1. Режимы заземления нейтрали

1.1. Общая характеристика вопроса

Страна	*U*, кВ	Способ заземления нейтрали			
		Изолир.	ДГР	Резистор	Глухое
Россия	6-35	+	+	+	
Австралия	11-12			+	+
Канада	4-25			+	+
США	4-25			+	+
Испания	10-30			+	+
Италия	10-20	+			
Португалия	10-30			+	
Франция	20-24			+	
Япония	6,6	+		+	
Германия	10-20		+		
Австрия	10-30		+		
Бельгия	6-17			+	
Великобритания	11			+	+
Швейцария	10-20		+		
Финляндия	20	+	+		

Режимы заземления

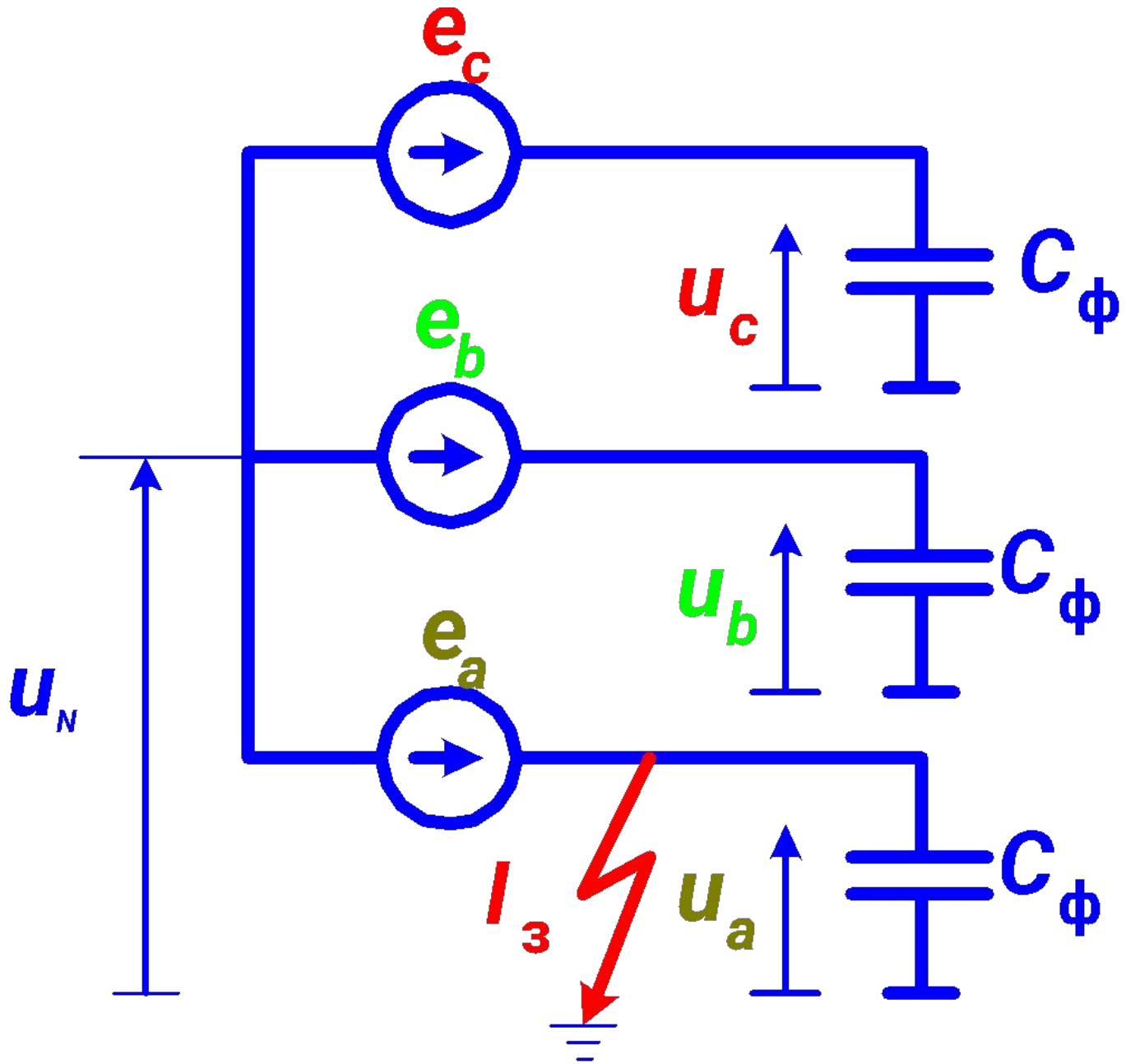
Неэффективное (до 35 кВ)

- Изоли-рован-ная
- Через ДГК
- Через резистор (высокоомный и низкоомный)

Эффективное (выше 110 кВ)

- Глухое заземление
- Через низко-омный резис-тор

1.2. Сеть с изолированной нейтралью



Напряжение на нейтрали в нормальном режиме

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_a y_a + \dot{E}_b y_b + \dot{E}_c y_c}{y_a + y_b + y_c},$$

где

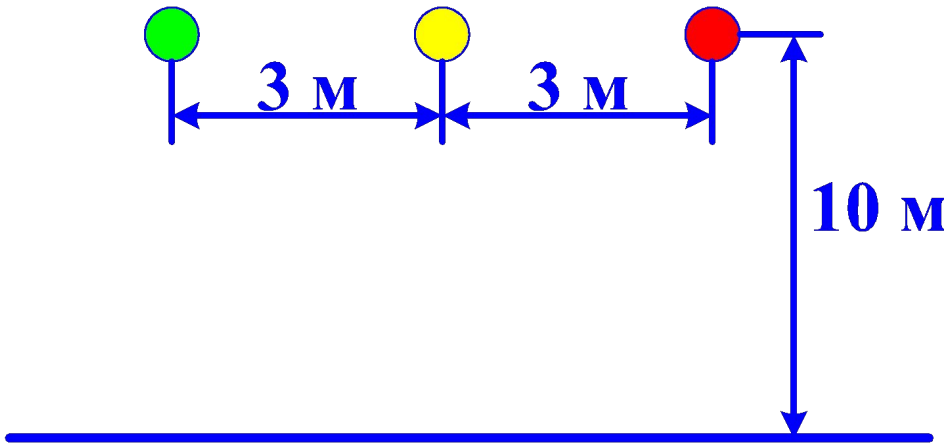
$$y_a = \omega C_{\text{ф}a}, \; y_b = \omega C_{\text{ф}b}, \; y_c = \omega C_{\text{ф}c}$$

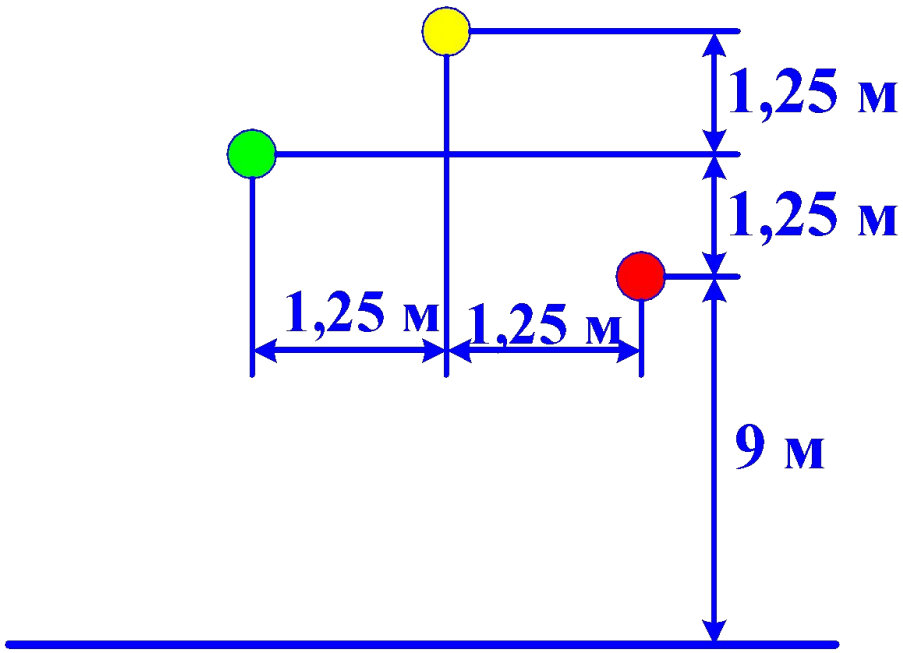
$\dot{U}_N = 0$ **при следующих условиях:**

1) $y_a = y_b = y_c;$

2) $\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = 0.$

Напряжение несимметрии при реальном расположении проводов





$C_a = 4{,}3$ нФ/км;

$C_b = 4{,}8$ нФ/км;

$C_c = 4{,}8$ нФ/км;

