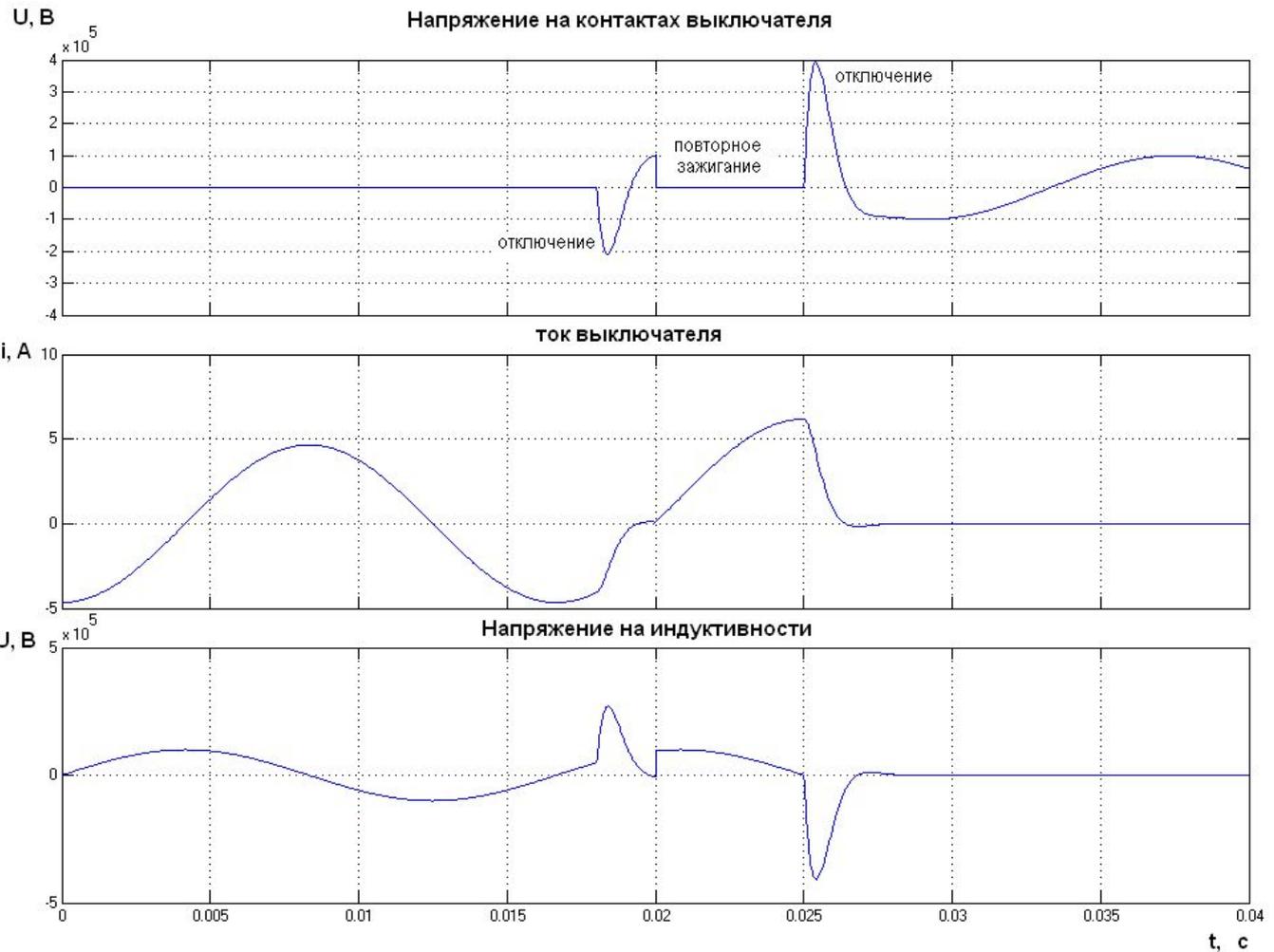
$$R_C = 0.63 \text{ Ом}$$

$$L_\mu = 57 \text{ Гн}$$

$$C_{ш} = 0.25 \text{ мкФ}$$

$$R_\mu = 100 \text{ кОм}$$

$$C_3 = 2.5 \text{ нФ}$$



Особо опасные случаи:

- Отключение из неустановившегося режима, когда ток среза может быть существенно больше стационарного значения

- Отключение реакторов (сердечник имеет воздушный зазор – отсутствует насыщение – большое значение  $L_p$  )

$$U_{\max} = i_{\text{среза}} \sqrt{\frac{L_p}{C_{\text{э}}}} \quad L_p = \frac{U_{\text{ном}}^2}{\omega S_{\text{ном}}} \quad S_{\text{ном}} \text{ - трехфазная мощность реактора}$$

Системные методы снижения перенапряжений: шунтирование реактора емкостью (растет  $C_{\text{э}}$ ) или резистором равным по порядку величины волновому сопротивлению контура  $Z_p = \sqrt{\frac{L_p}{C_{\text{э}}}}$

**Максимальная кратность перенапряжений при отключении ненагруженных трансформаторов  $k_{нтр}$  и шунтирующих реакторов  $k_{ни}$**

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	6-10	110	150	220	330	500
$k_{нтр}$	4,3...6,2	4,1...4,5	2,9...3,5	1,9...2,1	1,9..	1,8...2,1
$k_{ни}$	-	3,1	-	-	-	2,2...2,35

## Перенапряжения при коммутациях высоковольтных электродвигателей

Перенапряжения при отключениях электродвигателей имеют такую же природу, как и при отключениях трансформаторов или реакторов. Эти перенапряжения вызваны обрывом тока в выключателе и обусловлены свободными колебаниями, возникающими в процессе обмена энергией между индуктивностью отключаемого электродвигателя и емкостью питающего кабеля.

специальные измерения, максимальная кратность перенапряжений составляет 3.5 - 7.0 – при заторможенном роторе и 3.0 - 3.5 – при двойных замыканиях на землю

Данные специальных измерений в сетях 6-10 кВ

Максимальные кратности перенапряжений при коммутации двигателей

*$k_{пmax}=4,2$  -при нормальных оперативных включениях электродвигателей*

*$k_{пmax} = 5,2$  - при включении двигателя в сеть с однофазным замыканием на землю*

*$k_{пmax} = 7,2$  - при включении в цикле АПВ*

# Дуговые перенапряжения в сетях 3-35 кВ

Причина данного вида перенапряжений- однофазные замыкания на землю, сопровождающиеся неустойчивым горением дуги

