

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



```
graph TD; A[Режимы заземления] --> B[Неэффективное (до 35 кВ)]; A --> C[Эффективное (выше 110 кВ)]; B --> D[Изолированная]; B --> E[Через ДГК]; B --> F[Через резистор (высокоомный и низкоомный)]; C --> G[Глухое заземление]; C --> H[Через низкоомный резистор];
```

Неэффективное (до 35 кВ)

Эффективное (выше 110 кВ)

Изоли-
рован-
ная

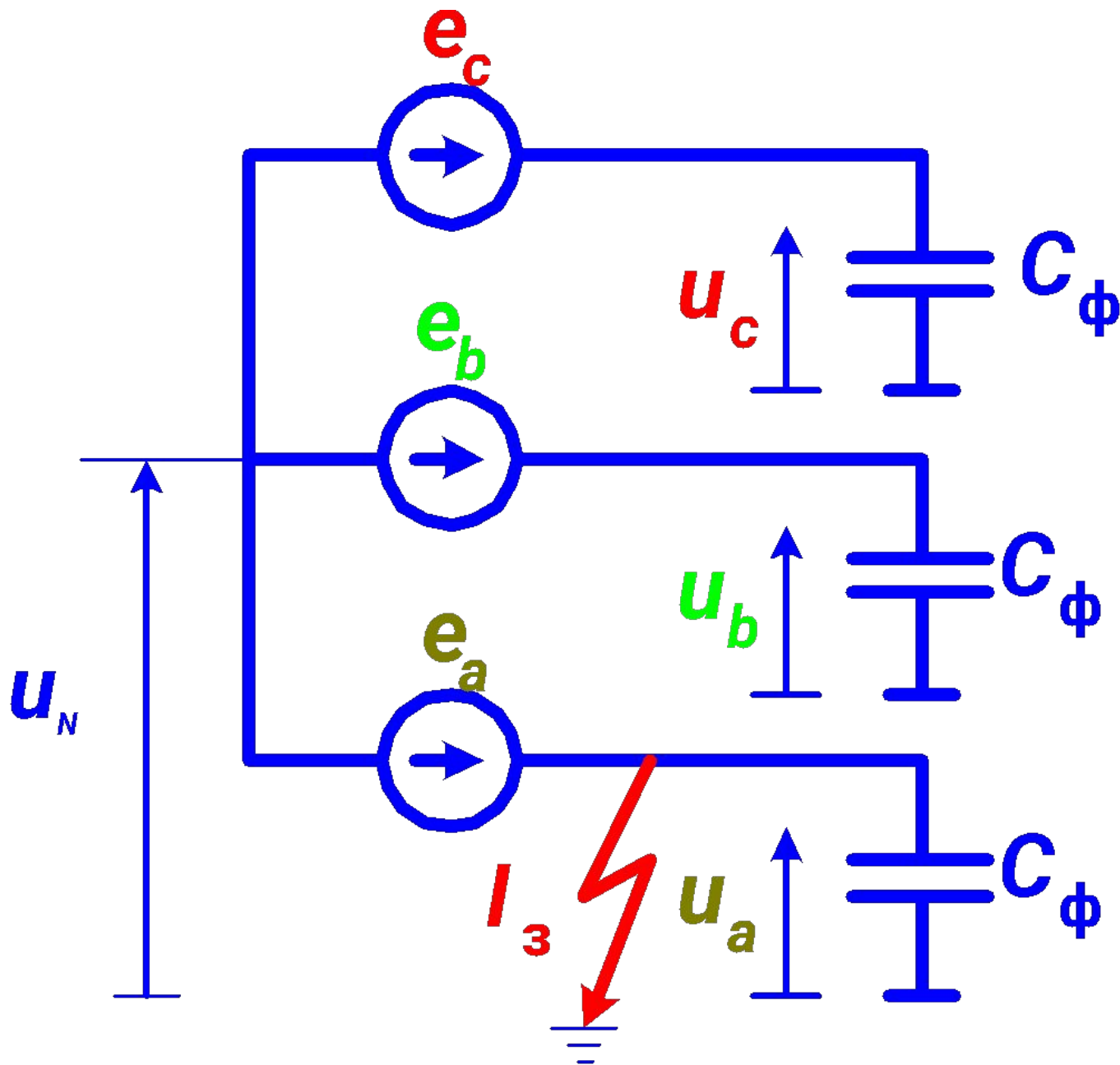
Через
ДГК

Через
резистор
(высокоомный
и
низкоомный)

Глухое
зазем-
ление

Через
низко-
омный
резис-
тор

1.2. Сеть с изолированной нейтралью



Напряжение на нейтрали в нормальном режиме

$$U_N = \frac{\underline{E}_a y_a + \underline{E}_b y_b + \underline{E}_c y_c}{y_a + y_b + y_c},$$

где

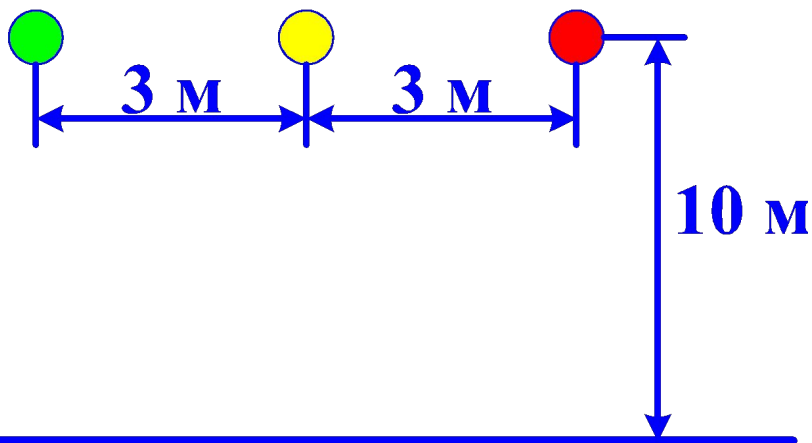
$$y_a = \omega C_{\phi a}, \quad y_b = \omega C_{\phi b}, \quad y_c = \omega C_{\phi c}$$

$U_N = 0$ при следующих условиях:

1) $y_a = y_b = y_c;$

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

Напряжение несимметрии при реальном расположении проводов

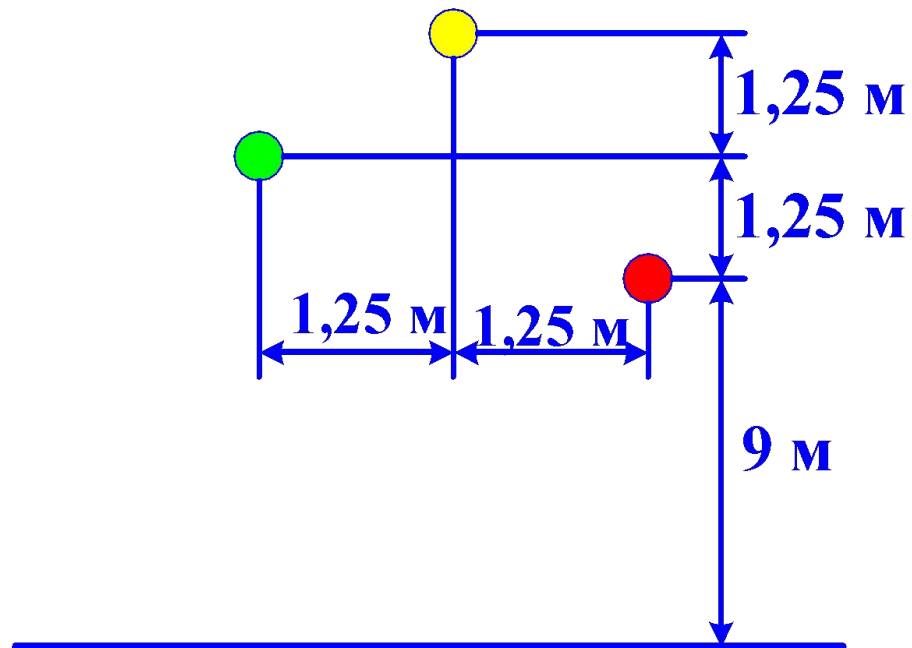


$$C_a = 4,3 \text{ нФ/км};$$

$$C_b = 4,8 \text{ нФ/км};$$

$$C_c = 4,8 \text{ нФ/км};$$

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



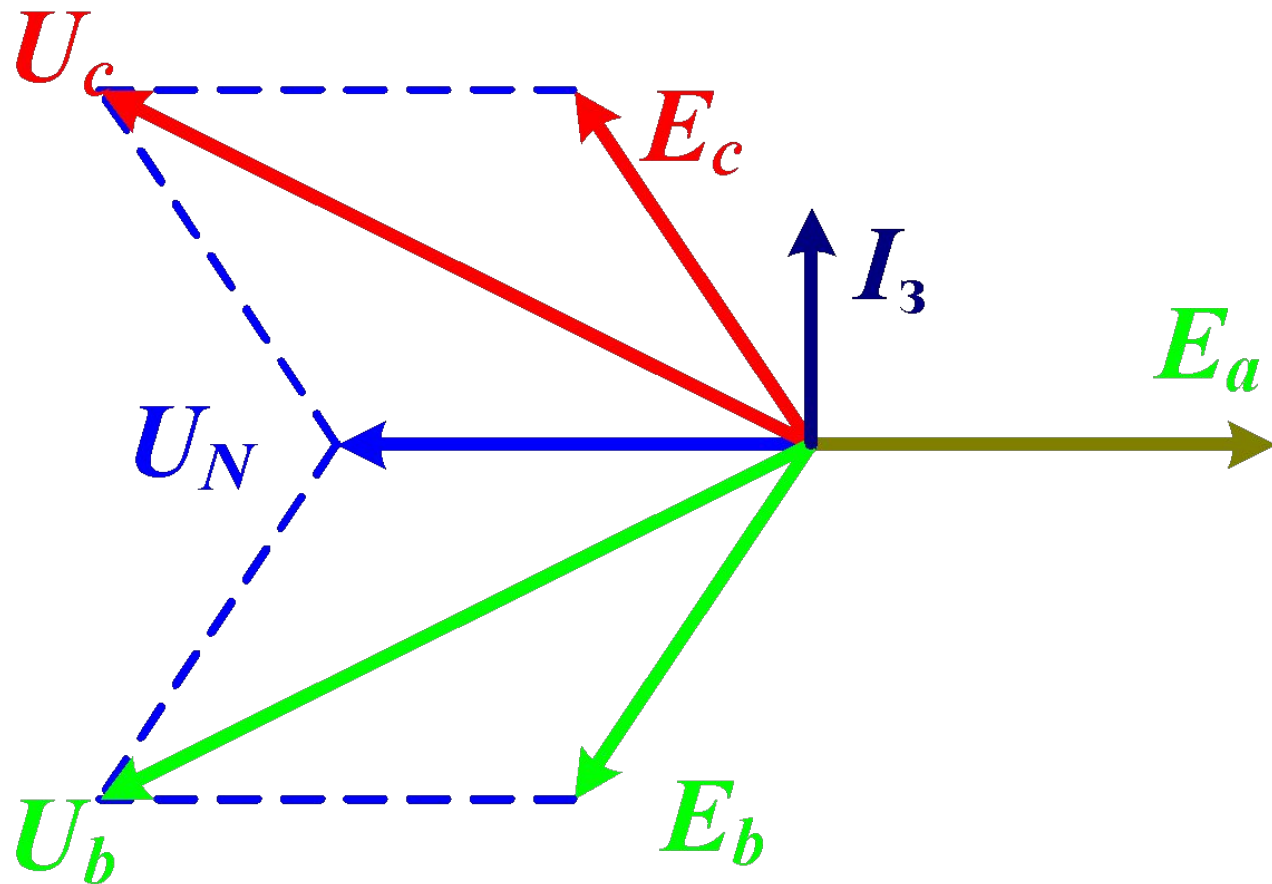
$$C_a = 4,5 \text{ нФ/км};$$

$$C_b = 4,65 \text{ нФ/км};$$

$$C_c = 4,7 \text{ нФ/км};$$

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

Векторная диаграмма в режиме однофазного замыкания на землю



$$I_3 = j3\omega E_a C_\phi,$$

Ток однофазного замыкания на землю зависит от:

- Класса напряжения (E_a)
- Суммарной емкости сети $3C_{\phi}$
(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.

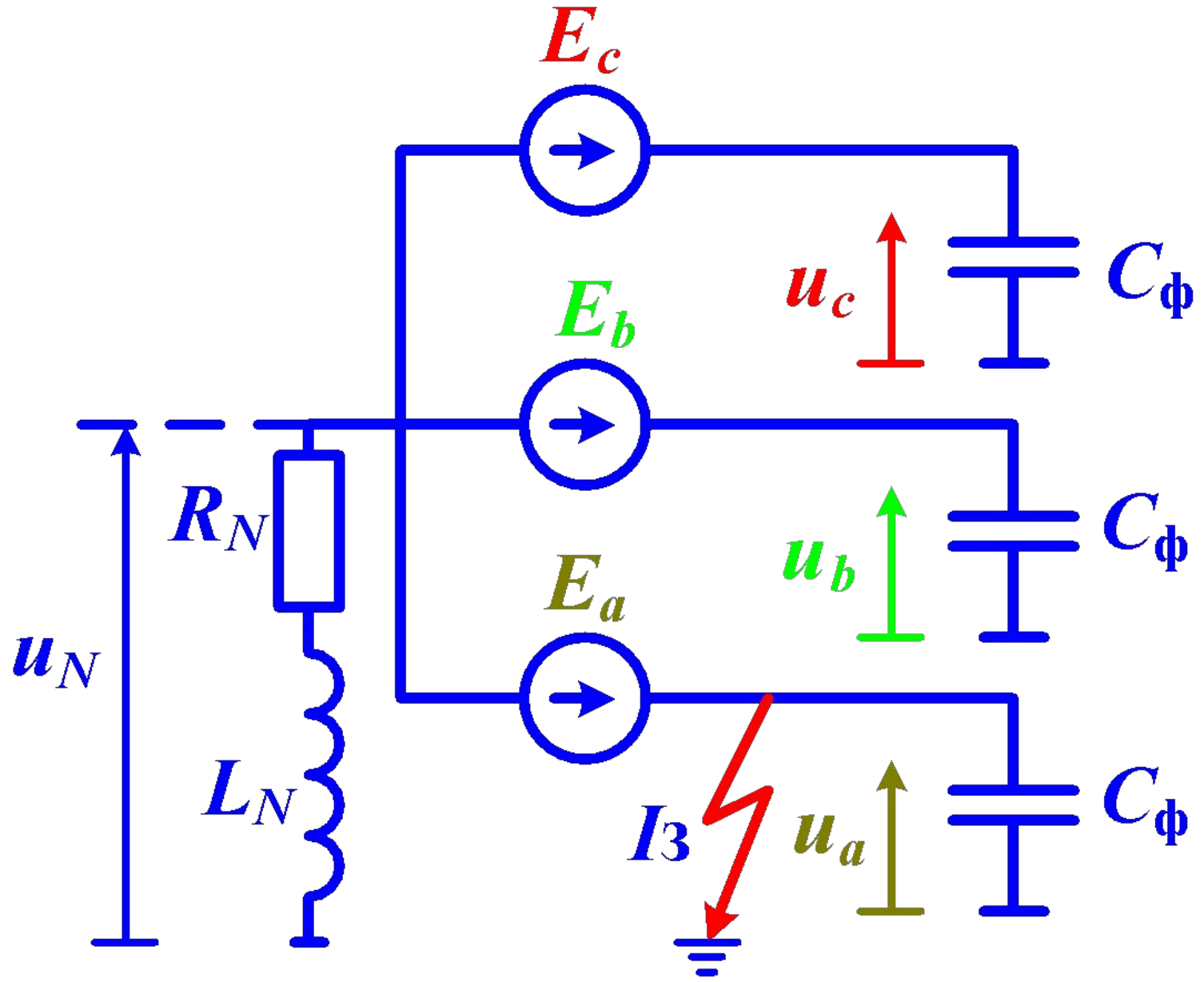
Компенсация емкостного тока

замыкания на землю применяется при

значениях тока ОЗЗ (ПУЭ, п.1.2.16):