$\frac{U_N}{E} = 0{,}0042 \quad (0{,}42\%)$

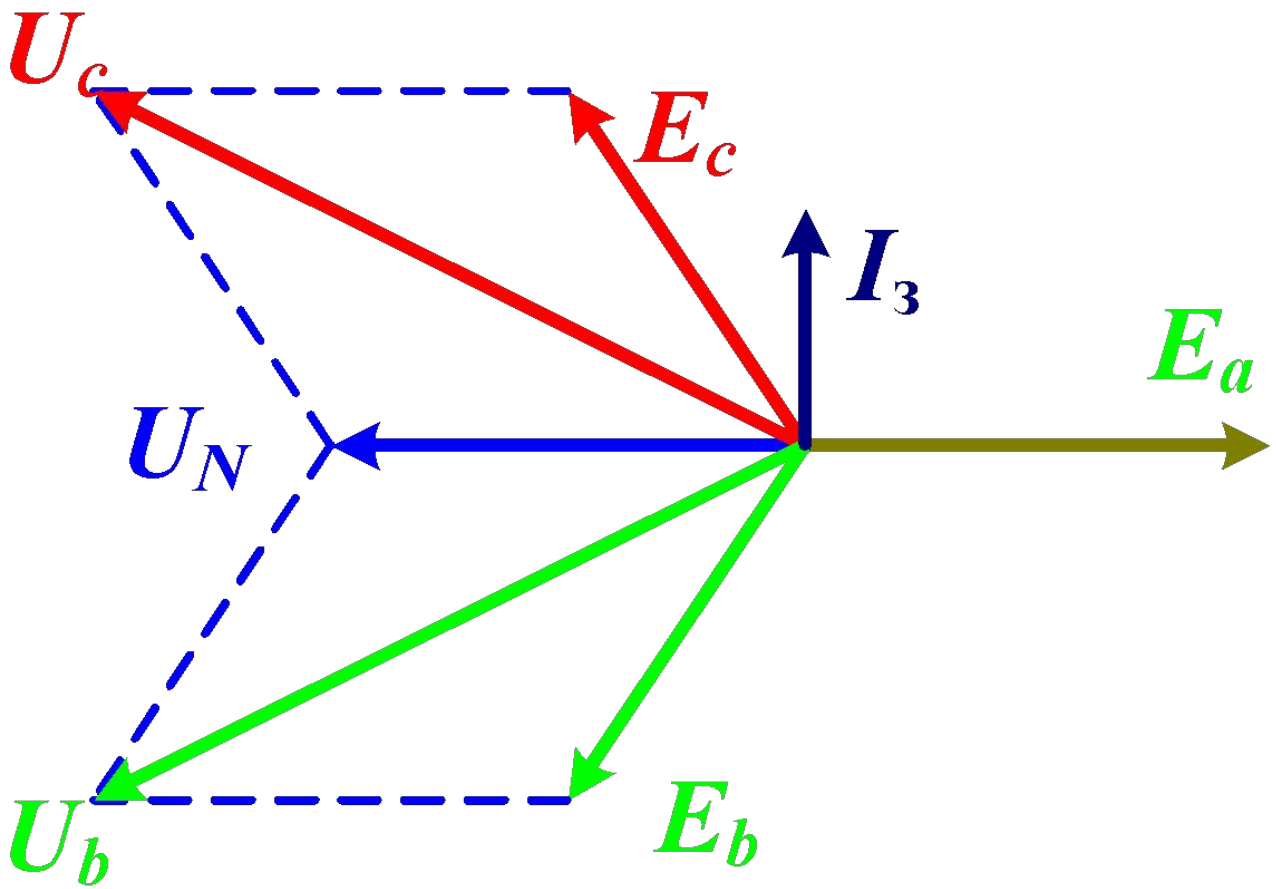
$C_a = 4{,}5$ нФ/км;

$C_b = 4{,}65$ нФ/км;

$C_c = 4{,}7$ нФ/км;

$\frac{U_N}{E} = 0{,}013 \quad (1{,}3\%)$

Векторная диаграмма в режиме однофазного замыкания на землю



$$I_з = j3\omega E_a C_ф,$$

Ток однофазного замыкания на землю зависит от:

- **Класса напряжения (E_a)**
- **Суммарной емкости сети $3C_ф$ (протяженности сети)**

Преимущества изолированной нейтрали

- малый ток замыкания позволяет увеличить ресурс выключателей;
- позволяет снизить требования к заземляющим устройствам, определяемые условиями электробезопасности при ОЗЗ;
- возможность не отключать всю сеть (сомнительное преимущество).

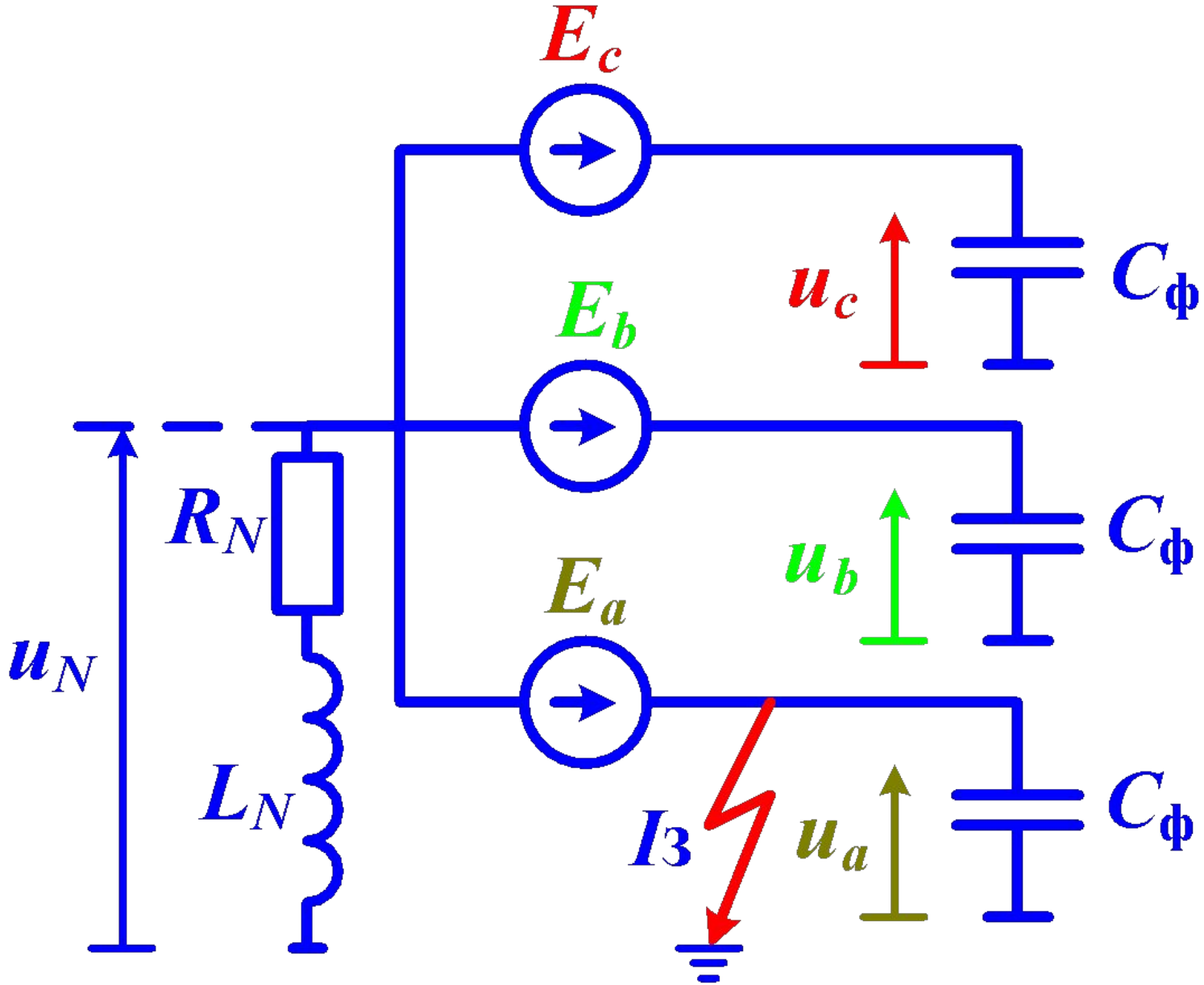
Недостатки изолированной нейтрали

- дуговые перенапряжения, связанные с появлением перемежающейся дуги при ОЗЗ приводят к переходу однофазного замыкания в двух- и трехфазное;
- сложность построения селективных защит от ОЗЗ;
- феррорезонансные явления, вызываемые кратковременными ОЗЗ;
- при сохранении ОЗЗ у опор ВЛ возникают опасные напряжения прикосновения.