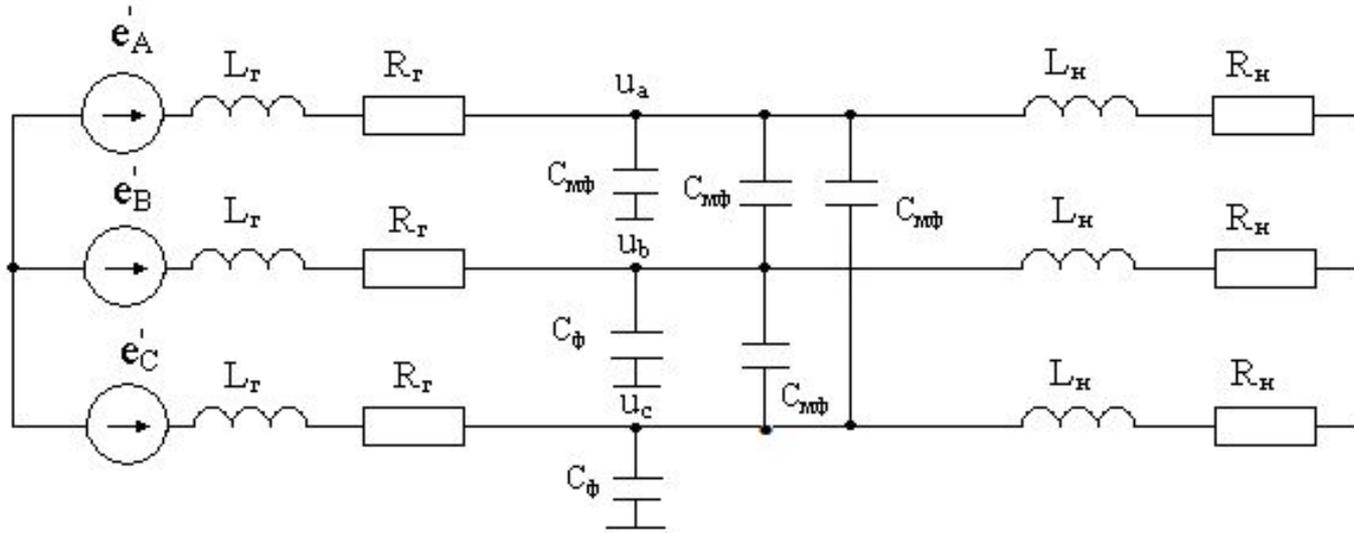
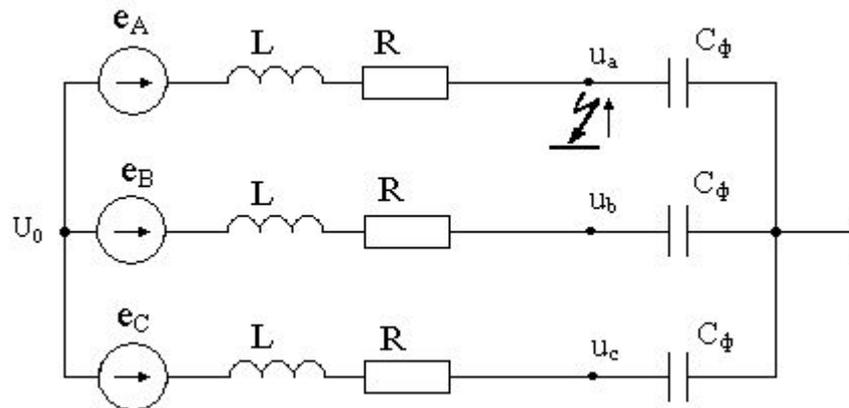


Схема сети с изолированной нейтралью



Эквивалентная схема для кабельной сети

# Зажигание дуги

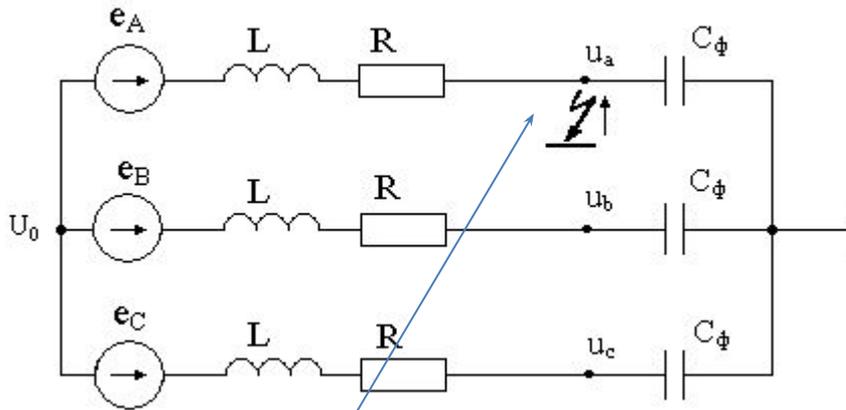
Собственная частота колебаний в неповрежденных фазах

$$\omega' \approx \frac{1}{\sqrt{L_{\phi} C_{\phi}}} \gg \omega_0 = 314 \text{ c}^{-1}$$