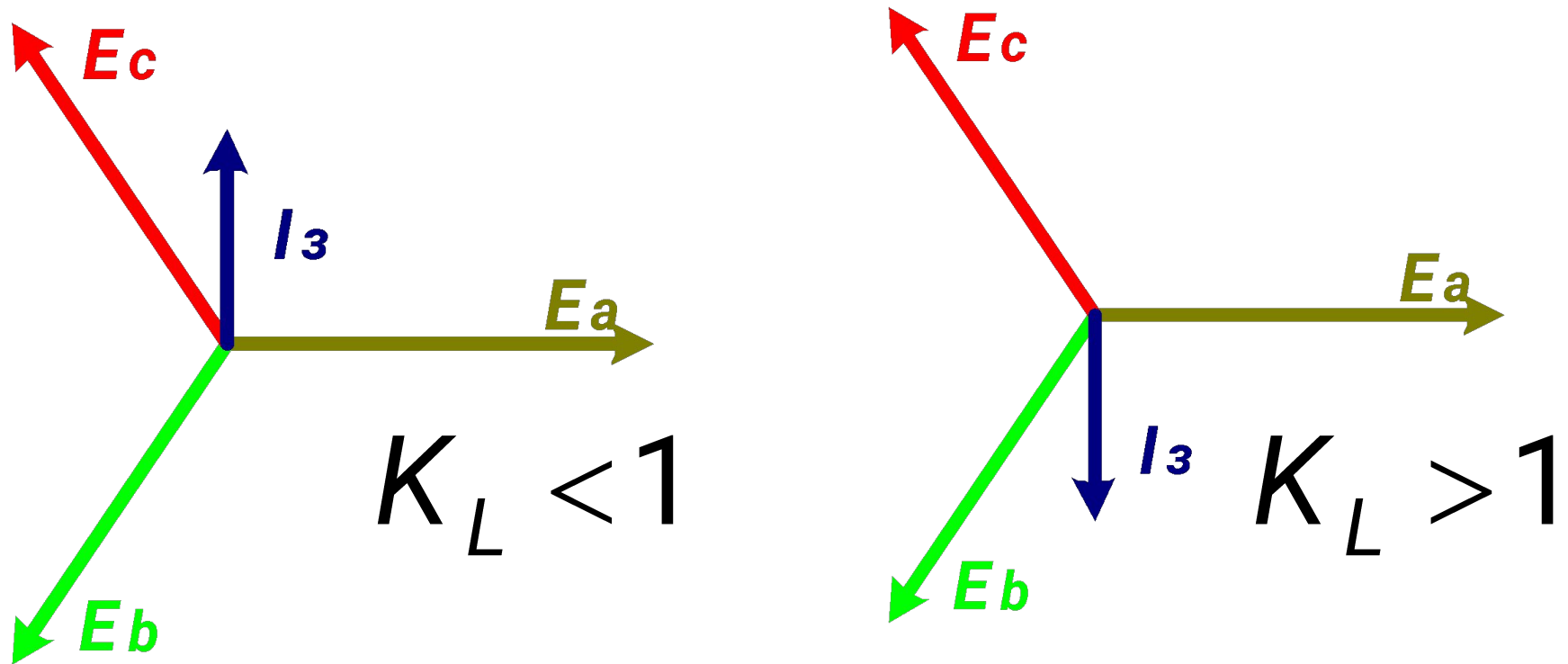
- в сетях напряжением 3-20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях напряжением 35 кВ - более 10 А;**
- более 30 А при напряжении 3-6 кВ;**
- более 20 А при напряжении 10 кВ;**
- более 15 А при напряжении 15-20 кВ;**
- в сетях блоков генератор-трансформатор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

