

Режим нейтрал электрических сетей

Виды режима нейтрали в электрических сетях

- В трехфазных электрических сетях переменного тока большое значение имеет так называемый режим нейтрали.
- Трехфазные электрические сети имеют точку, которую называют нейтральной точкой трехфазной системы – нейтраль.
- Физически она появляется при соединении в звезду обмоток трансформаторов, генераторов, реакторов и т.п.
- Относительно этой точки измеряют и

- **Нейтраль может быть реальной или рассматриваться как теоретическая точка в сети.**
- **В симметричных электрических сетях при симметричной нагрузке потенциал нейтрали принимается равным нулю, а в случае несимметрии на нейтрали появляется напряжение, которое оценивают относительно земли или гипотетически существующей нейтрали трехфазной системы.**

- **Земля для электрических сетей является проводящей массой с потенциалом равным нулю.**
- **Электрическая сеть связана с землей, и эта связь может быть несущественной для работы электрической сети, но, в большинстве случаев, является определяющей.**

Взаимодействие электрической сети с землей обусловлено:

- проводимостями между проводниками фаз сети и землей, как активной, так и реактивной,**
- наличием заземленного оборудования и,**
- в большой степени, появлением замыканий на землю.**

- Кроме того, в электрических сетях необходимы меры защиты от внутренних (коммутационных и резонансных) и грозových (атмосферных) перенапряжений, которые используют средства защиты, взаимодействующие с землей.
- Эти факторы, а также требования обеспечения безопасности людей, **определяют способ** электрического соединения нейтрали с землей –

Виды режимов нейтрали в сетях разного класса номинальных

Класс номинального

Режим нейтрали

напряжения сети

электрической сети

Низкого напряжения
(до 1000 В)

Изолированная нейтраль

Глухозаземленная

нейтраль

(преимущественно)

**Класс номинального
напряжения сети**

**Среднего напряжения
(3-35 кВ)**

**Режим нейтрали
электрической сети**

Изолированная нейтраль

Резонансно заземленная
(компенсированная) нейтраль

Резистивно заземленная
нейтраль

Комбинированная
(резонансно-резистивно)
заземленная нейтраль

**Высокого напряжения
(110 кВ)**

**Глухозаземленная
нейтраль**

**Эффективно заземленная
нейтраль**

**Высокого,
сверхвысокого
ультравысокого
напряжения (220 кВ и
выше)**

**Глухозаземленная
и нейтраль**

Виды трехфазных систем переменного тока до 1 кВ

- В соответствие с ПУЭ-7, электроустановки в отношении мер электробезопасности разделяются на:
- *электроустановки напряжением **выше 1 кВ** в сетях:*
 - с глухозаземленной или эффективно заземленной нейтралью ;
 - с изолированной нейтралью или заземленной через дугогасящий реактор или резистор нейтралью;

электроустановки напряжением до 1 кВ
в сетях:

с глухозаземленной нейтралью;
с изолированной нейтралью.

- В электрических сетях до 1 кВ **для обозначения нулевого и защитного проводников** в электрических схемах приняты обозначения*:
- ***N*** – нулевой рабочий (нейтральный – neutral) проводник;
- ***PE*** – защитный проводник (заземляющий проводник, нулевой защитный проводник, защитный проводник системы уравнивания потенциалов – protective earthing);
- ***PEN*** – совмещенный нулевой защитный и нулевой рабочий проводники.

Условные обозначения проводников

Изображение	Назначение
	Фазный проводник
	Нулевой рабочий (нейтральный) проводник (N)
	Защитный проводник (PE)
	Нулевой рабочий (нейтральный) проводник (N) и защитный проводник (PE), объединенные в один (PEN)

- **Режим заземления
нейтрالي и открытых
проводящих частей
обозначается двумя
буквами:**

**□ первая указывает режим
заземления нейтрали
источника питания
(силового**

□ Вторая – открытых проводящих частей.

В обозначениях используются начальные буквы французских слов:

✓ **T** (terre – земля) – заземлено;

✓ **N** (neutre – нейтраль) –
присоединено к нейтралю
источника;

✓ **I** (isole) – изолировано.

В электроустановках напряжением до 1 кВ приняты следующие трехфазные системы:

- **система *TN*** – система, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали источника посредством нулевых защитных проводников;

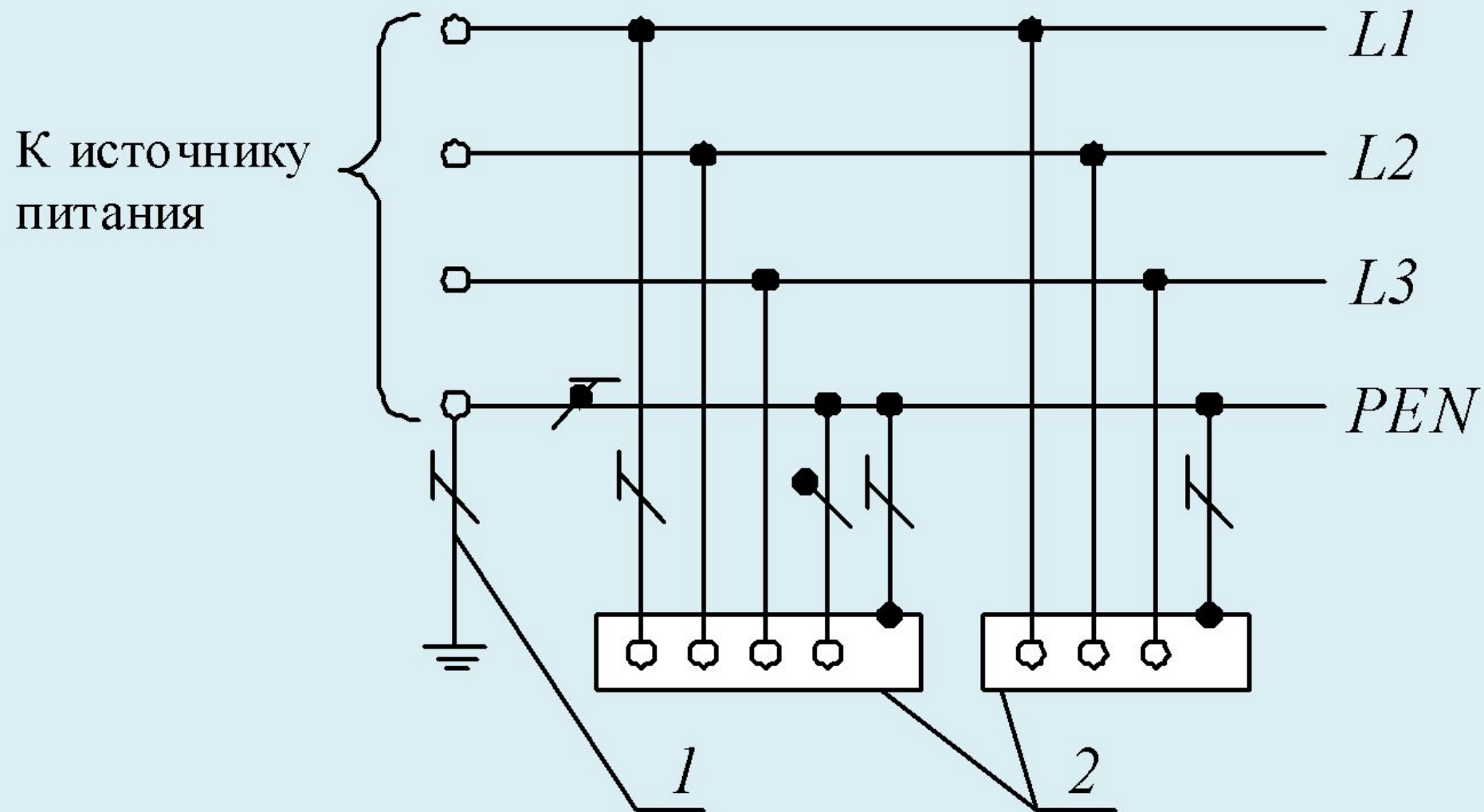
система *TN-C* – система *TN*, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике на всем ее протяжении (*C* – первая буква английского слова *combined* – объединенный);