Компенсация емкостного тока замыкания на землю применяется при значениях тока ОЗЗ (ПУЭ, п.1.2.16):

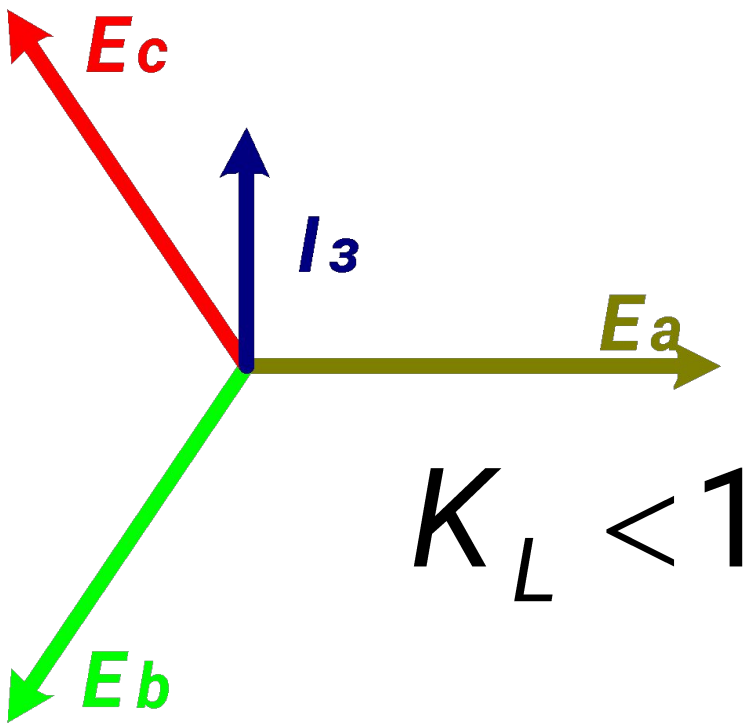
- в сетях напряжением 3-20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях напряжением 35 кВ - более 10 А;
- более 30 А при напряжении 3-6 кВ;
- более 20 А при напряжении 10 кВ;
- более 15 А при напряжении 15-20 кВ;
- в сетях блоков генератор-трансформатор электрических станций – более 5 А (более подробно в п.1.7).