1.3. Сеть с компенсацией емкостного тока замыкания на землю

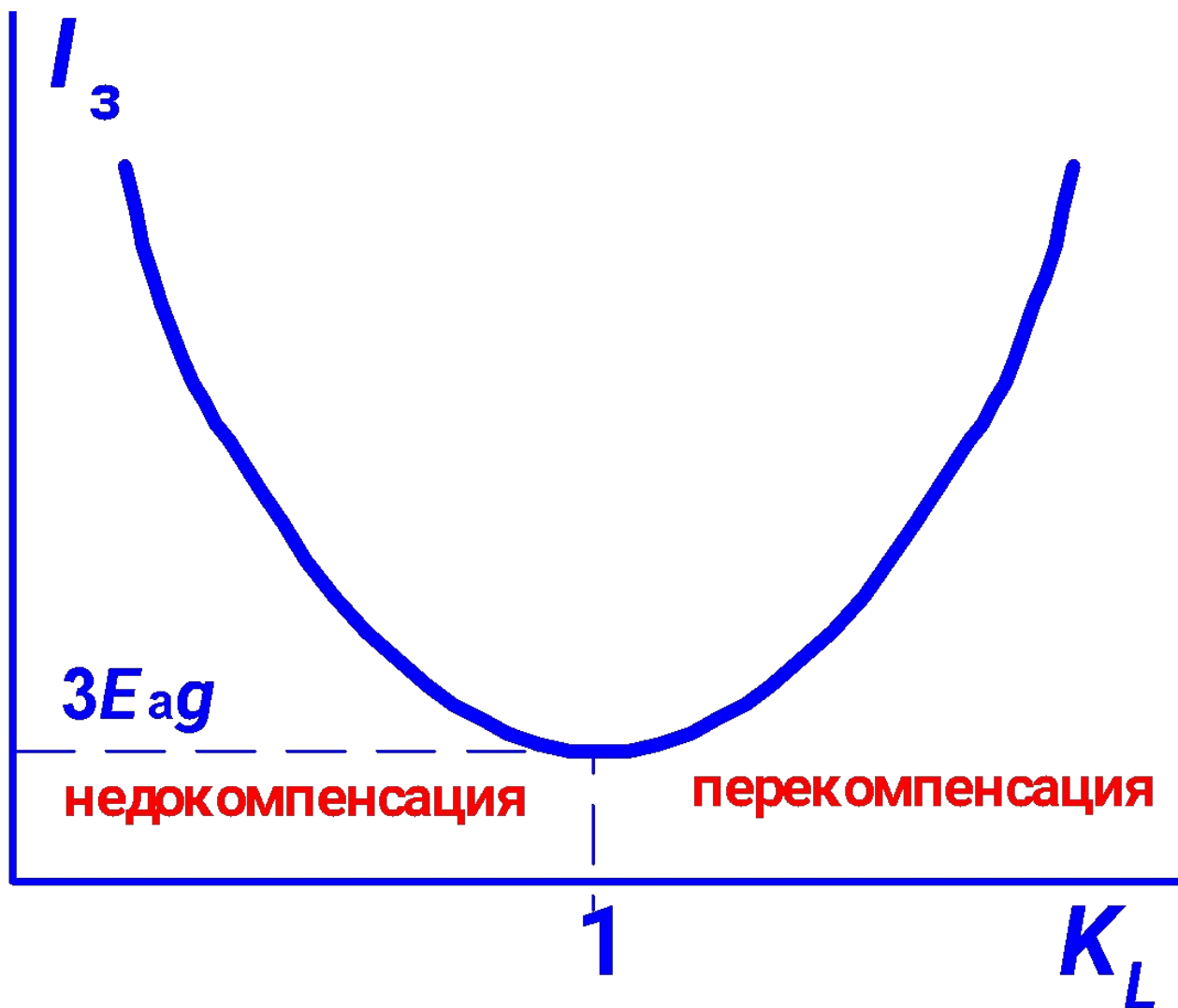


$$I_3 = j3\omega E_a C_\phi (1 - K_L) + 3E_a g,$$

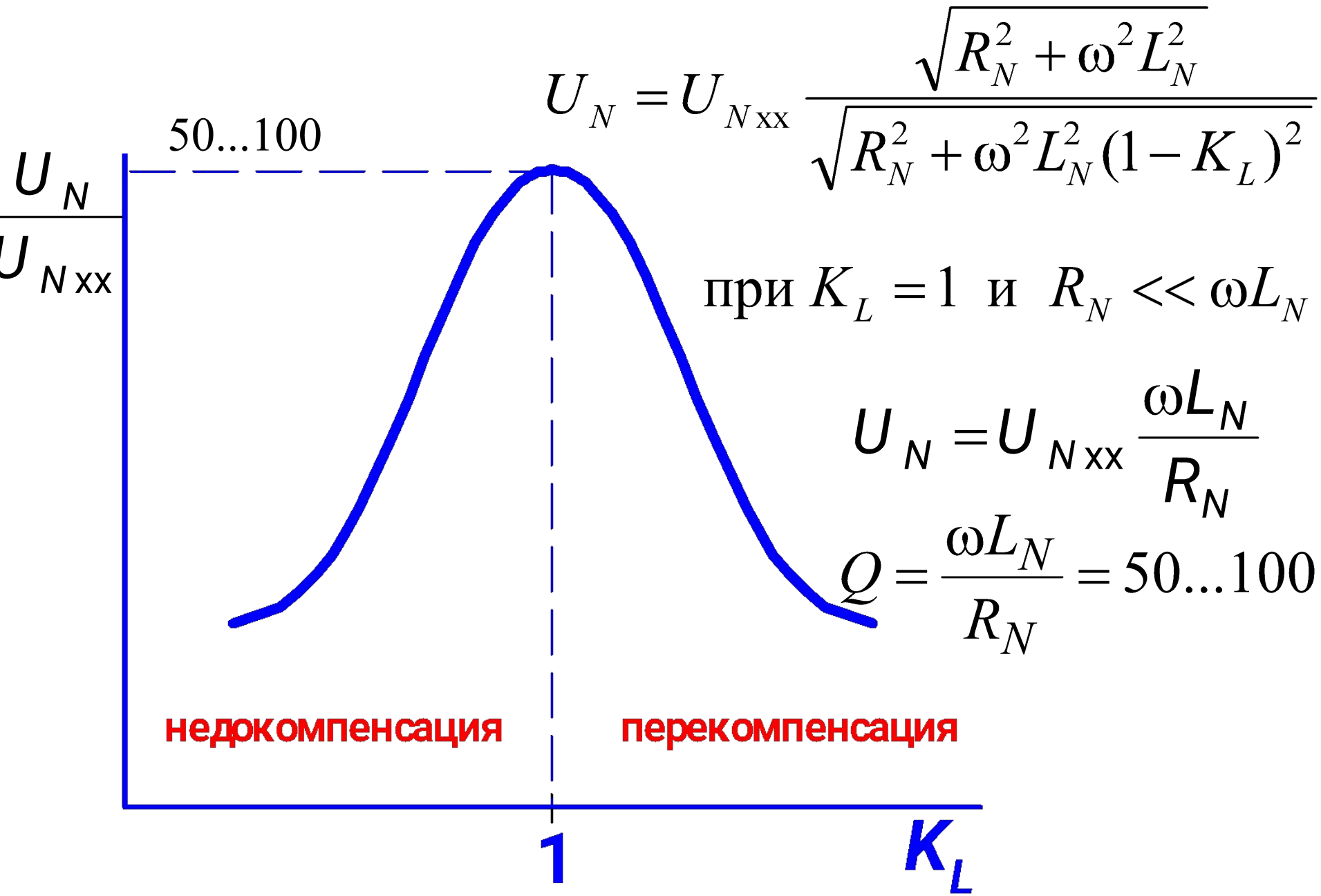
$$K_L = \frac{X_C}{X_L} = \frac{1}{3\omega^2 C_\phi L_N}$$



Зависимость тока замыкания от степени компенсации



Напряжение на нейтрали в нормальном режиме



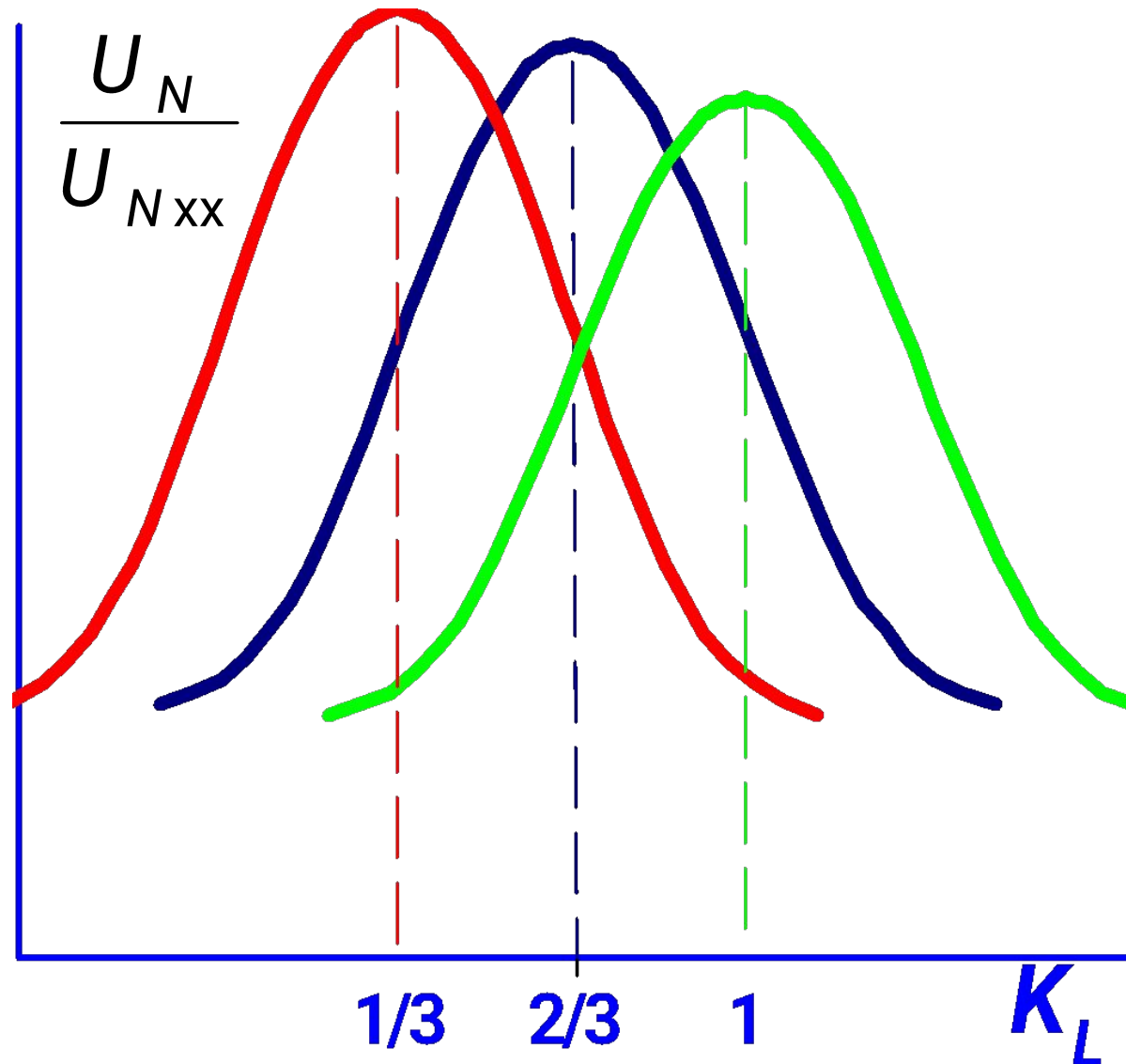
Напряжение на нейтрали в неполнофазных режимах

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

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.