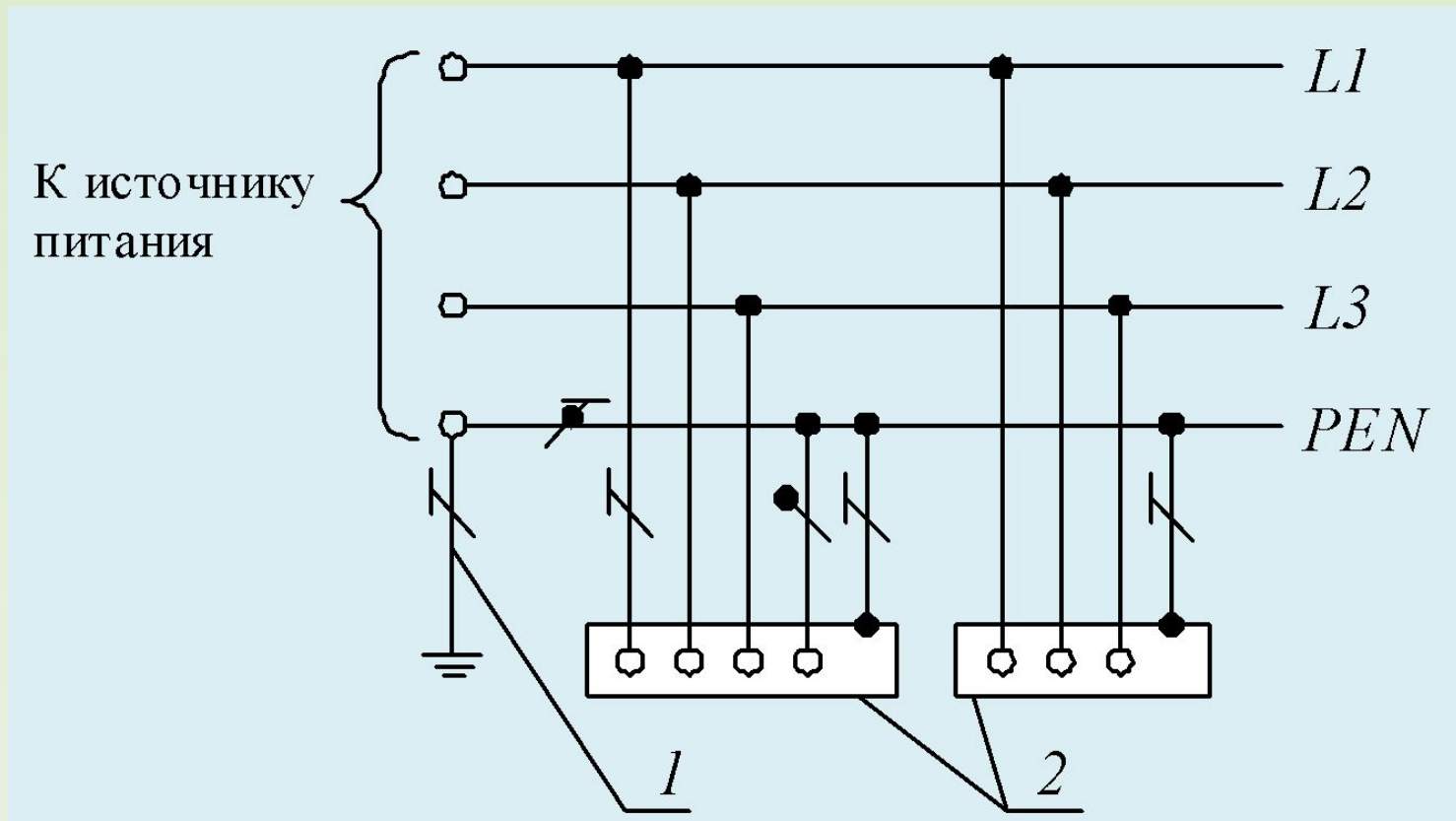
• **система *TN-S*** – система *TN*, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены на всем ее протяжении (*S* – первая буква английского слова *separated* – *раздельный*);

- **система *TN-C-S*** – система *TN*, в которой функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном проводнике в какой-то ее части, начиная от источника питания;

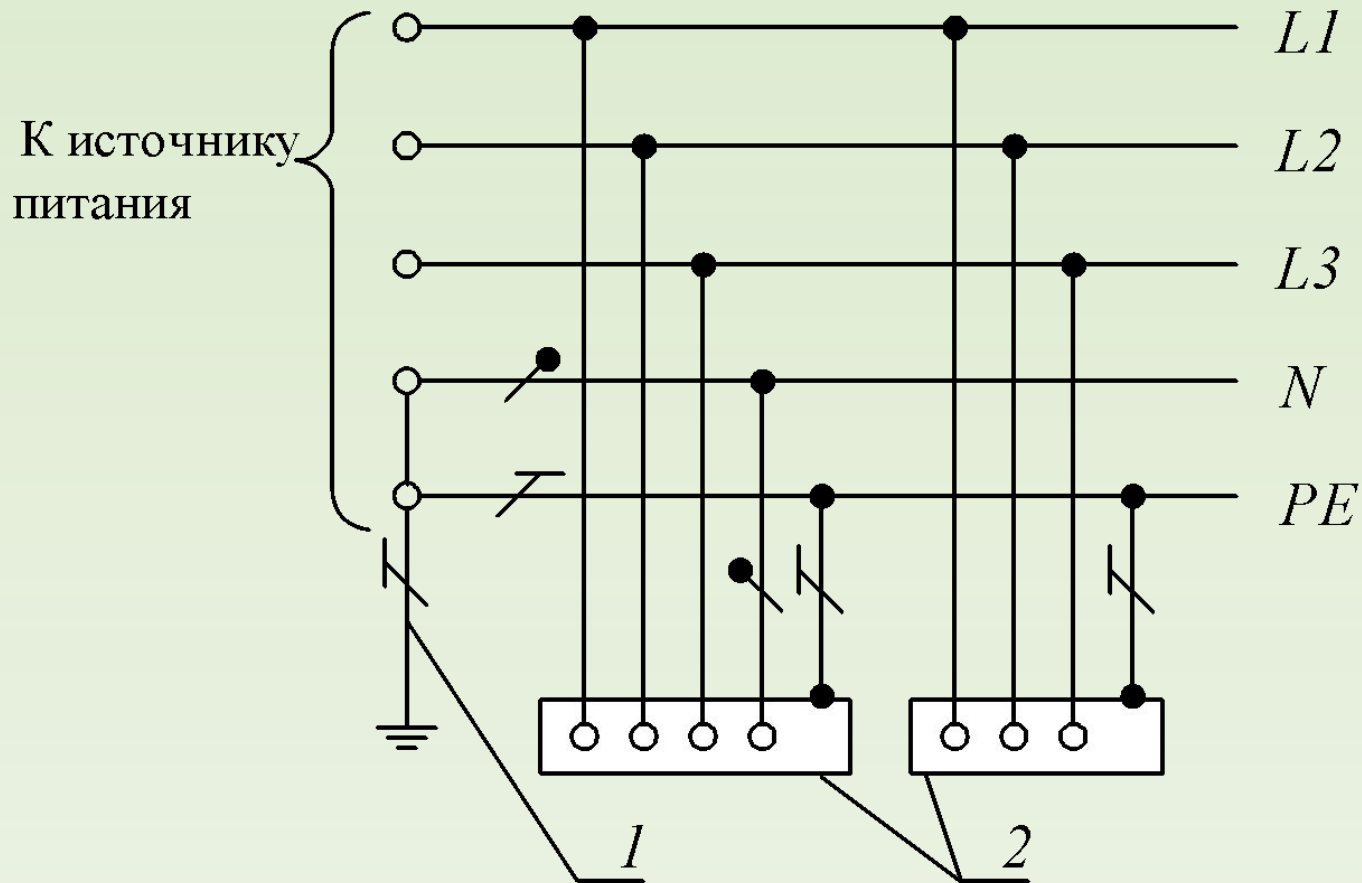
система *IT* – система, в которой нейтраль источника питания изолирована от земли или заземлена через приборы или устройства, имеющие большое сопротивление, а открытые проводящие части электроустановки заземлены;

система TT – система, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки заземлены при помощи заземляющего устройства, электрически независимого от глухозаземленной нейтрали источника.