1.3. Сеть с компенсацией емкостного тока замыкания на землю

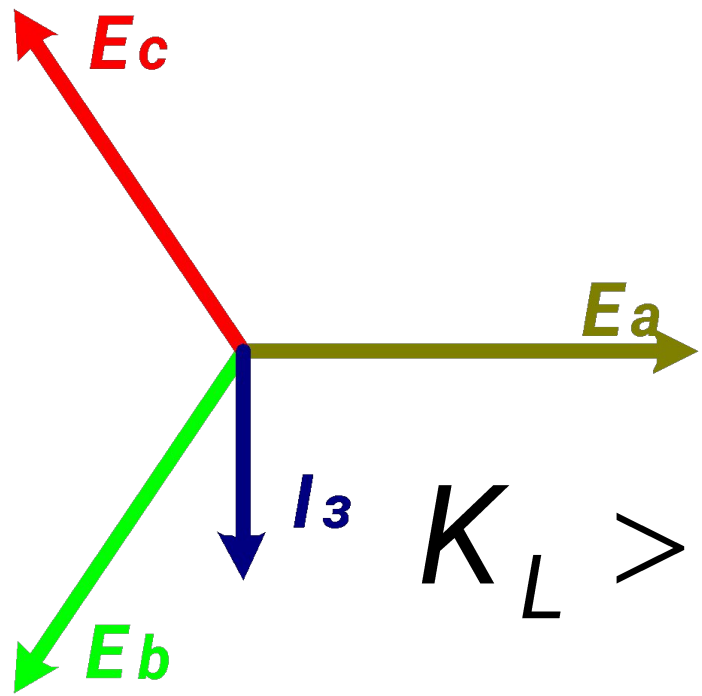


$$I_з = j3\omega E_a C_ф (1 - K_L) + 3E_a g,$$

$$K_L = \frac{x_C}{x_L} = \frac{1}{3\omega^2 C_ф L_N}$$

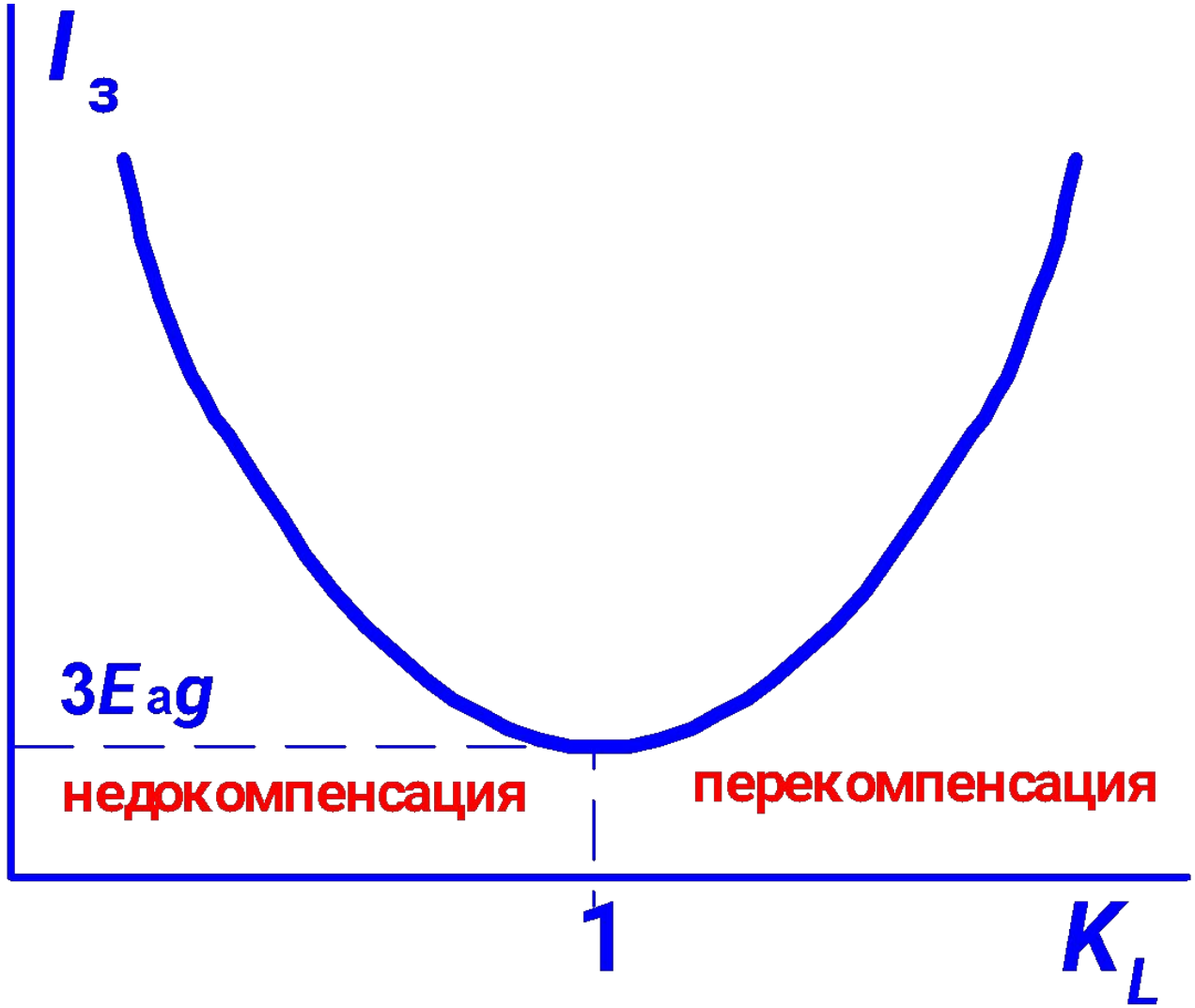


$K_L < 1$



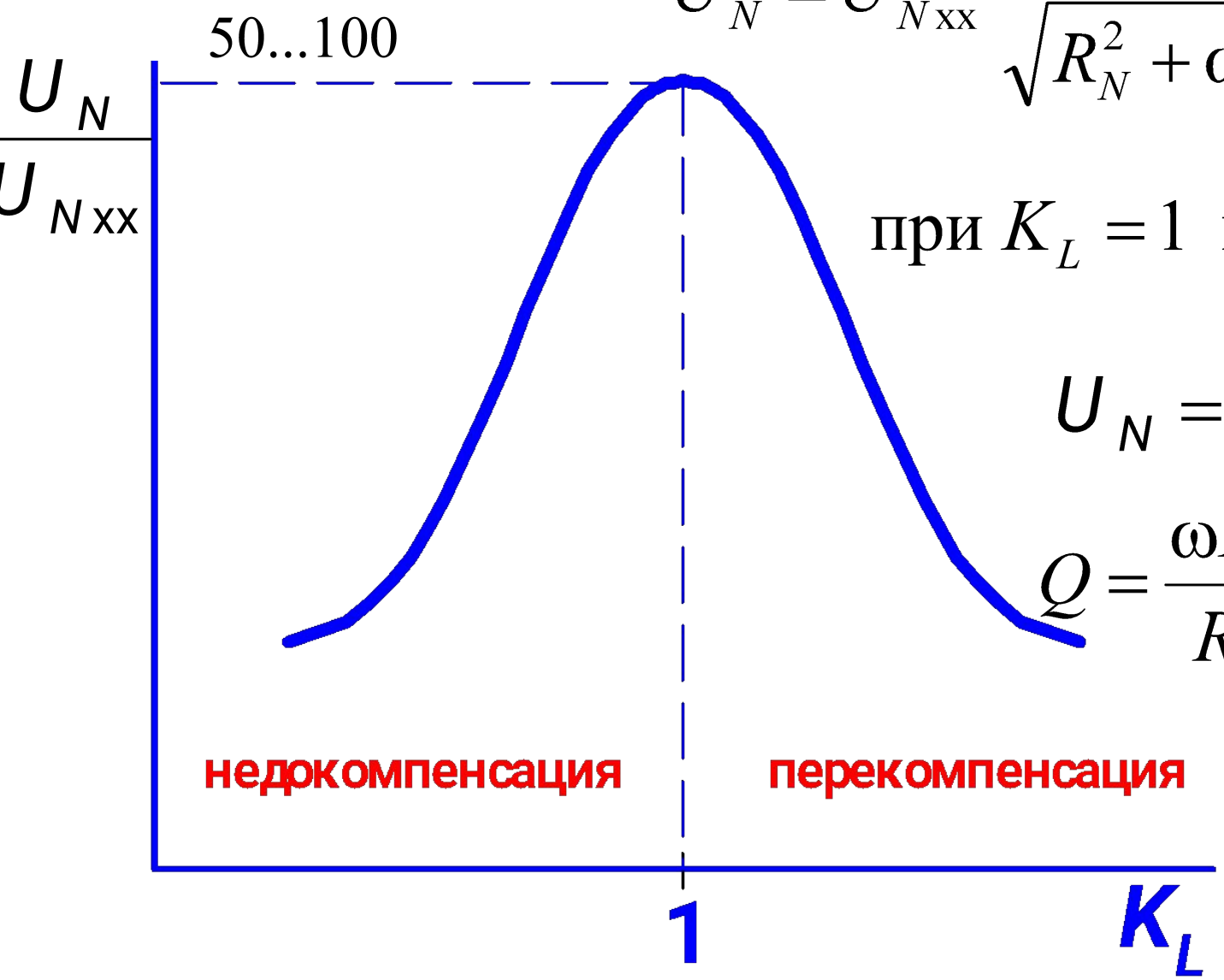
$K_L > 1$

Зависимость тока замыкания от степени компенсации



Напряжение на нейтрали в нормальном режиме

$$U_N = U_{N\,xx} \frac{\sqrt{R_N^2 + \omega^2 L_N^2}}{\sqrt{R_N^2 + \omega^2 L_N^2 (1 - K_L)^2}}$$



при $K_L = 1$ и $R_N << \omega L_N$

$$U_N = U_{N\,xx} \frac{\omega L_N}{R_N}$$

$$Q = \frac{\omega L_N}{R_N} = 50...100$$

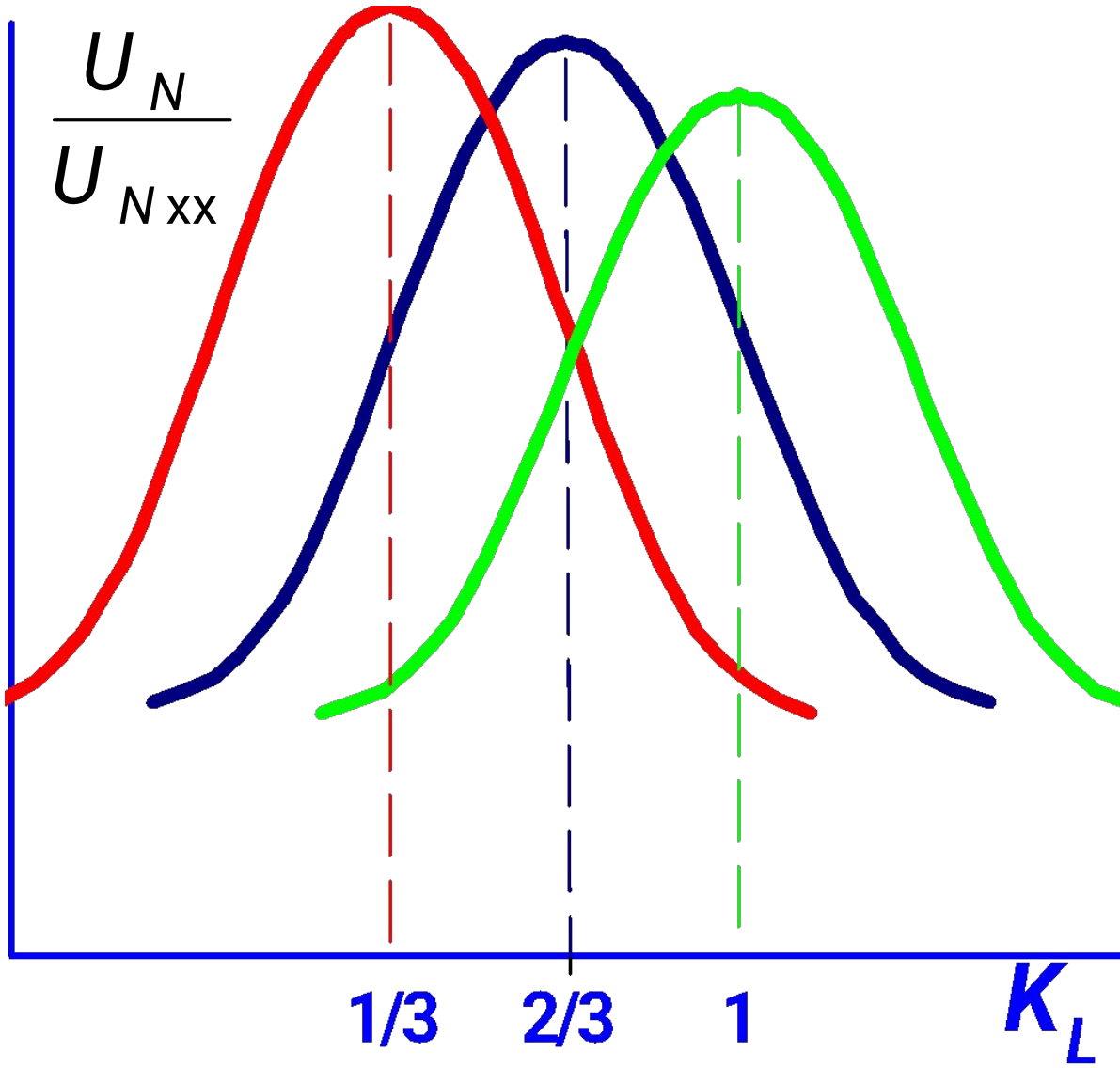
Напряжение на нейтрали в неполнофазных режимах

$$U_N = \frac{E}{1-3K_L}$$

при включении 1 фазы

$$U_N = \frac{E/2}{1-3/2K_L}$$

при включении 2 фаз



Преимущества заземления через ДГР

- позволяет в определенных случаях снизить ток замыкания на землю до его погасания, то есть ликвидировать дуговые перенапряжения;
- уменьшает число переходов ОЗЗ в двух- и трехфазные короткие замыкания;
- улучшает условия электробезопасности в месте замыкания.