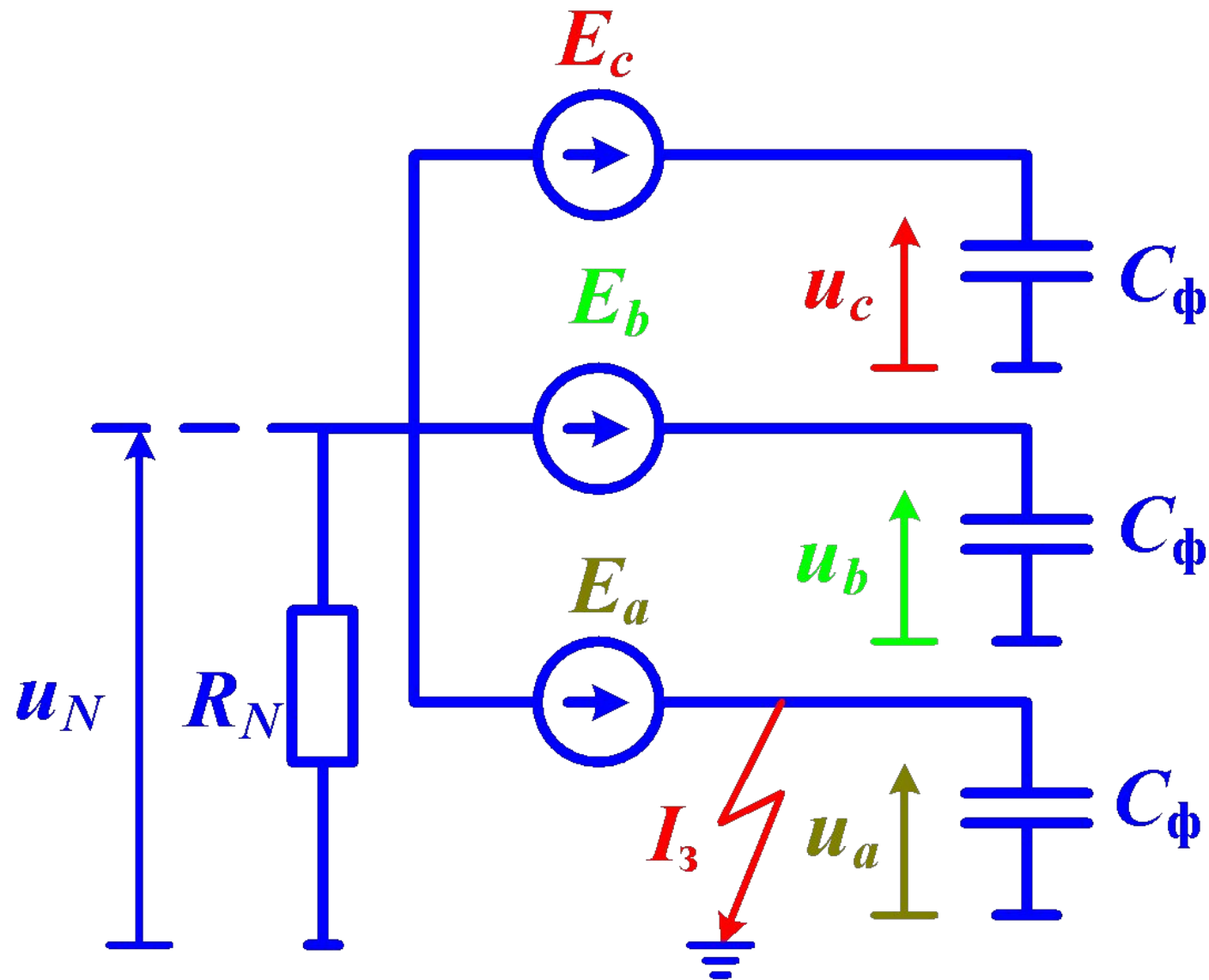
Реактор 10 кВ





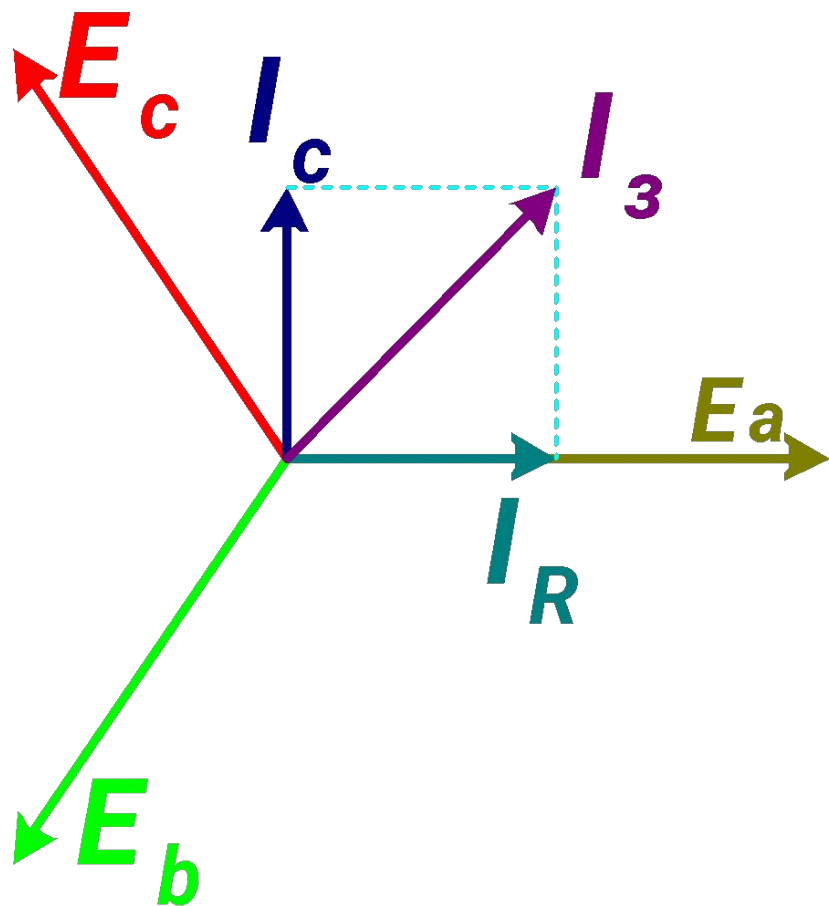


1.4. Сеть с резистивным заземлением нейтрали



Векторная диаграмма в режиме замыкания

$$I_3 = j3\omega E_a C_\phi \sqrt{1 + K_R^2},$$



$$U_N = \frac{U_{Nxx}}{\sqrt{1 + K_R^2}}$$

$$K_R = \frac{X_c}{R} = \frac{1}{3\omega C_\phi R}$$

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).**

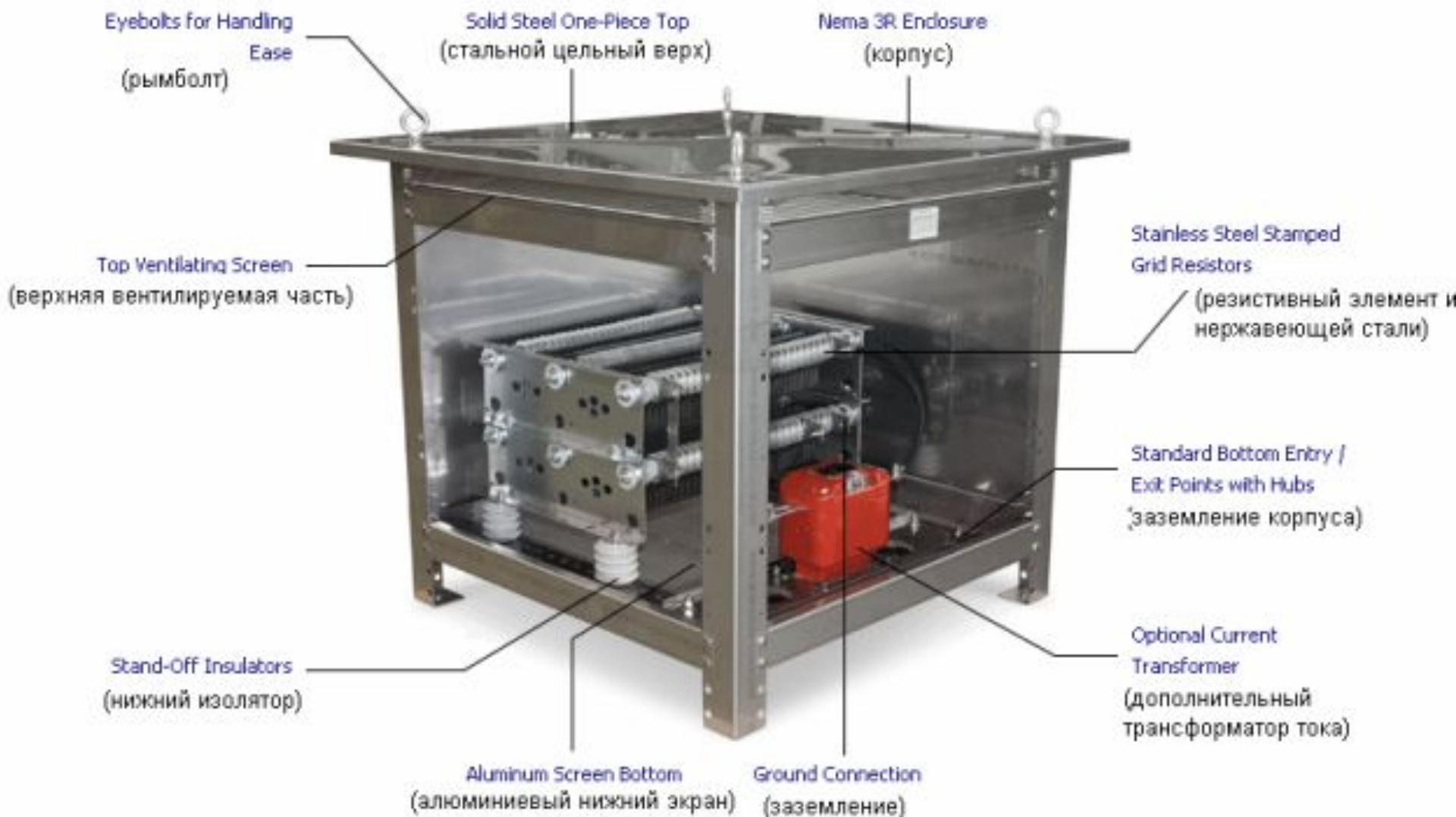
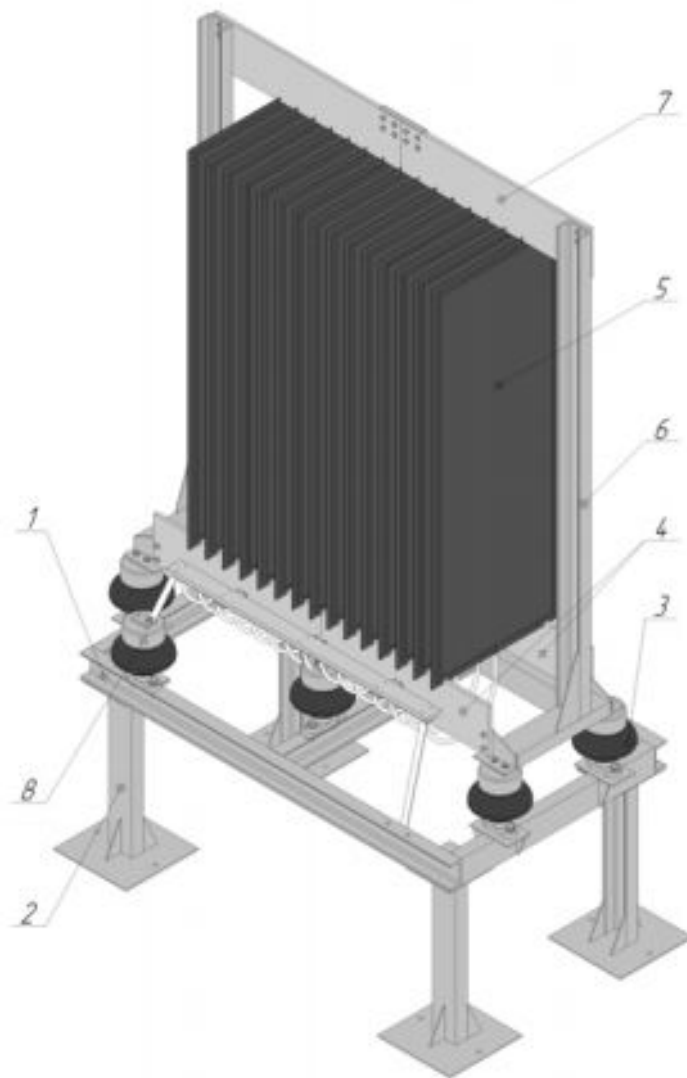