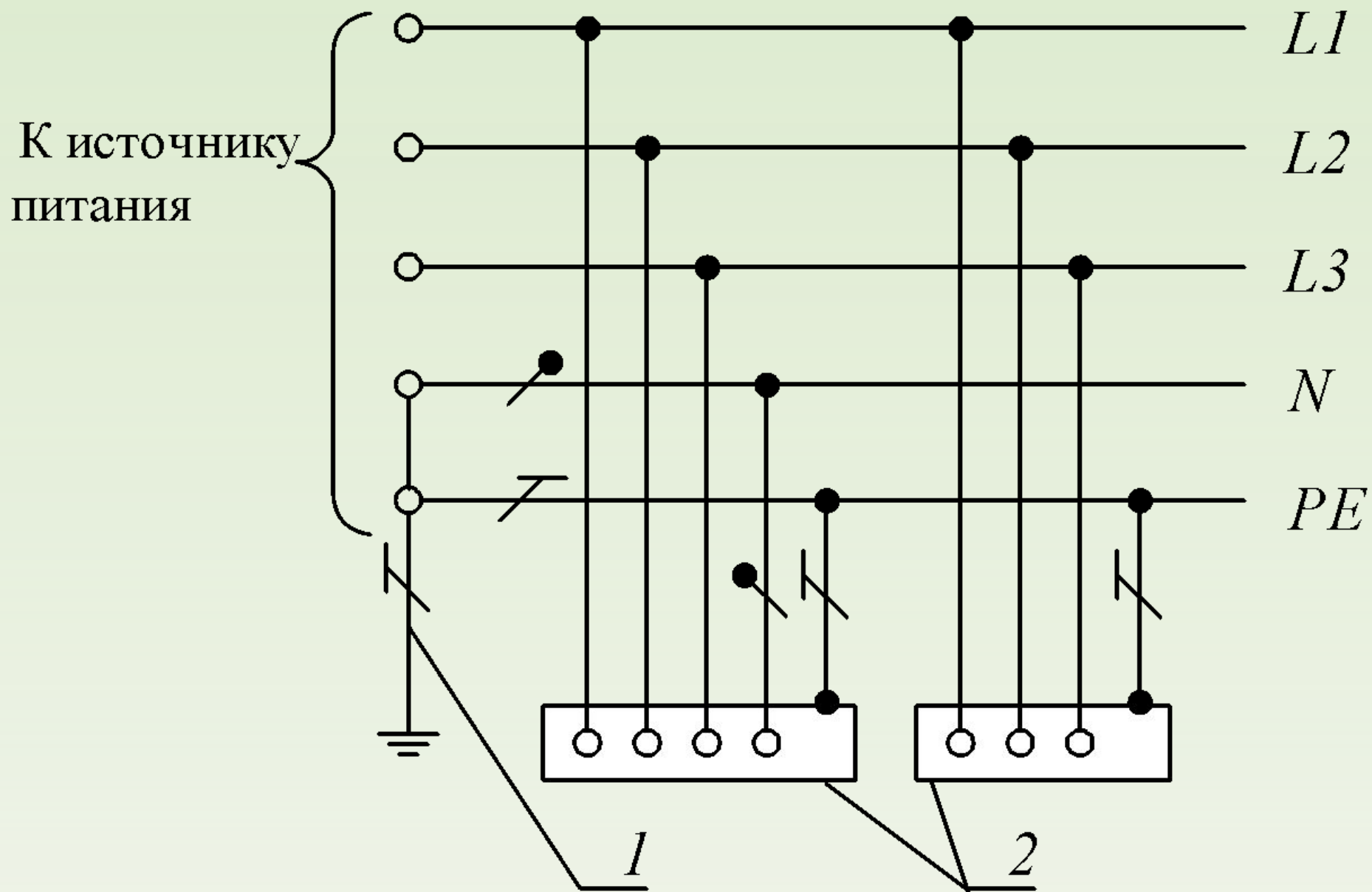


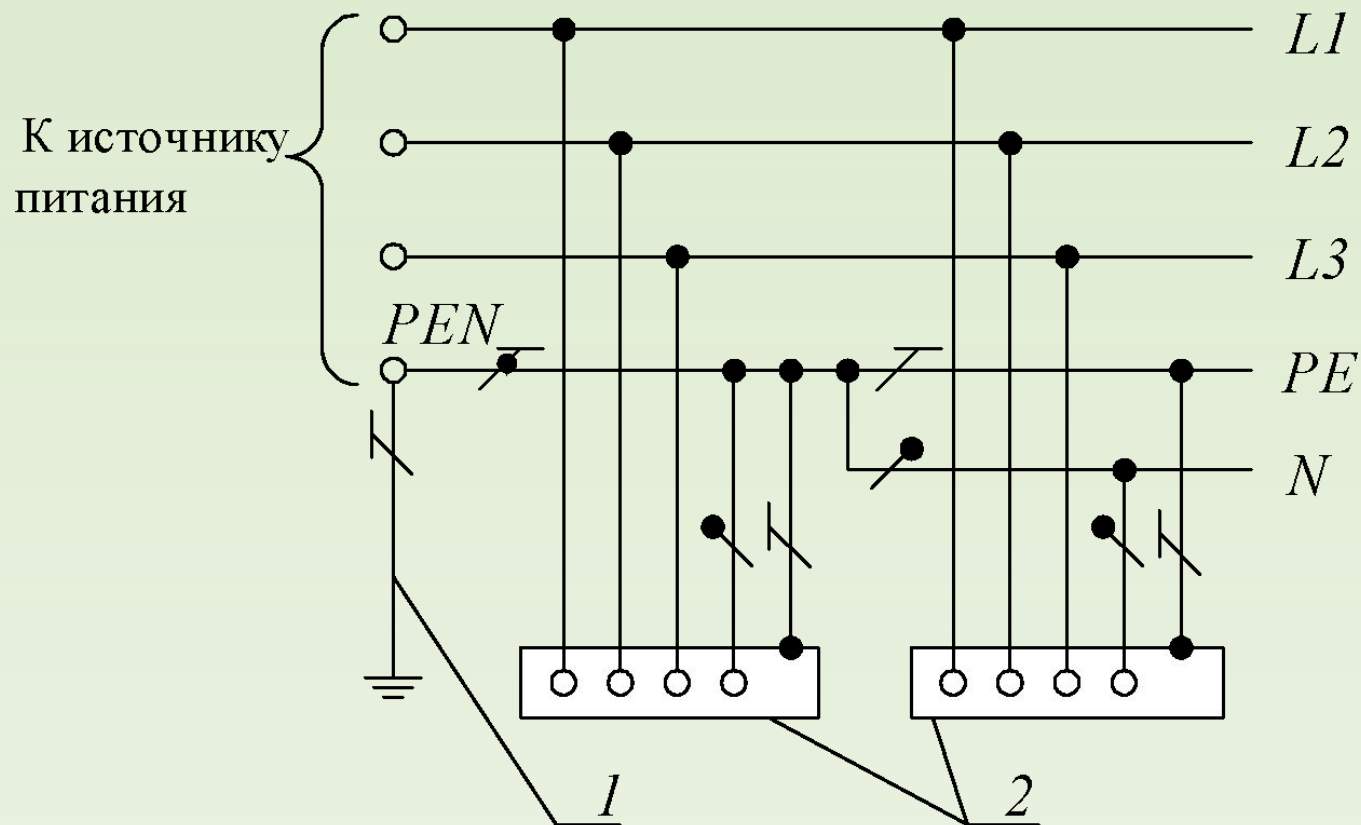


Система TN-C переменного тока. Нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике *PEN*: 1 – заземлитель нейтрали (средней точки) источника питания; 2 – открытые проводящие части;