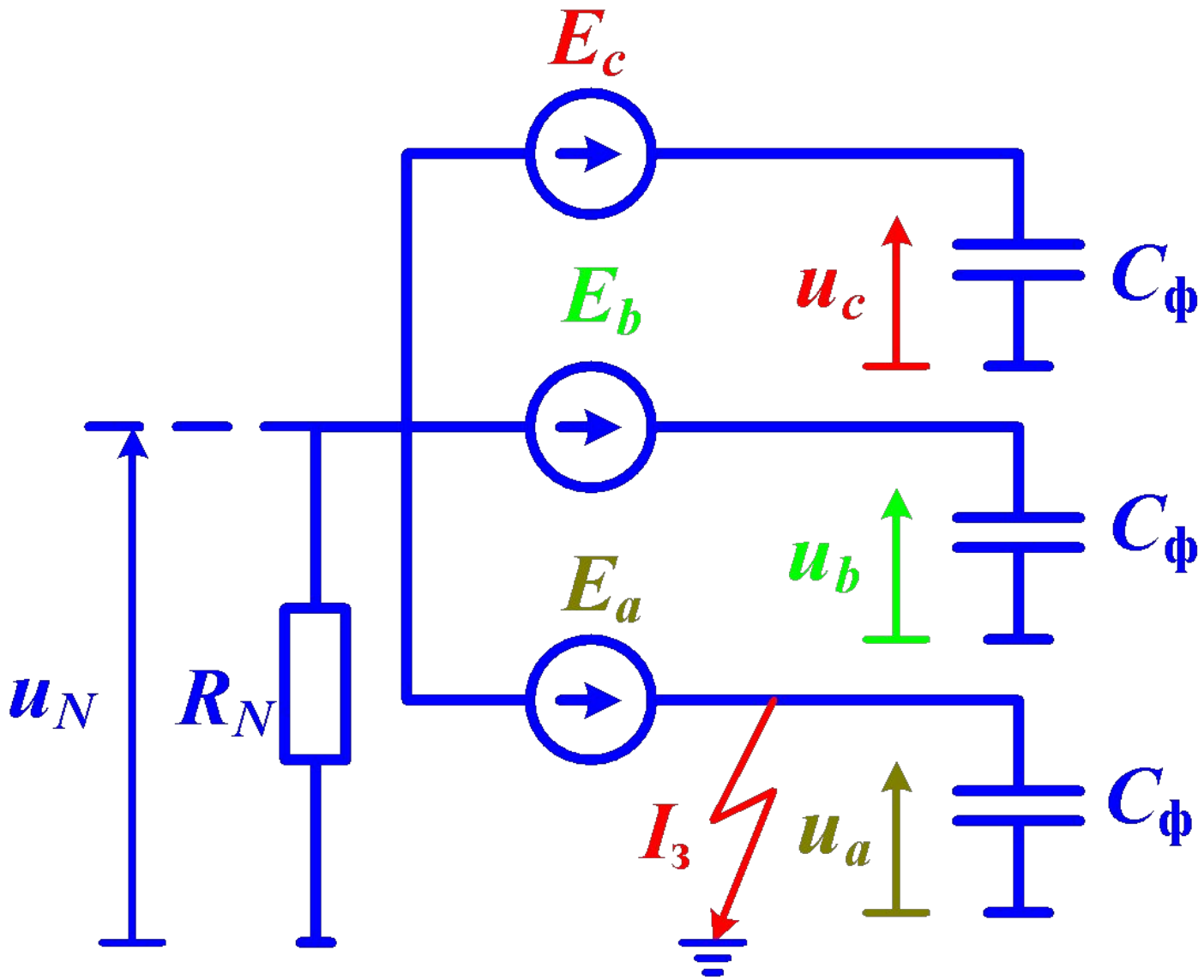
Недостатки заземления через ДГР

- необходимость симметрирования сети до степени 0,75% фазного;
- сложность и высокая стоимость систем автоматической подстройки ДГР, необходимой для разветвленных городских сетей с часто изменяемой конфигурацией;
- практически полное отсутствие селективных защит от ОЗЗ для сети с заземлением нейтрали через ДГР.

Реактор 10 кВ

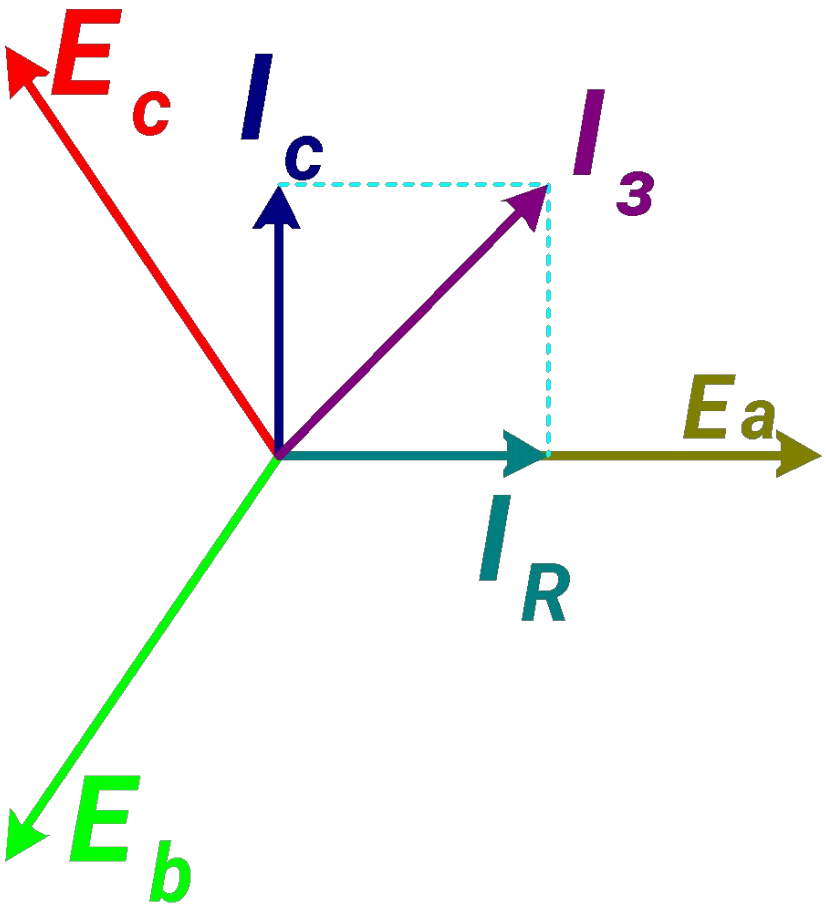
ELEKTRA

1.4. Сеть с резистивным заземлением нейтрали



Векторная диаграмма в режиме замыкания

$$I_з = j3\omega E_a C_ф \sqrt{1 + K_R^2},$$



$$U_N = \frac{U_{N\,xx}}{\sqrt{1 + K_R^2}}$$

$$K_R = \frac{x_c}{R} = \frac{1}{3\omega C_ф R}$$

Преимущества резистивного заземления нейтрали

- полное устранение феррорезонансных явлений;
- снижение уровня дуговых перенапряжений и устранение перехода ОЗЗ в двух- и трехфазные замыкания;
- возможность построения простых селективных защит от ОЗЗ.

Недостатки резистивного заземления нейтрали

- **увеличение тока замыкания на землю;**
- **появление на подстанции греющегося оборудования (резистора мощностью 30–400 кВт).**