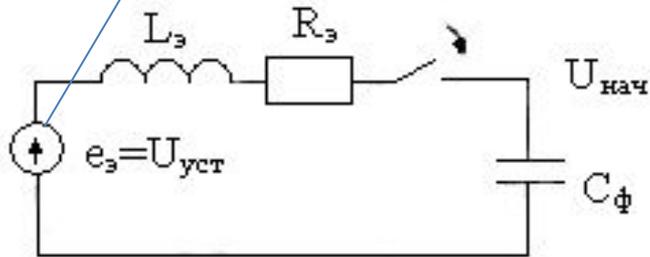
$$U_{\text{max}} = U_{\text{уст}} - (U_{\text{уст}} - U_{\text{нач}}) \chi = U_{\text{уст}} + \Delta U \cdot \chi$$

$$\chi = e^{-\frac{\pi \delta}{\omega'}}$$

Сеть	$\chi$
воздушная	0.3 - 0.8
кабельная	0.1 - 0.8

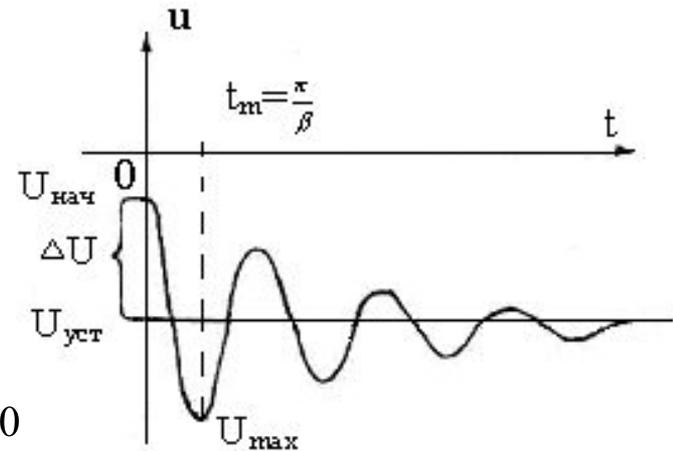


Расчетная модель с противо эдс



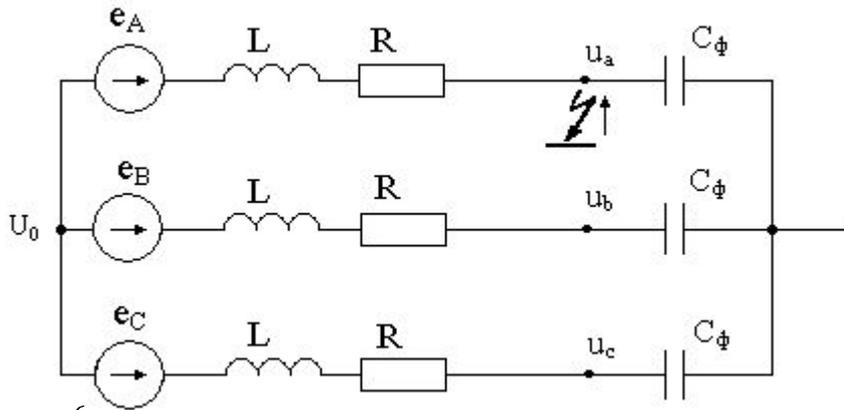
Предельный случай при первом зажигании  $U_0 = 0$

$$U_{\text{уст}} = -U_m, U_{\text{нач}} = 0 \quad \Delta U = U_m, \chi = 1, U_{\text{max}} = 2U_m$$



# Погасание дуги

После погасания дуги  $U_0 \neq 0$



$$U_{нач} = U_0 + u_{\phi}(t)$$

Скачок установившегося напряжений  
нейтрали и фаз после погасания дуги

$$\Delta U_{a\ устм} = \Delta U_{b\ устм} = \Delta U_{c\ устм} = \Delta U_{0\ устм}$$

Порождает переходный процесс

$$U_0 = \begin{cases} 0 & \text{— до первого зажигания дуги} \\ -e_a & \text{— в процессе горения дуги} \\ \frac{u_B(t_{зави})C_B + u_C(t_{зави})C_C}{C_B + C_B + C_C} & \text{— сразу после гашения дуги} \end{cases}$$

$$u_a(t) = e_a(t) + U_{0\ устм} - \Delta U_{0\ устм} e^{-\alpha_a t} \cos \omega'_a t$$

$$u_b(t) = e_b(t) + U_{0\ устм} - \Delta U_{0\ устм} e^{-\alpha_b t} \cos \omega'_b t$$

$$u_c(t) = e_c(t) + U_{0\ устм} - \Delta U_{0\ устм} e^{-\alpha_c t} \cos \omega'_c t$$

$$U_{B\ max} = e_b + U_{0\ устм} + \Delta U_{0\ устм} \cdot \chi$$

$$U_{C\ max} = e_C + U_{0\ устм} + \Delta U_{0\ устм} \cdot \chi$$

# Модель Н.Н.Белякова

Разработана по результатам обработки 10 000 осциллограмм

Результаты наблюдений:

- 1) Дуга гаснет при каждом переходе суммарного (установившаяся и переходная составляющие) через 0
- 2) Возникающий при этом пик гашения вызывает зажигание дуги по прошествии половины периода промышленной частоты (0.01 с)
- 3) При пике гашения (для сетей 3-10 кВ) ниже  $0.4 U_{ном}$  дуга не возобновляется

$$U_{n\text{гаш}} = e_a(t_{\text{гаш}}) + U_{0\text{уст}} + \Delta U_{\text{уст}} \rightarrow \Delta U_{0\text{уст}} = U_{0\text{уст}} - (-e_a) = U_{0\text{уст}} + e_a \rightarrow U_{n\text{гаш}} = 2(U_{0\text{уст}} + e_a) \rightarrow$$

$$U_{0\text{уст}} = 0.5 U_{n\text{гаш}} - e_a(t_{\text{гаш}}) \rightarrow \text{При } U_{n\text{гаш}} \leq 0.4 U_n \quad |U_{0\text{уст}}| \leq 1.2 U_{ном}$$

Наибольшее возможное смещение нейтрали

$$U_{B\text{max}} = e_b + U_{0\text{уст}} + \Delta U_{0\text{уст}} \cdot \chi = 3.8 U_n$$

При учете потерь и междофазных емкостей максимальная кратность перенапряжений **K= 3.2 - 3.5**

**Согласуется с экспериментом !**

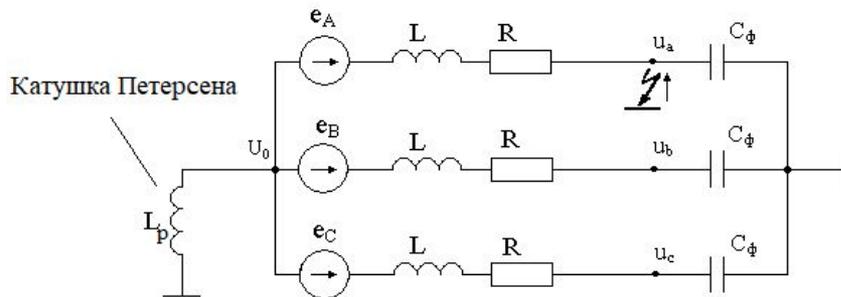
## Системные методы борьбы с дуговыми перенапряжениями.

### Дугогасящая катушка (Петерсен)

Настраивается в резонанс с емкостью сети

$$L_p = \frac{1}{3\omega C_\phi}$$

Замедляет рост напряжения на дуговом промежутке и существенно снижает вероятность повторных зажиганий дуги. Кратность перенапряжений соответствует единичному зажиганию дуги



# Статистические характеристики коммутационных перенапряжений

Вероятность появления кратности перенапряжений превышающих заданное значение  $K$  за время наблюдения  $t$  аппроксимируется выражением

$$P(K) = a(1 - \exp(-\exp(-b(K - c))))$$

При больших кратностях  $P(K) = a \exp(-b(K - c))$

Число перенапряжений в год  $N_K$ , имеющих кратность  $K$   $N_K = N_{\Pi} \times P(K)$