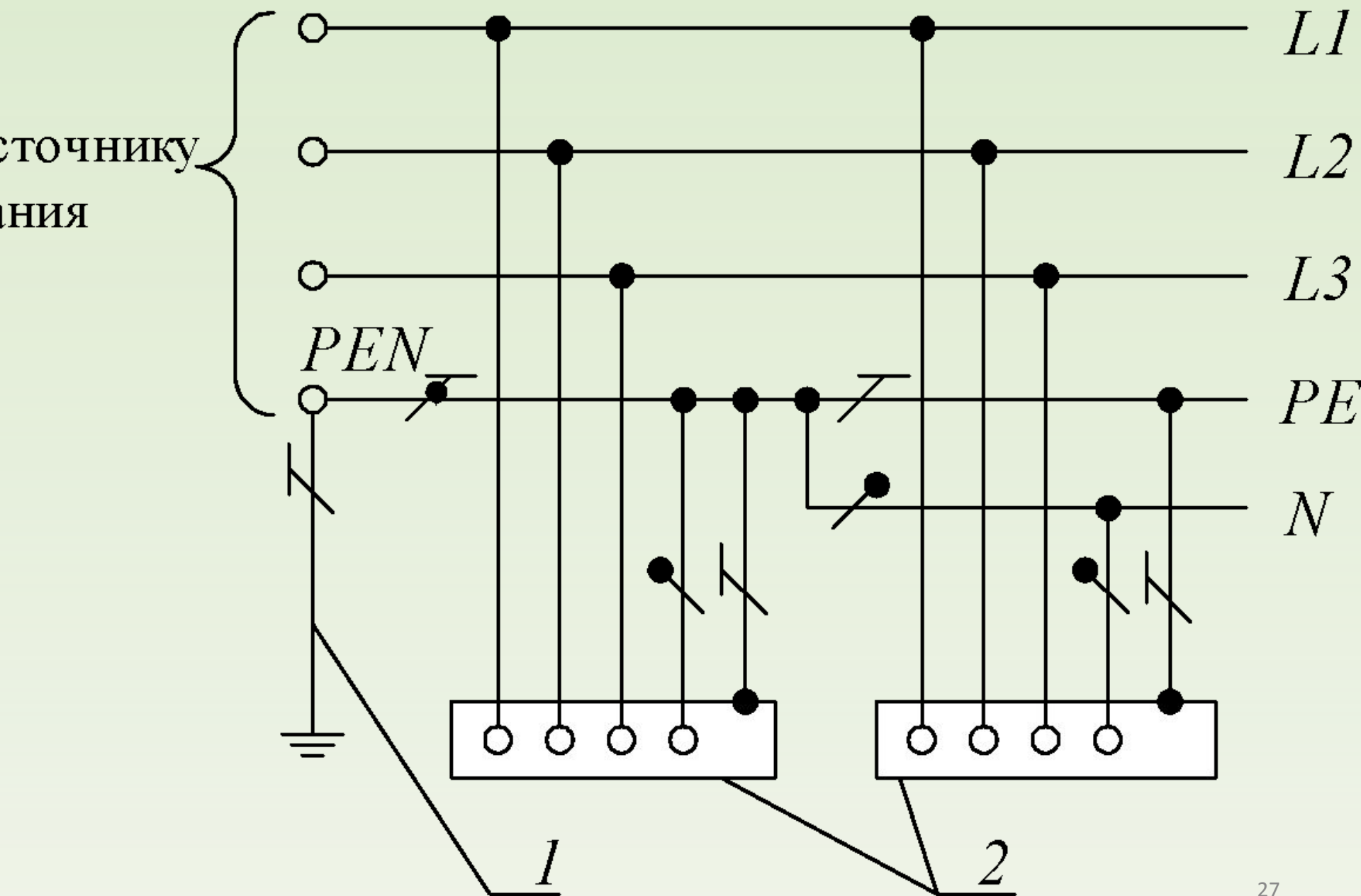


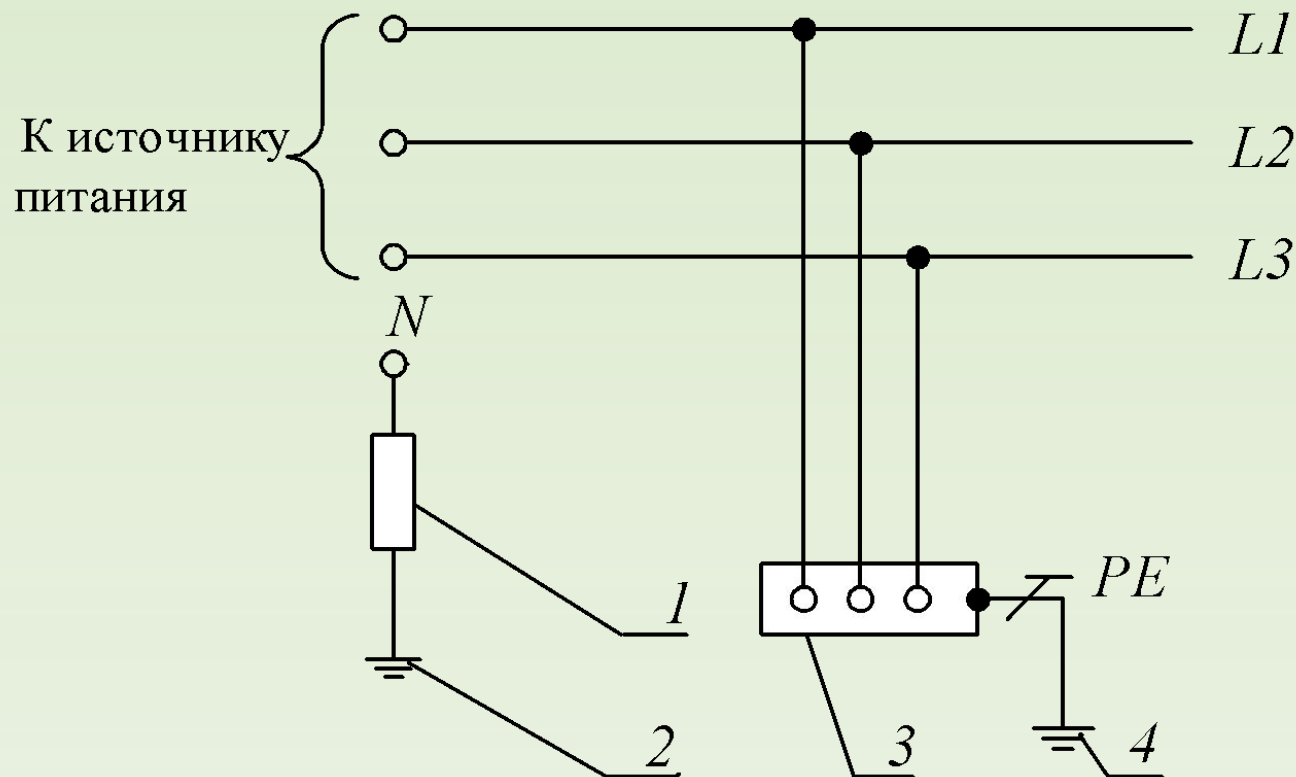
Система *TN-S* переменного тока. Нулевой защитный PE и нулевой рабочий N проводники разделены: 1 – заземлитель нейтрали источника питания; 2 – открытые проводящие части.