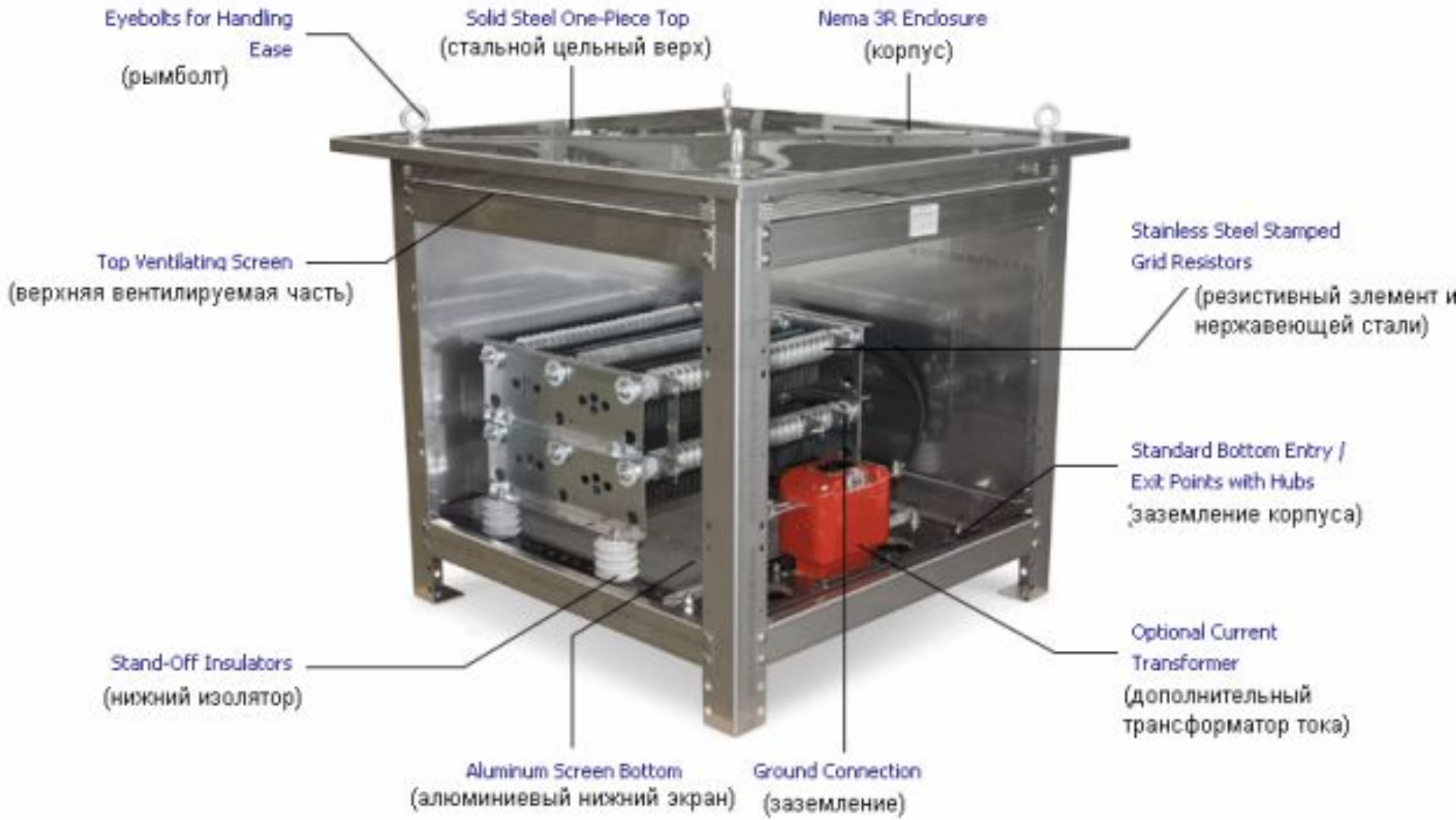


Рисунок 1 Типовая конструкция резистора NGR (США, Post Glover)

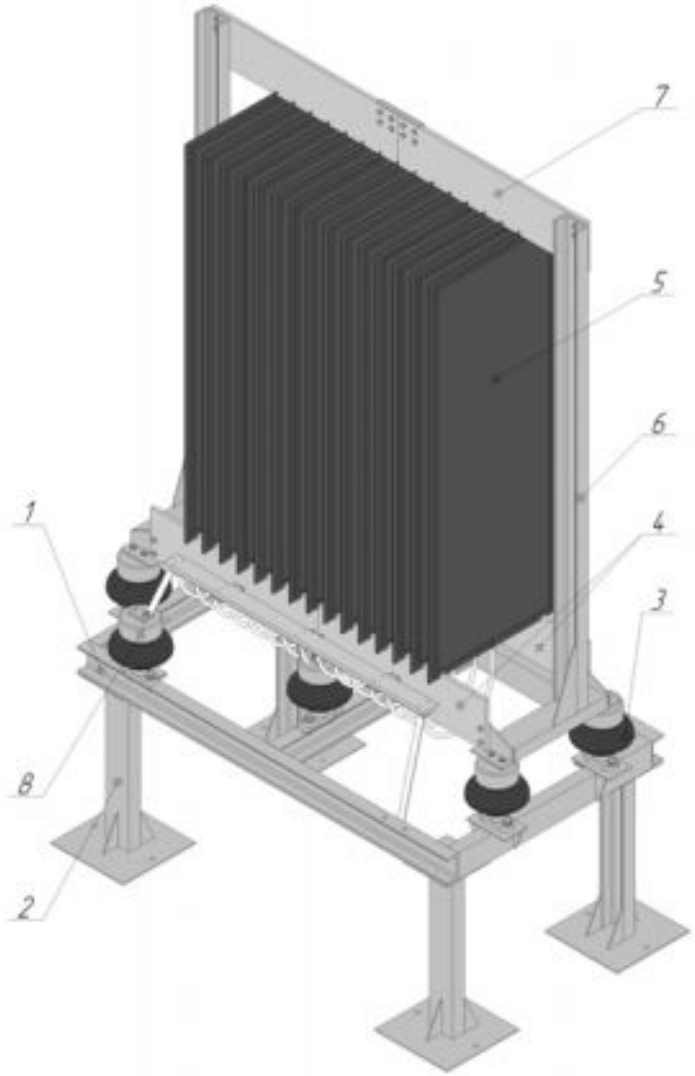


Рисунок 2 - Унифицированный резистивный блок
1 - основание, 2 - опорные стойки, 3 - опорные изоляторы, 4 - изоляционные пластины, 5 - элементы резистора защитного, 6 - вертикальные стойки, 7 - изоляционные пластины, 8 - изолятор для подключения подвода от нейтрали сети

Рекомендуемые режимы нейтрали сетей среднего напряжения (емкостный ток ниже границы ПУЭ)

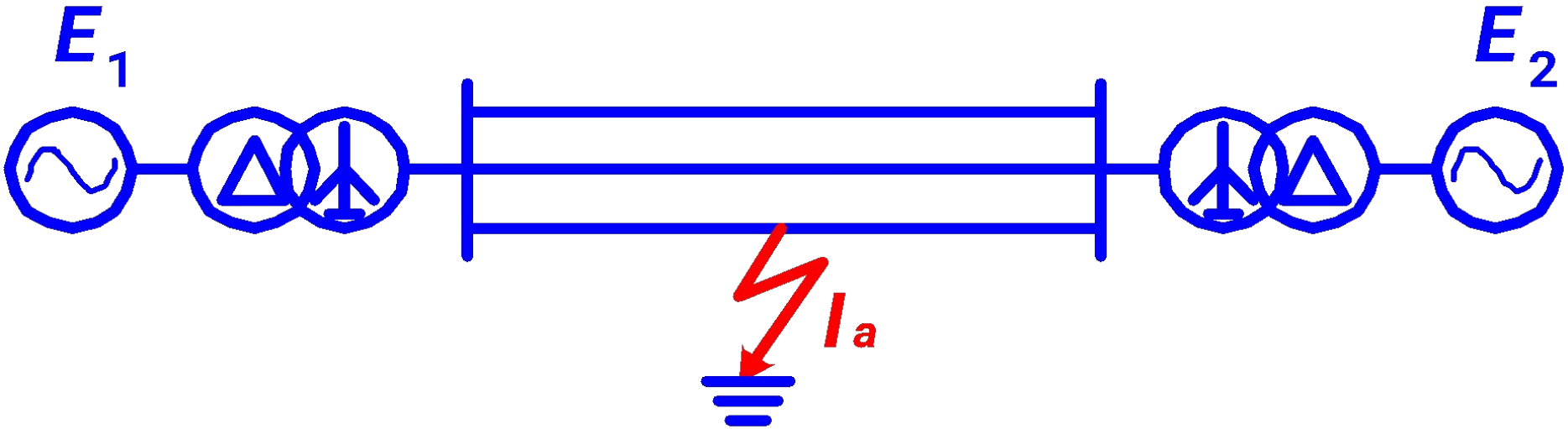
Тип электрической сети	Длительная работа с ОЗЗ	ОЗЗ отключается РЗ
Сети генераторного напряжения	изолированная	изолированная
Сети собственных нужд электрических станций	изолированная, резистор	резистор
Распределительные сети с воздушными линиями	изолированная, резистор	резистор
Городские, поселковые кабельные сети (без ВЛ)	изолированная, резистор	резистор
Сети, питающие передвижные подстанции и механизмы, торфяные разработки, шахты и т.п.	–	резистор

Рекомендуемые режимы нейтрали сетей среднего напряжения (емкостный ток выше границы ПУЭ)

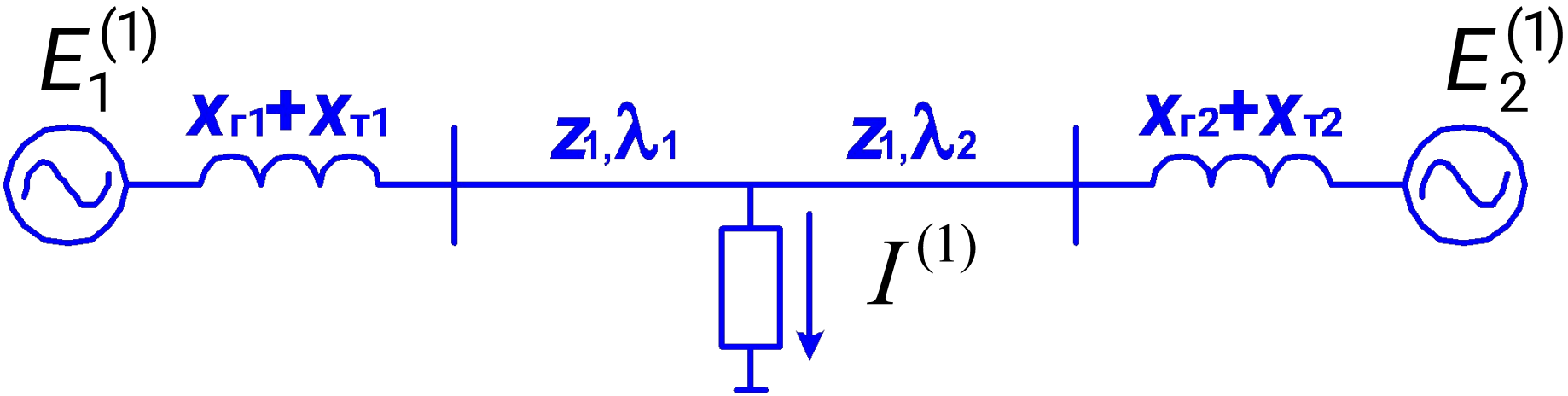
Тип электрической сети	Длительная работа с ОЗЗ	ОЗЗ отключается РЗ
Сети генераторного напряжения	ДГР	изолированная
Сети собственных нужд электрических станций	ДГР	резистор
Распределительные сети с воздушными линиями	резистор (ДГР)	резистор
Городские, поселковые кабельные сети (без ВЛ)	ДГР	резистор
Сети, питающие передвижные подстанции и механизмы, торфяные разработки, шахты и т.п.	–	резистор