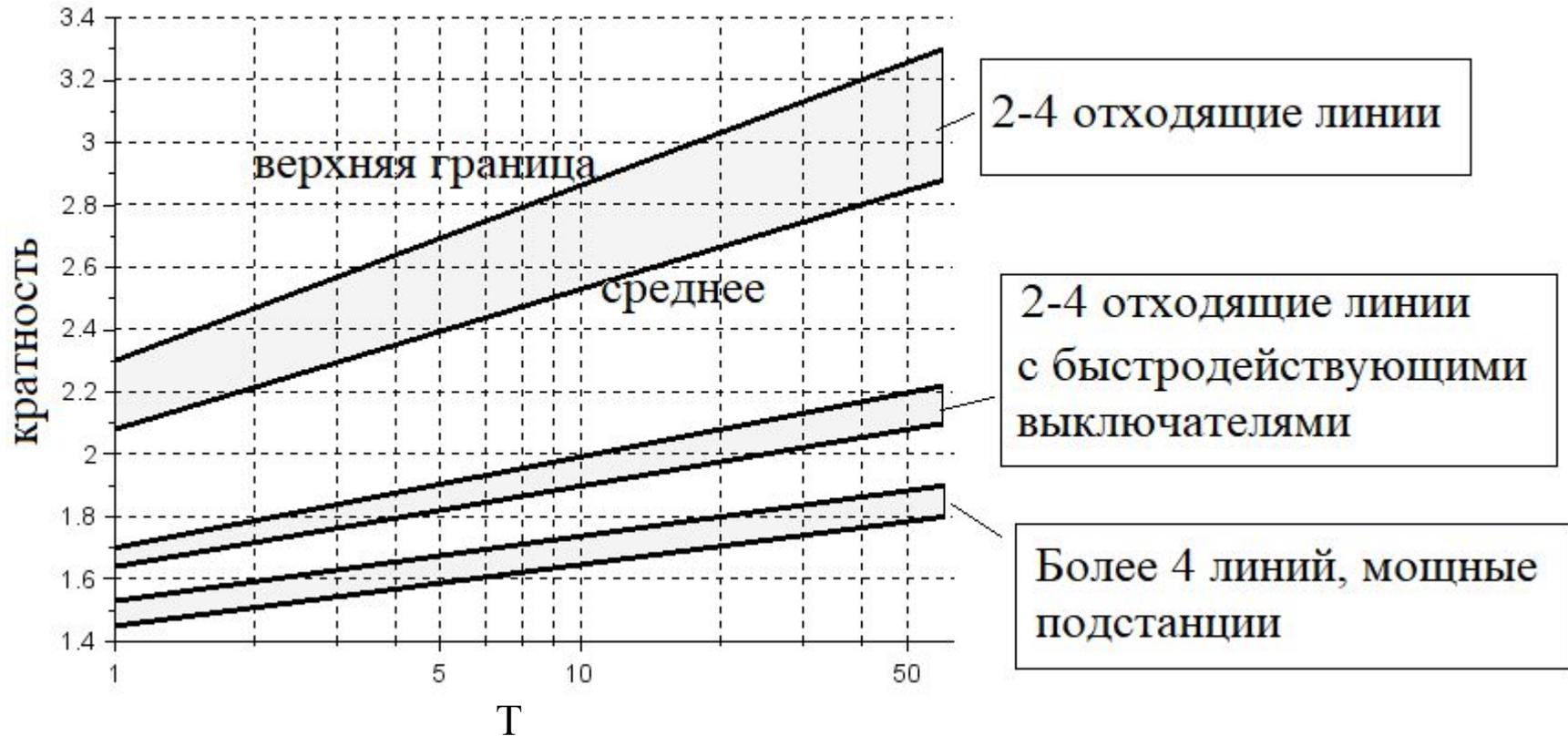
$N_{\Pi}$  - число перенапряжений в год

Число перенапряжений с кратностью более  $K$  за  $T$  лет  $N_K = aN_{\Pi}T \exp(-b(K - c))$