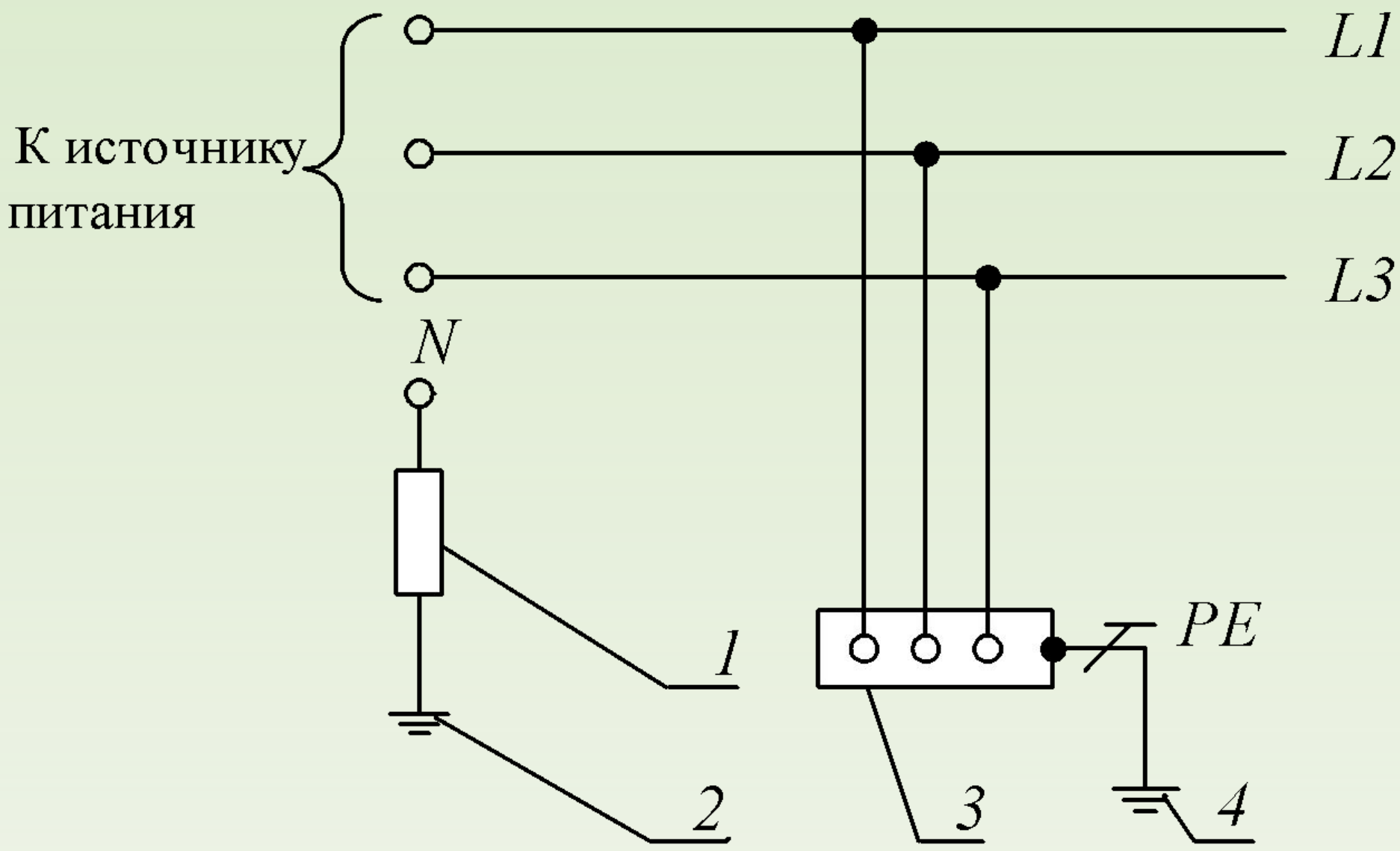


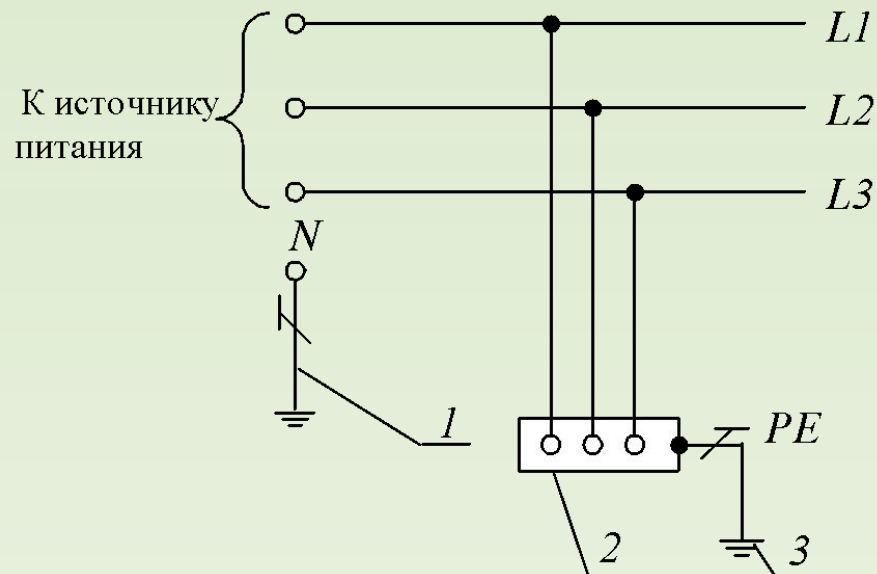
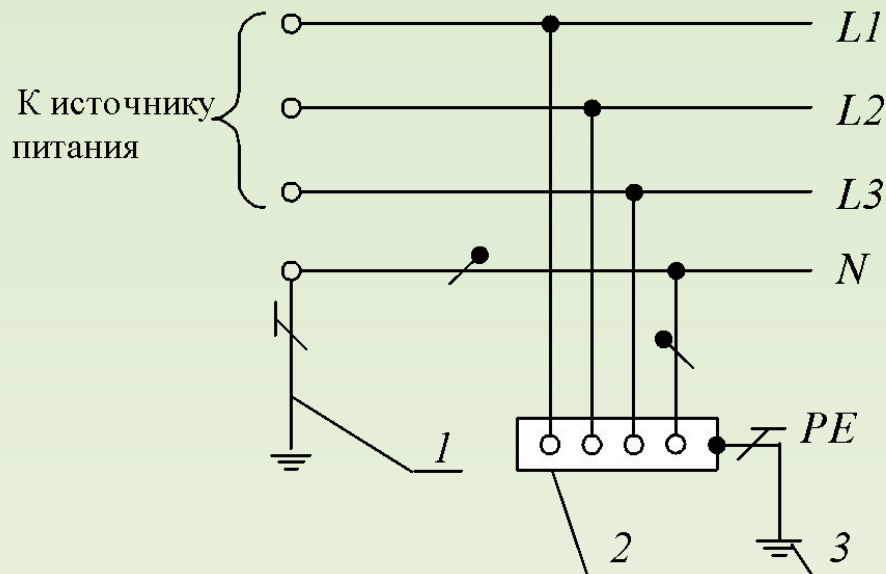
Система *TN-C-S* переменного тока. Нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике в части системы: 1 – заземлитель нейтрали источника питания; 2 – открытые проводящие части.



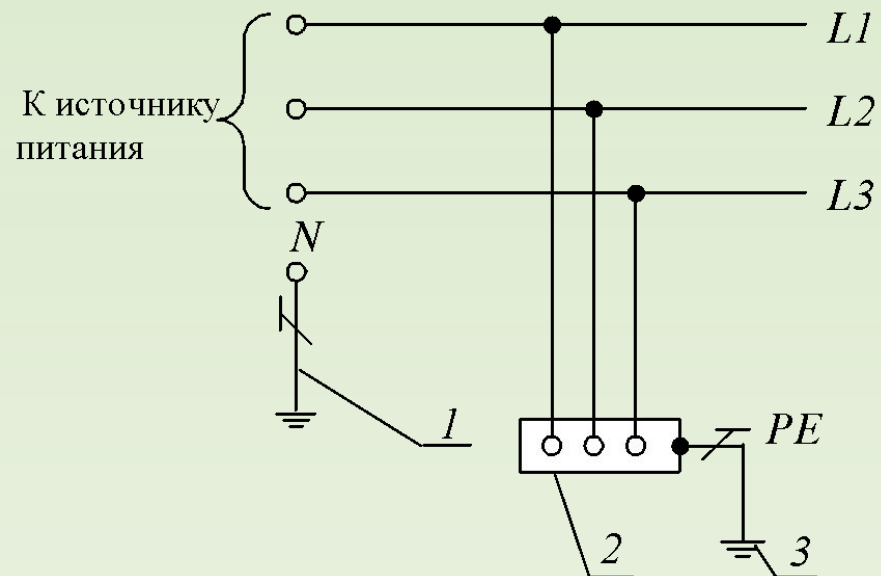
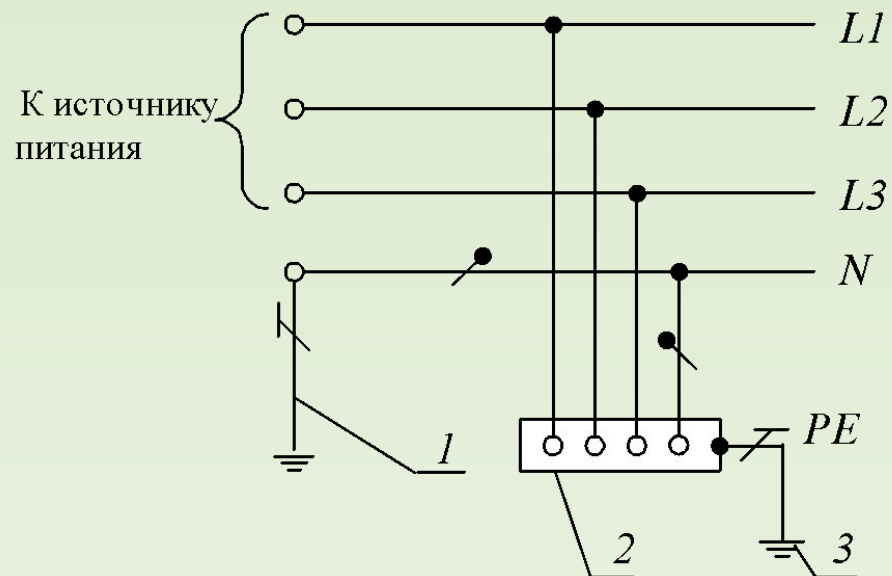