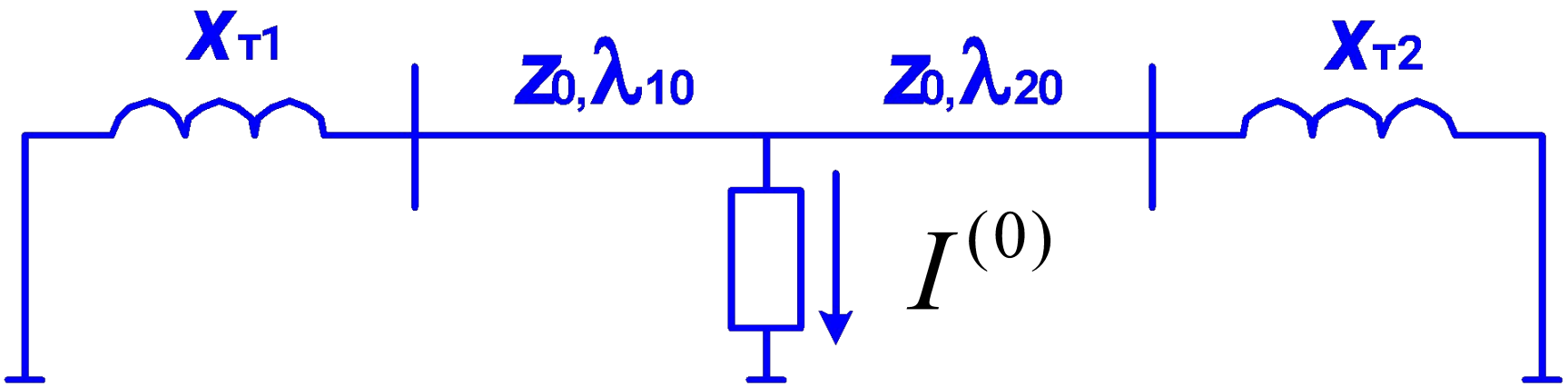
1.5. Сеть с глухим заземлением нейтрали

Принципиальная схема при однофазном к.з. в сети с глухим заземлением нейтрали



Схемы замещения для прямой и нулевой последовательностей





Система уравнений для прямой и нулевой последовательностей

$$\begin{cases} E_{э}^{(1)} = U^{(1)} + z_{вх}^{(1)} \cdot I^{(1)} \\ 0 = U^{(0)} + z_{вх}^{(0)} \cdot I^{(0)} \end{cases}$$

Граничные условия в месте замыкания:

$$U_a = 0; \quad I_b = I_c = 0.$$

Решая совместно полученную систему уравнений, получим:

$$\dot{I}_a = \frac{3\dot{E}_{эа}}{2z_{вх}^{(1)} + z_{вх}^{(0)}}$$

$$\dot{U}_b = -\frac{3}{2} \cdot \frac{z_{вх}^{(0)}}{2z_{вх}^{(1)} + z_{вх}^{(0)}} \dot{E}_{эа} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\dot{E}_{эа}$$

$$\dot{U}_c = -\frac{3}{2} \cdot \frac{z_{вх}^{(0)}}{2z_{вх}^{(1)} + z_{вх}^{(0)}} \dot{E}_{эа} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\dot{E}_{эа}$$

Принимая

$$z_{\text{вх}}^{(1)} = jx_{\text{вх}}^{(1)}; \quad z_{\text{вх}}^{(0)} = jx_{\text{вх}}^{(0)}$$

обозначив

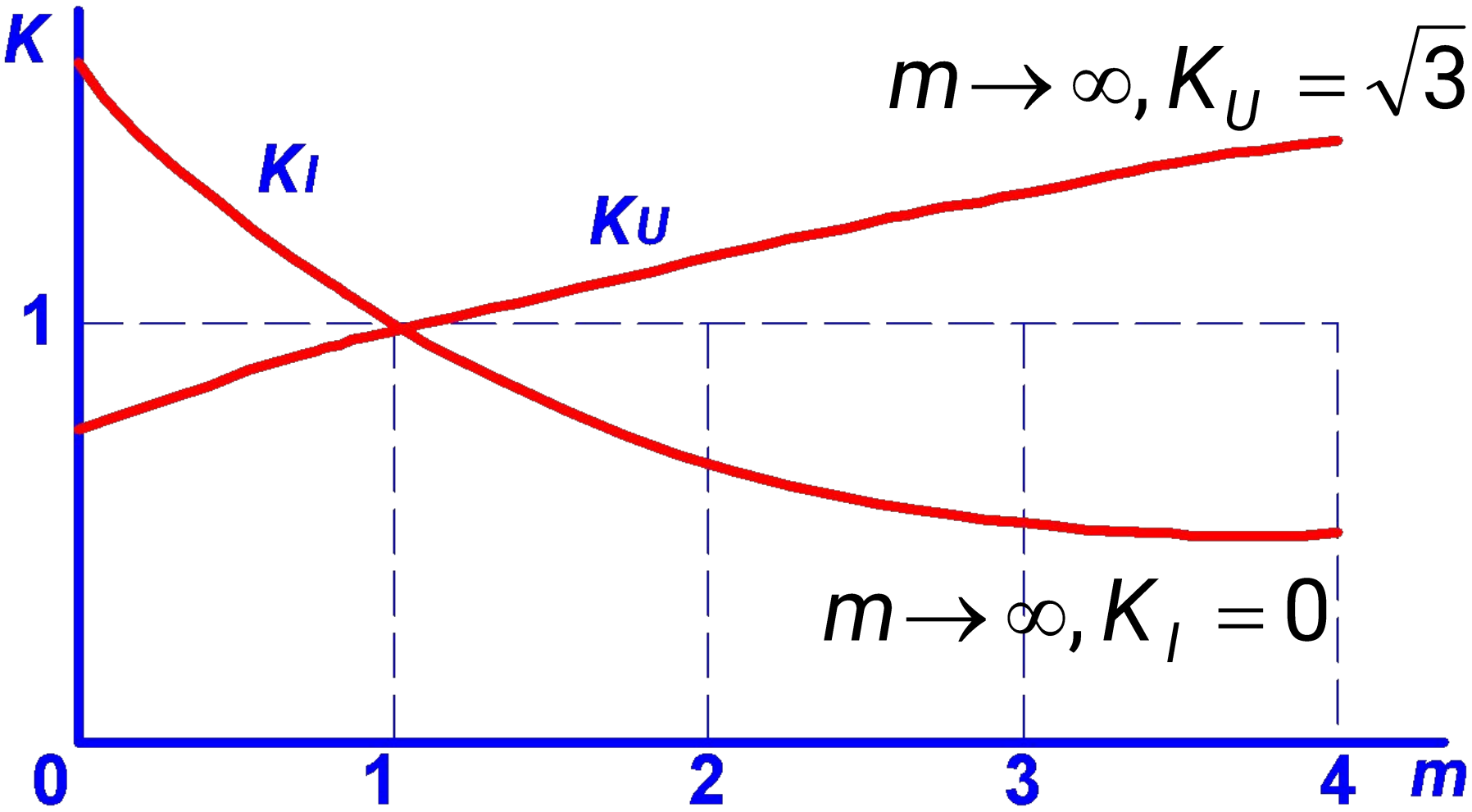
$$\frac{x_{\text{вх}}^{(0)}}{x_{\text{вх}}^{(1)}} = m$$

и переходя к модулям, получаем:

$$I_a = \frac{E_{эа}}{x_{\text{вх}}^{(1)}} \cdot \frac{3}{2+m} = I^{(3)} \cdot K_I$$

$$U_b = U_c = E_{эа} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{m^2 + m + 1}}{2+m} = E_{эа} \cdot K_U$$