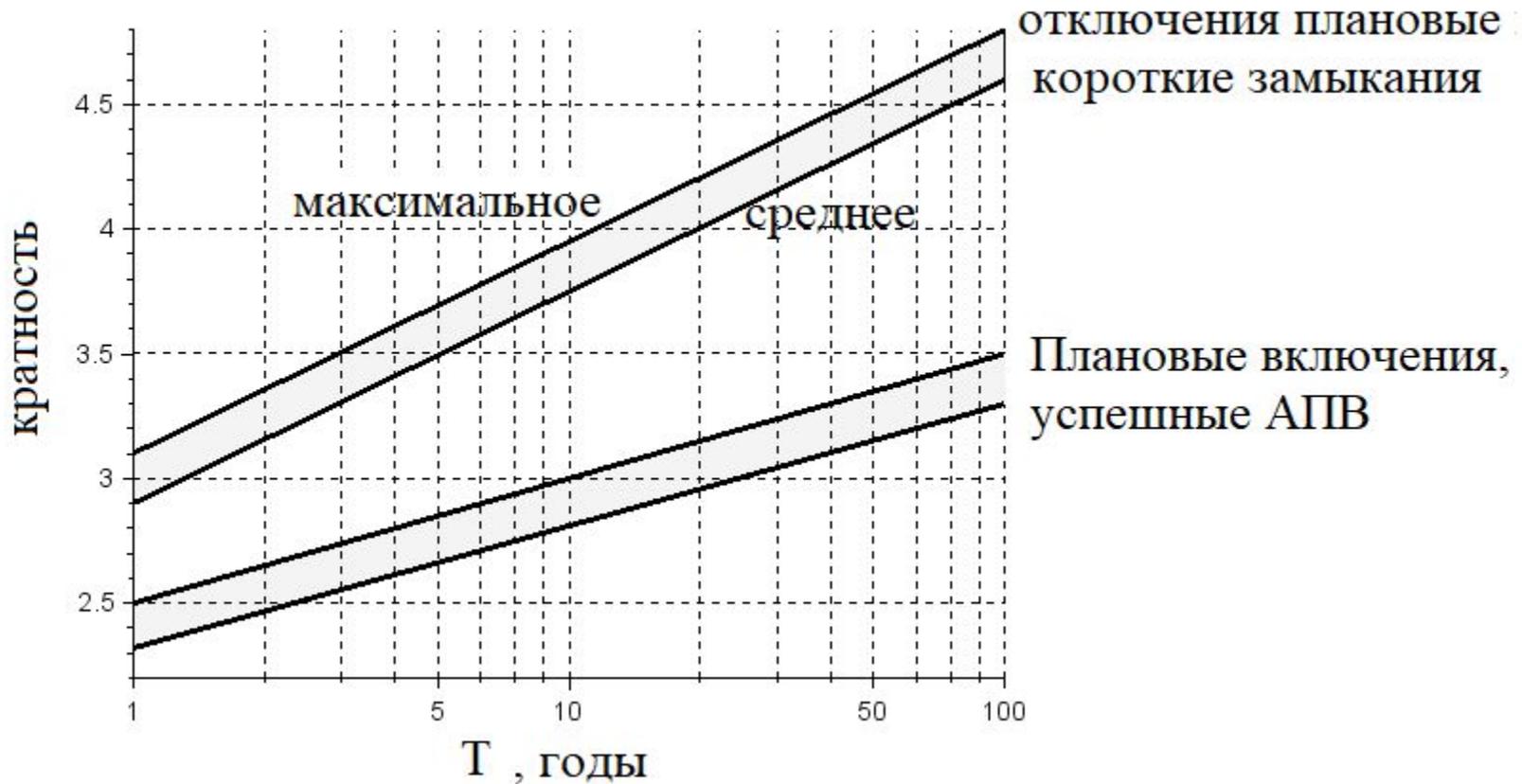
Для кратности, превышаемой 1 раз за  $t$  лет имеем  $1 = aN_{\Pi}T \exp(-b(K - c)) \rightarrow$

Максимальная ожидаемая кратности за  $t$  лет

$$K_{\max t} = c + \frac{1}{b} \ln(aN_{\Pi}T)$$



Кратности перенапряжений на шинах подстанций 110-500 кВ  
превышаемые в среднем 1 раз за Т лет



Кратности перенапряжений, превышаемые в среднем 1 раз за T лет на разомкнутом конце линий 500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и с выключателями с повторными зажиганиями дуги