Рисунок 1 Типовая конструкция резистора NGR (США, Post Glover)



*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)

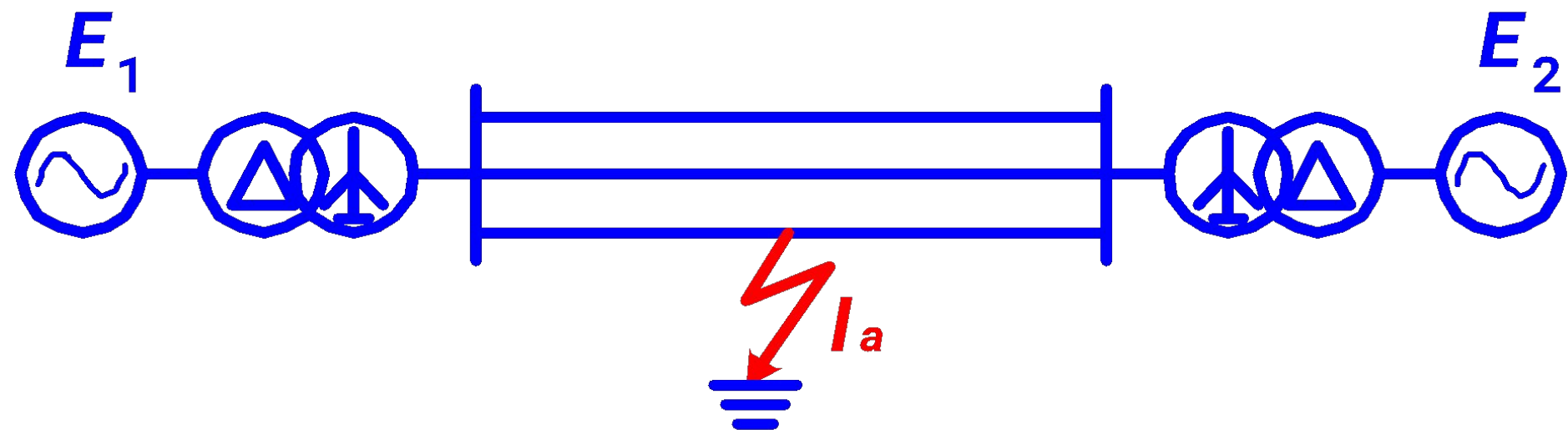
Тип электрической сети	Длительная работа с ОЗЗ	ОЗЗ отключается РЗ
Сети генераторного напряжения	изолированная	изолированная
Сети собственных нужд электрических станций	изолированная, резистор	резистор
Распределительные сети с воздушными линиями	изолированная, резистор	резистор
Городские, поселковые кабельные 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)