Зависимости K_U и K_I от параметра m



1.6. Применение низкоомных сопротивлений в нейтрали трансформаторов сети

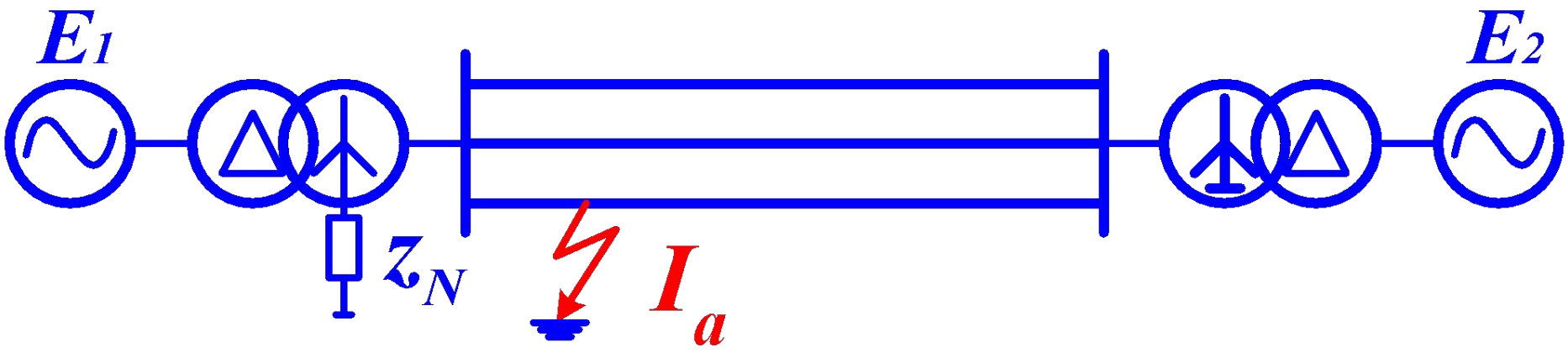
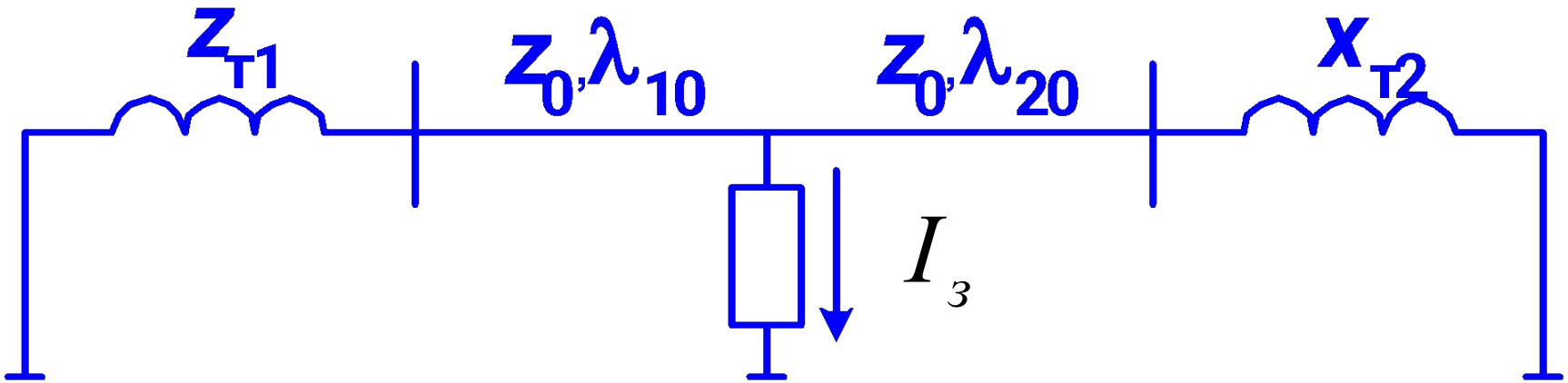


Схема замещения для нулевой последовательности

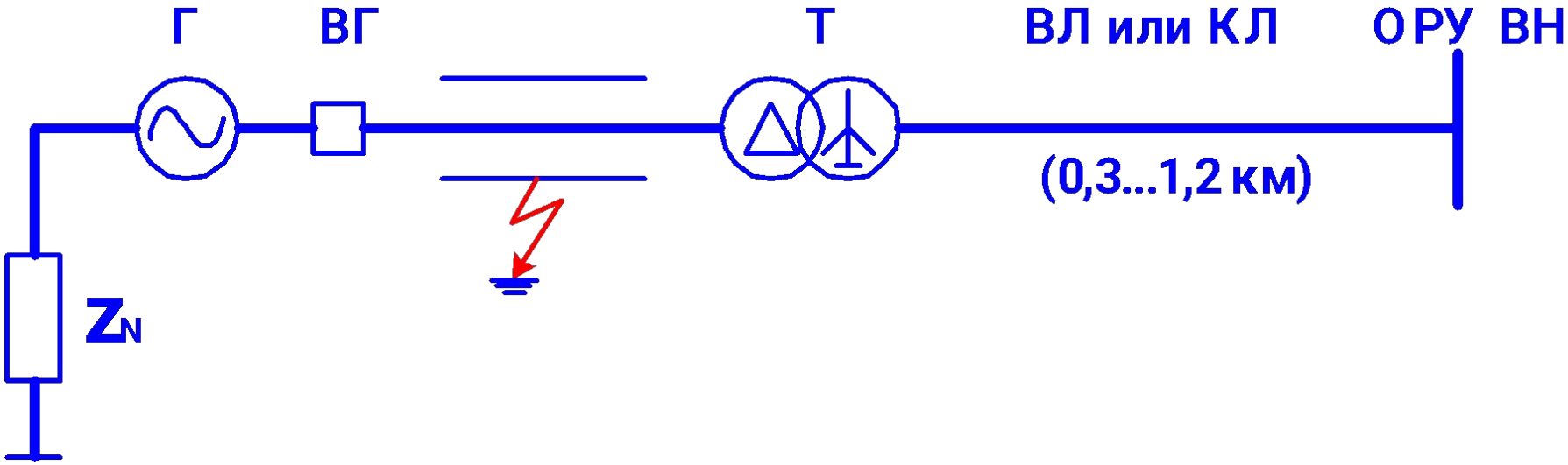


$$z_{T1} = \begin{cases} j(x_{т1} + 3x_N) & \text{при} \quad z_N = jx_N; \\ jx_{т1} + 3R_N & \text{при} \quad z_N = R_N. \end{cases}$$

1.7. Заземление нейтралей электрических генераторов

- **В случае, если ток замыкания на землю в сети генераторного напряжения превышает 5 А, то нейтрали генераторов должны оснащаться ДГР (ПУЭ, издания до 1986 г.)**
- **На блоках с генераторами мощностью более 30 МВт должна быть предусмотрена защита от замыканий на землю в цепи генераторного напряжения с выдержкой времени не более 0,5 с. (ПУЭ, издание 2002 г.)**

Принципиальная схема блока



$$I_з = j3\omega E_a C_ф,$$

$$C_ф = C_г + C_т + C_ш + C_{тсн}$$

Емкости блоков генераторного напряжения

$U_{ном}$, кВ	Тип блока	$C_ф$, мкФ	$P_{бл}$, МВт
10,5	ГЭС	0,2…0,4	20…40
15,75	ГЭС	1…1,5	100…700
20	ТЭС АЭС	0,2…0,4	300…500
24	ТЭС АЭС	0,2…0,4	800…1200

При компенсации тока замыкания с помощью ДГР

$$I_з = j3\omega E_a C_ф (1 - K_L),$$

$$K_L = \frac{x_C}{x_L} = \frac{1}{3\omega^2 C_ф L_N}$$

Смещение нейтрали генераторов в неполнофазных режимах

$$\frac{U_N}{E} = \frac{x}{1 - K_L} \sin\frac{\delta}{2}$$ – при включении 2 фаз

$$\frac{U_N}{E} = \frac{2x}{1 - K_L} \sin\frac{\delta}{2}$$ – при включении 1 фазы

где $$x = \frac{C_т}{C_г + C_т}$$

Рекомендации по условиям эксплуатации ДГК в нейтрали генераторов

- $K_L = 1{,}1 – 1{,}15$
- $\delta = 20^0 – 30^0$

При резистивном заземлении нейтрали генераторов

$$I_з = j3\omega E_a C_ф \sqrt{1 + K_R^2},$$

$$\frac{U_N}{E} = \frac{x}{\sqrt{1 + K_R^2}} \cdot \sin\frac{\delta}{2}$$ – при включении 2 фаз

$$\frac{U_N}{E} = \frac{2x}{\sqrt{1 + K_R^2}} \cdot \sin\frac{\delta}{2}$$ – при включении 1 фазы