Система IT переменного тока. Открытые проводящие части электроустановки заземлены. Нейтраль источника питания изолирована от земли или заземлена через большое сопротивление: 1 – сопротивление заземления нейтрали источника питания (если имеется); 2 – заземлитель; 3 – открытые проводящие части; 4 – заземляющее устройство электроустановки.





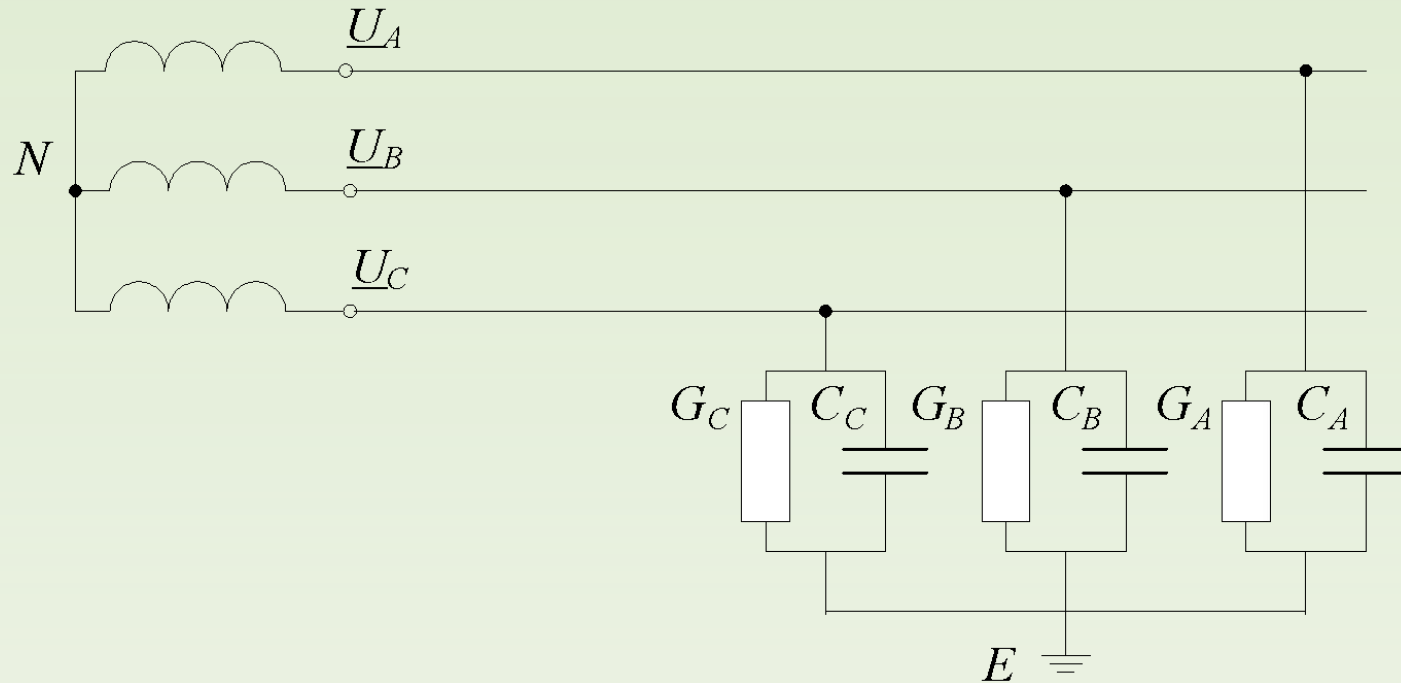
Система *TT* переменного тока. Открытые проводящие части электроустановки заземлены при помощи заземления, электрически независимого от заземлителя нейтрали: 1 – заземлитель нейтрали источника питания; 2 – открытые проводящие части; 3 – заземлитель открытых проводящих частей электроустановки;



Электрические сети 6-35 кВ с изолированной нейтралью

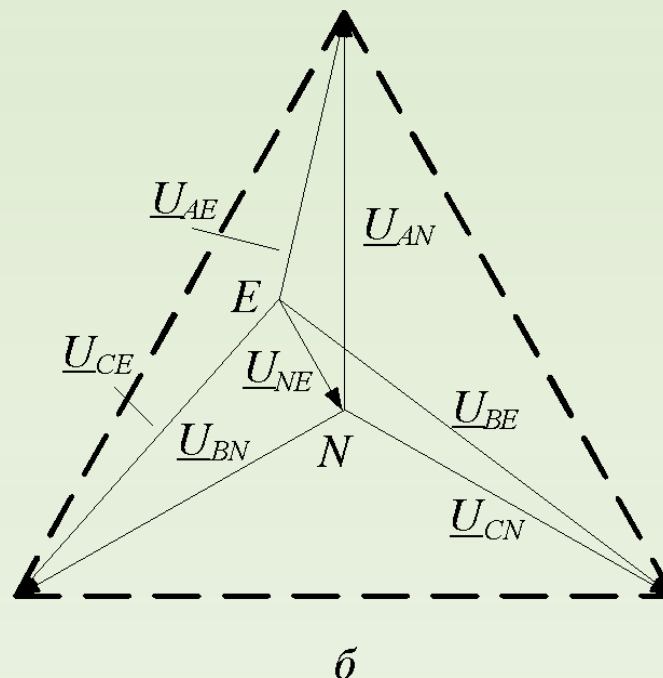
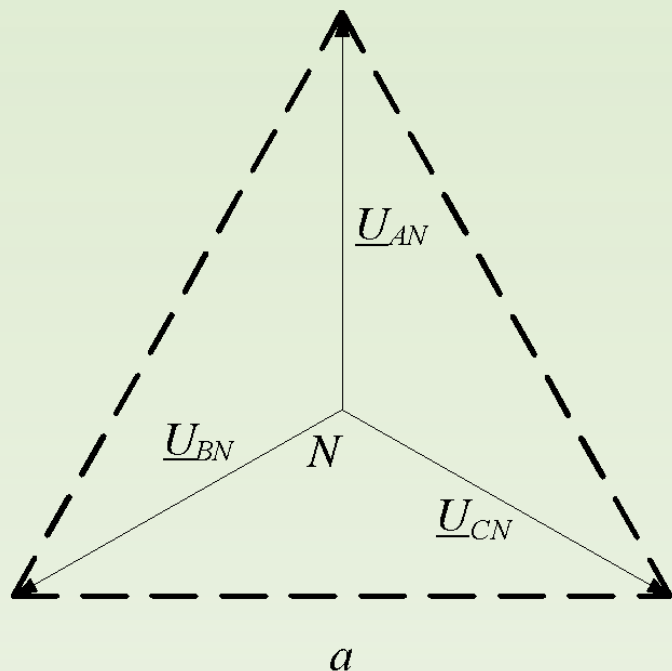
- В трехфазных электрических сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью существенное влияние на потенциал нейтрали оказывают фазные проводимости утечки токов через изоляцию линий и емкости проводов фаз относительно земли, рис.

Схема замещения сети с изолированной нейтралью



Рассматриваемая сеть имеет две характерные точки – N и E . Положение точки N в треугольнике линейных напряжений для мощной электрической сети неизменно.