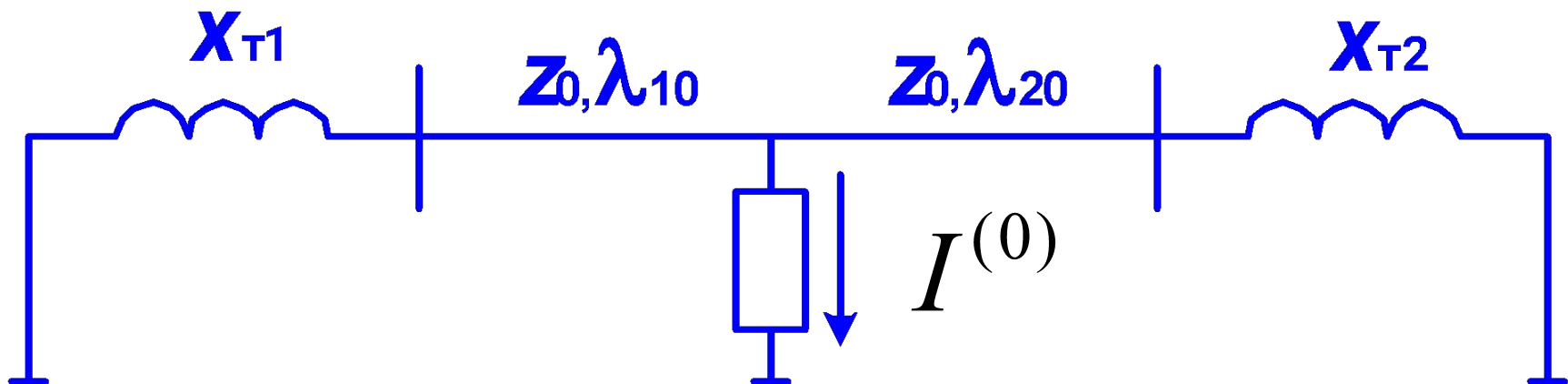
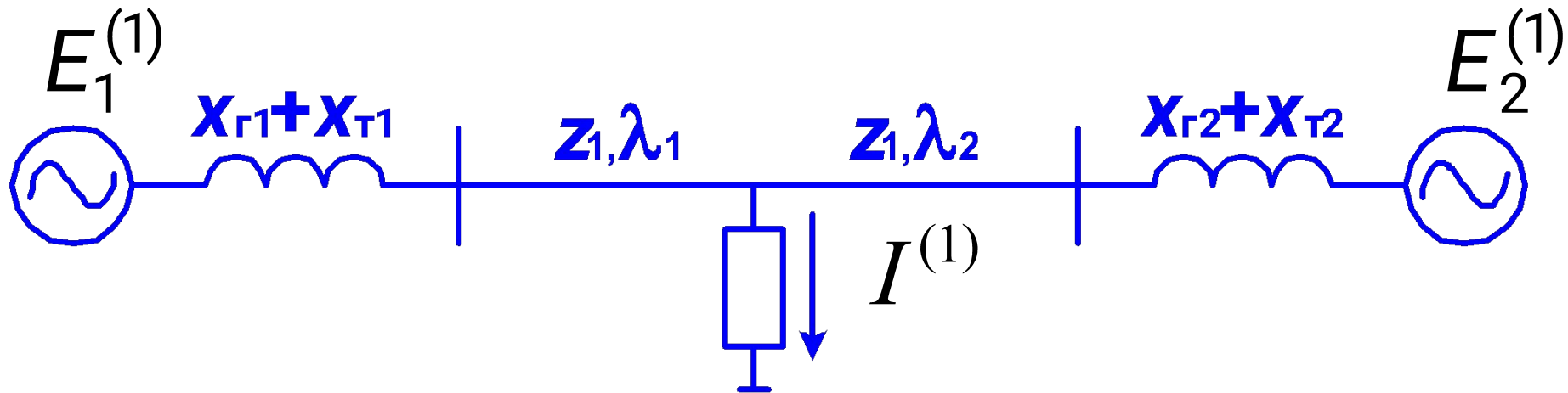
Тип электрической сети	Длительная работа с ОЗЗ	ОЗЗ отключается РЗ
Сети генераторного напряжения	ДГР	изолированная
Сети собственных нужд электрических станций	ДГР	резистор
Распределительные сети с воздушными линиями	резистор (ДГР)	резистор
Городские, поселковые кабельные сети (без ВЛ)	ДГР	резистор
Сети, 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

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

Граничные условия в месте замыкания:

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

Решая совместно полученную систему уравнений, получим:

$$I_a = \frac{3E_{\text{эа}}}{2z_{\text{ВХ}}^{(1)} + z_{\text{ВХ}}^{(0)}}$$

$$U_b = -\frac{3}{2} \cdot \frac{z_{\text{ВХ}}^{(0)}}{2z_{\text{ВХ}}^{(1)} + z_{\text{ВХ}}^{(0)}} E_{\text{эа}} - j \frac{\sqrt{3}}{2} E_{\text{эа}}$$

$$U_c = -\frac{3}{2} \cdot \frac{z_{\text{ВХ}}^{(0)}}{2z_{\text{ВХ}}^{(1)} + z_{\text{ВХ}}^{(0)}} E_{\text{эа}} + j \frac{\sqrt{3}}{2} E_{\text{эа}}$$

Принимая

$$Z_{\text{BX}}^{(1)} = jX_{\text{BX}}^{(1)}; \quad Z_{\text{BX}}^{(0)} = jX_{\text{BX}}^{(0)}$$

обозначив

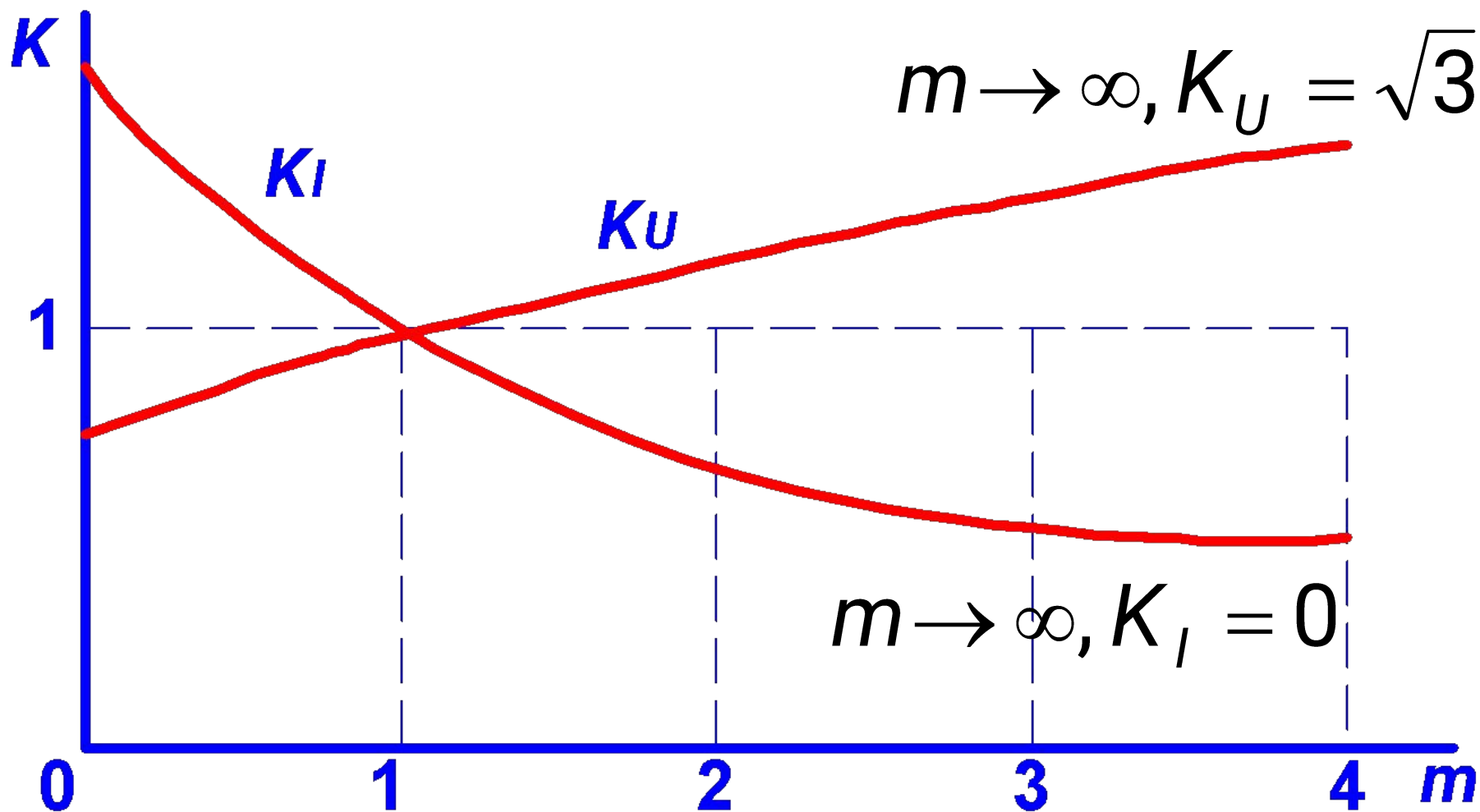
$$\frac{X_{\text{BX}}^{(0)}}{X_{\text{BX}}^{(1)}} = m$$