Векторные диаграммы напряжений сети с изолированной нейтралью



Физически точка N это точка соединения обмоток генератора или трансформатора в звезду. В электрических сетях с изолированной нейтралью физическая нейтраль совпадает с точкой N .

- Положение второй точки E в треугольнике линейных напряжений не является неизменным и зависит от симметрии фазных проводимостей сети и нагрузки. Физически точка E представляет в электрических сетях с изолированной нейтралью потенциал земли.
- В симметричном режиме при симметрии параметров фаз сети фазные напряжения одинаковы по величине.

$\underline{U}_{NE}$ – напряжение смещения нейтрали.

В случае различия проводимостей фаз относительно земли потенциал точки E становится отличным от нуля, рис, б. В этом случае можно записать:

$$\underline{U}_{AE} = \underline{U}_{AN} + \underline{U}_{NE};$$

$$\underline{U}_{BE} = \underline{U}_{BN} + \underline{U}_{NE};$$

$$\underline{U}_{CE} = \underline{U}_{CN} + \underline{U}_{NE}.$$

Запишем первое уравнение Кирхгофа для точки (узла) E

$$\underline{U}_{AE} \underline{Y}_A + \underline{U}_{BE} \underline{Y}_B + \underline{U}_{CE} \underline{Y}_C = 0.$$

Подставим в него записанные выражения для напряжений фаз относительно E , получим:

$$\underline{U}_{AN}\underline{Y}_A + \underline{U}_{BN}\underline{Y}_B + \underline{U}_{CN}\underline{Y}_C = -\underline{U}_{NE}(\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C).$$

В симметричном режиме в левой части:

$$\underline{Y}(\underline{U}_{AN} + \underline{U}_{BN} + \underline{U}_{CN}) = \underline{Y}U_{\phi}(1 + \underline{a}^2 + \underline{a}) = 0,$$

где $\underline{a}^2 = e^{-j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$. $\underline{a} = e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

Следовательно и $\underline{U}_{NE} = 0$.

В случае несимметрии параметров сети напряжение смещения нейтрали $\underline{U}_{NE}$:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{NE} &= -\frac{\underline{U}_{AN}\underline{Y}_A + \underline{U}_{BN}\underline{Y}_B + \underline{U}_{CN}\underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = -\frac{U_\phi(\underline{Y}_A + \underline{a}^2\underline{Y}_B + \underline{a}\underline{Y}_C)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = \\ &= -\frac{U_\phi\left[(G_A + jB_A) + \underline{a}^2(G_B + jB_B) + \underline{a}(G_C + jB_C)\right]}{(G_A + jB_A) + (G_B + jB_B) + (G_C + jB_C)}.\end{aligned}$$

$$G_A = G_B = G_C = G$$

$$\begin{aligned}\underline{U}_{NE} &= -\frac{U_\phi(G + \underline{a}^2G + \underline{a}G) + jU_\phi(B_A + \underline{a}^2B_B + \underline{a}B_C)}{3G + j(B_A + B_B + B_C)} = \\ &= -\frac{j\omega U_\phi(C_A + \underline{a}^2C_B + \underline{a}C_C)}{3G + j\omega(C_A + C_B + C_C)}.\end{aligned}$$

Обозначим суммарную емкость проводов фаз относительно земли C_s . После преобразования получим

$$\begin{aligned}\underline{U}_{NE} &= -\frac{j\omega U_\phi (C_A + \underline{a}^2 C_B + \underline{a} C_C)}{j\omega C_s \left(1 + \frac{3G}{j\omega C_s}\right)} = -\frac{U_\phi (C_A + \underline{a}^2 C_B + \underline{a} C_C)}{C_s \left(1 - \frac{j3G}{\omega C_s}\right)} = \\ &= -\frac{U_\phi \underline{u}_0}{(1 - jd)} = -\frac{\underline{U}_{\text{НС}}}{(1 - jd)},\end{aligned}$$

$$\underline{u}_0 = \frac{C_A + \underline{a}^2 C_B + \underline{a} C_C}{C_s}$$

степень несимметрии
электрической сети,
обусловленный
неравенством емкостей
проводов фаз относительно
земли;

$\underline{U}_{\text{нс}} = U_{\text{ф}} \underline{u}_0$ – напряжение несимметрии;

$d = \frac{3G}{\omega C_s}$ – коэффициент успокоения сети с изолированной нейтралью.

Среднее значение коэффициента d для ВЛ с нормальным состоянием изоляции может быть принят 0,02...0,06, а при загрязнении и увлажнении изоляции его значение достигает 0,1; для кабельных линий $d = 0,02...0,04$, но для кабелей с состарившейся изоляцией может достигать 0,06.

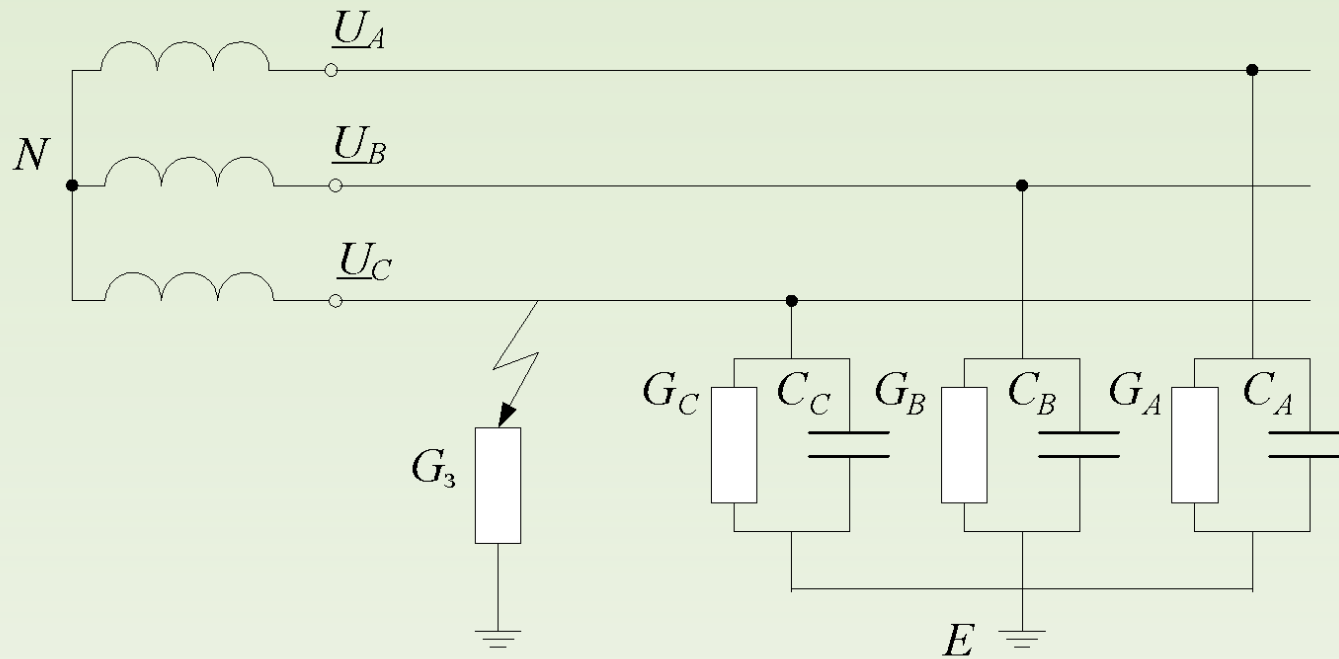
Вследствие малых значений коэффициента успокоения напряжение смещения нейтрали может быть принято равным напряжению несимметрии.

Однофазное замыкание на землю в сети

3-35 кВ с изолированной нейтралью

- Однофазные замыкания в электрической сети могут быть металлическими (наглухо) или через некоторое сопротивление $R_3 = 1/G_3$. Это сопротивление связано с тем, что замыкание может происходить через ветки деревьев или путем перекрытия через загрязненную изоляцию, а также во время начальной стадии пробоя кабеля или через дугу.