и переходя к модулям, получаем:

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

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

Зависимости K_U и K_I от параметра m



1.6. Применение низкоомных сопротивлений в нейтрали трансформаторов сети

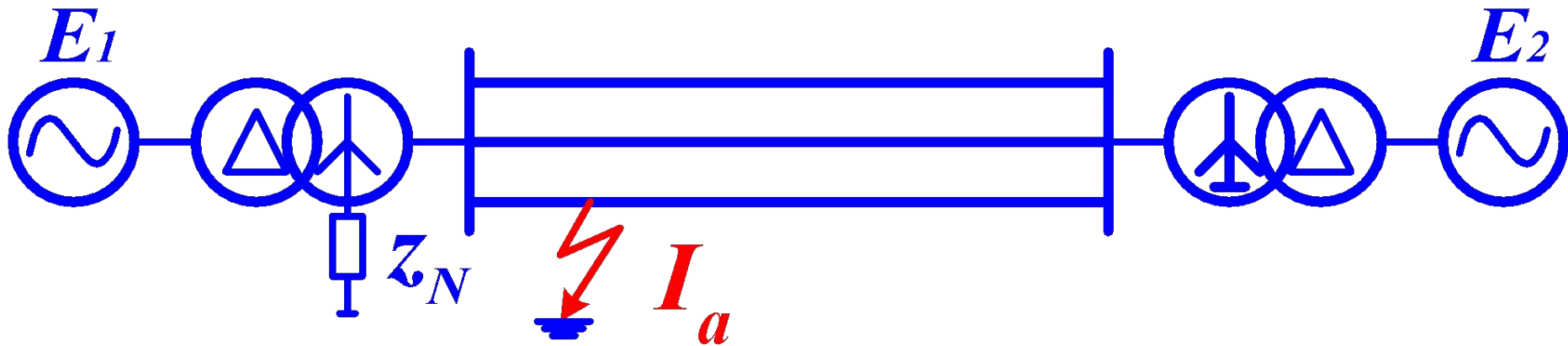
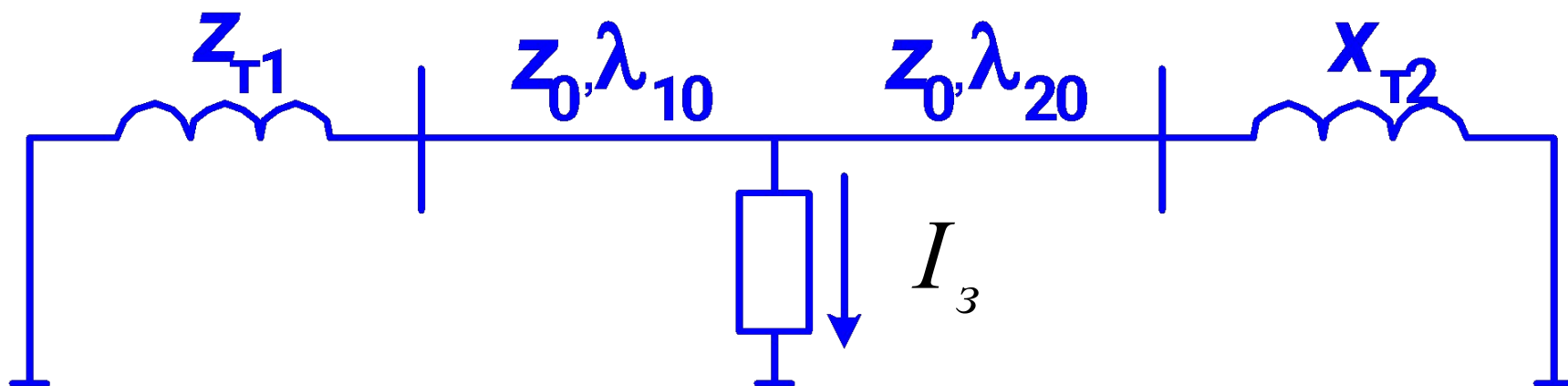


Схема замещения для нулевой последовательности

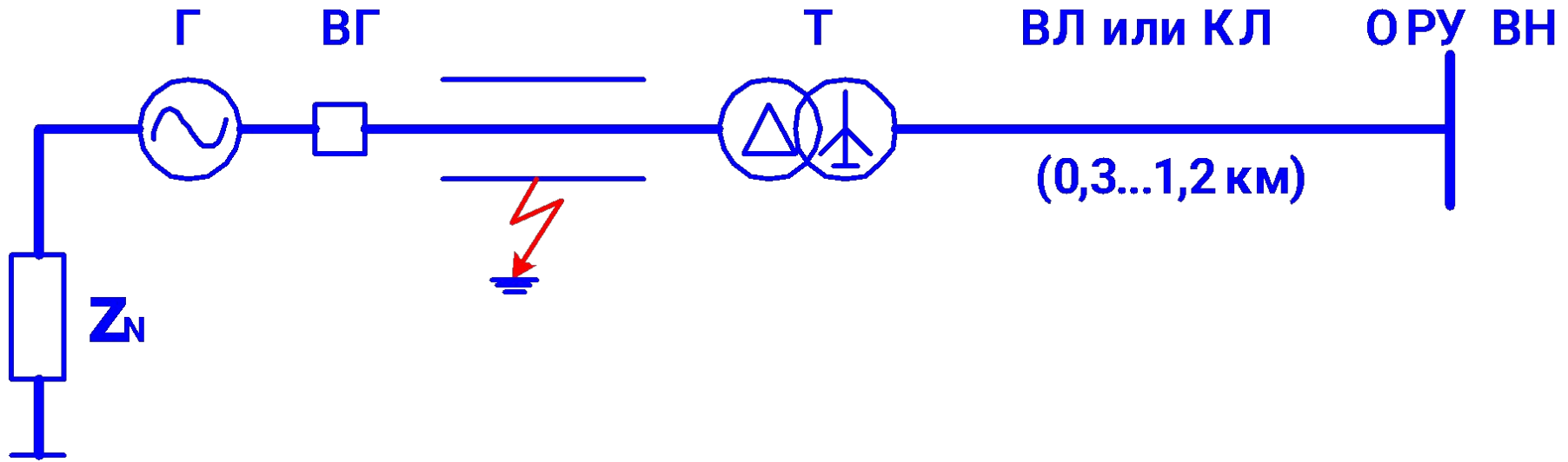


$$z_{T1} = \begin{cases} j(x_{T1} + 3x_N) & \text{при } z_N = jx_N; \\ jx_{T1} + 3R_N & \text{при } z_N = R_N. \end{cases}$$

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



$$I_3 = j3\omega E_a C_\phi,$$

$$C_\phi = C_\Gamma + C_T + C_\Psi + C_{TCH}$$

Емкости блоков генераторного напряжения

$U_{\text{ном}}$, кВ	Тип блока	$C_{\text{ф}}$, мкФ	$P_{\text{бл}}$, 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

$$I_3 = j3\omega E_a C_\phi (1 - K_L),$$

$$K_L = \frac{X_C}{X_L} = \frac{1}{3\omega^2 C_\phi L_N}$$

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 $x = \frac{C_T}{C_r + C_T}$

Рекомендации по условиям эксплуатации ДГК в нейтрали генераторов

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

При резистивном заземлении нейтрали генераторов

$$I_3 = j3\omega E_a C_\phi \sqrt{1 + K_R^2},$$

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

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