Схема замещения сети с изолированной нейтралью при однофазном замыкании фазы C на землю



Уравнение Кирхгофа

$$\underline{U}_{AE} \underline{Y}_A + \underline{U}_{BE} \underline{Y}_B + \underline{U}_{CE} (\underline{Y}_C + G_3) = 0,$$

$$\underline{U}_{NE} = - \frac{\underline{U}_{AN} \underline{Y}_A + \underline{U}_{BN} \underline{Y}_B + \underline{U}_{CN} (\underline{Y}_C + G_3)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + G_3}.$$

$$\underline{U}_{NE} = - \frac{U_{\phi} j\omega (C_A + \underline{a}^2 C_B + \underline{a} C_C) + \underline{U}_{CN} G_3}{(3G + G_3) + j\omega (C_A + C_B + C_C)}.$$

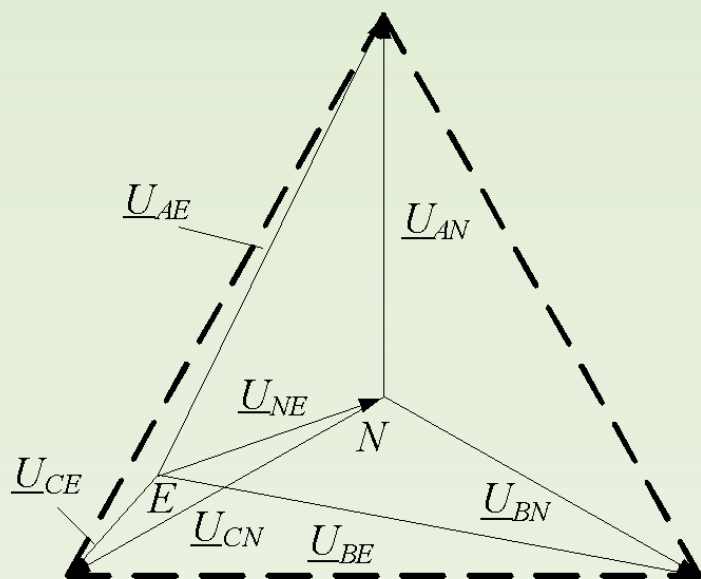
Если считать

$$C_A = C_B = C_C = C_{cp} = (C_A + C_B + C_C) / 3$$

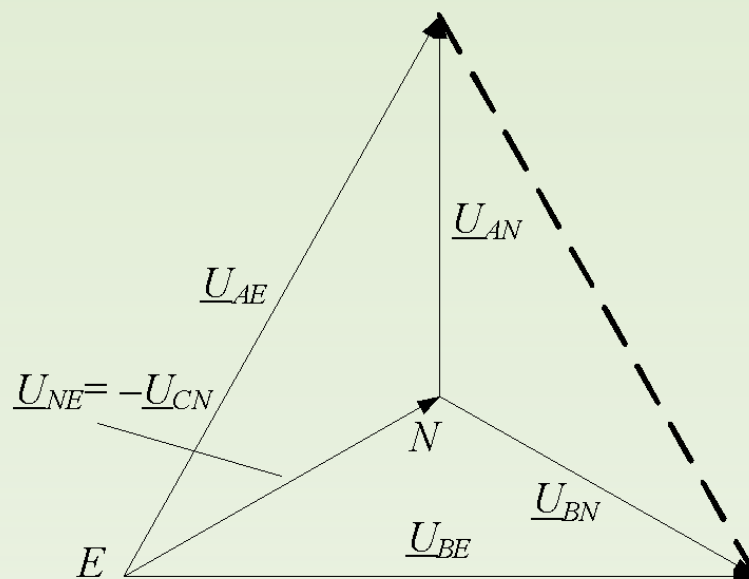
и $G_3 \gg G$ то

$$\underline{U}_{NE} \approx -\frac{\underline{U}_{CN} G_3}{G_3 + j\omega 3C_{cp}} = -\frac{\underline{U}_{CN}}{1 + j\frac{3\omega C_{cp}}{G_3}}.$$

Векторные диаграммы напряжений сети с изолированной нейтралью при замыкании фазы C на землю



a

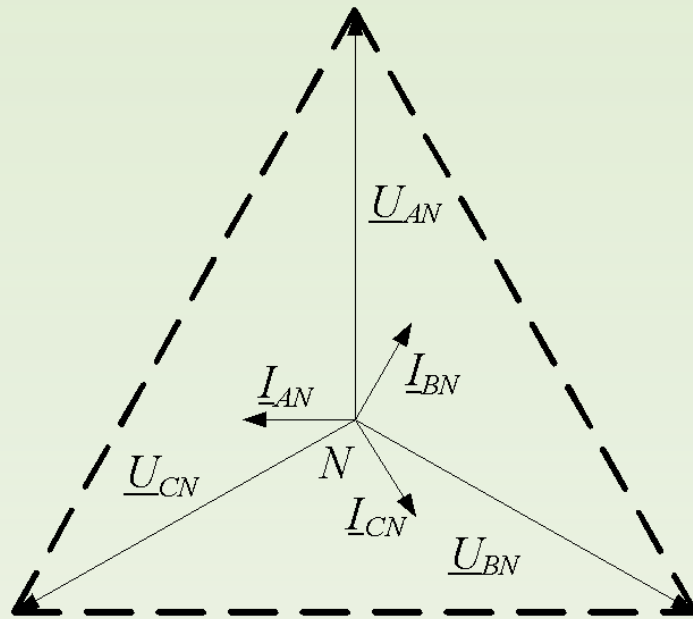


b

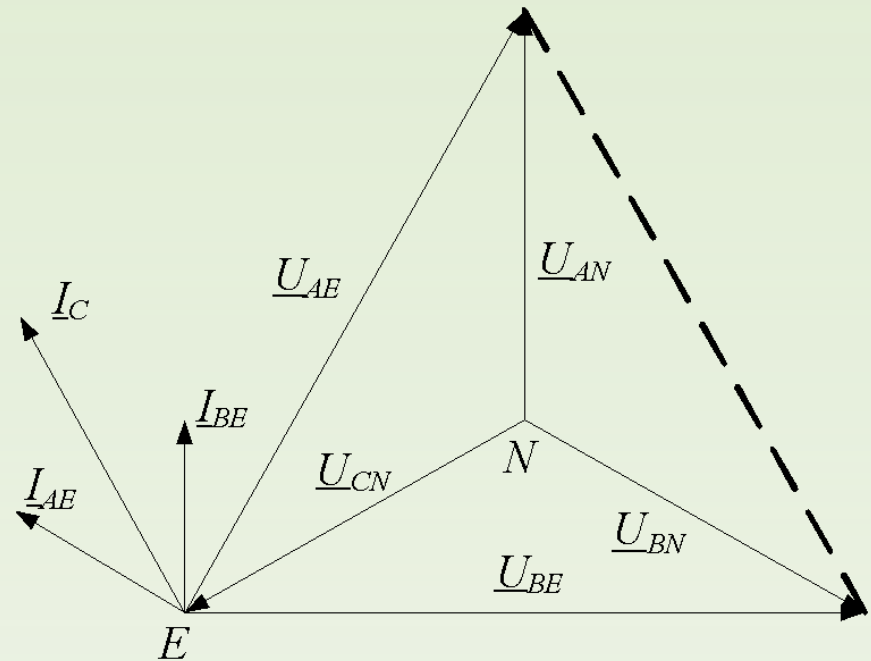
a – при наличии сопротивления R_3 ; b – металлическое замыкание

- В нормальном режиме токи в емкостных проводимостях в сети с симметричными параметрами одинаковы по величине, опережают напряжения фаз на 90° и в сумме равны нулю, рис., а.
- При однофазном металлическом замыкании на землю напряжения двух здоровых фаз ориентированы по сторонам равностороннего треугольника и увеличены в корень из 3-х раз. Емкостные токи в этих фазах также увеличены в корень из 3-х раз и опережают напряжения на емкостях соответствующих фаз на 90° .
- Сумма емкостных токов здоровых фаз равна утроенному значению емкостного фазного тока $I_C = 3I_{C\phi}$, рис., б.

Векторные диаграммы токов и напряжений сети с изолированной нейтралью



a



б

в нормальном режиме – *a* и при металлическом замыкании фазы С на землю – *б*

Величину емкостного тока замыкания на землю
(при пренебрежении несимметрией емкостей фаз)
можно приближенно вычислить через среднюю
емкость фаз:

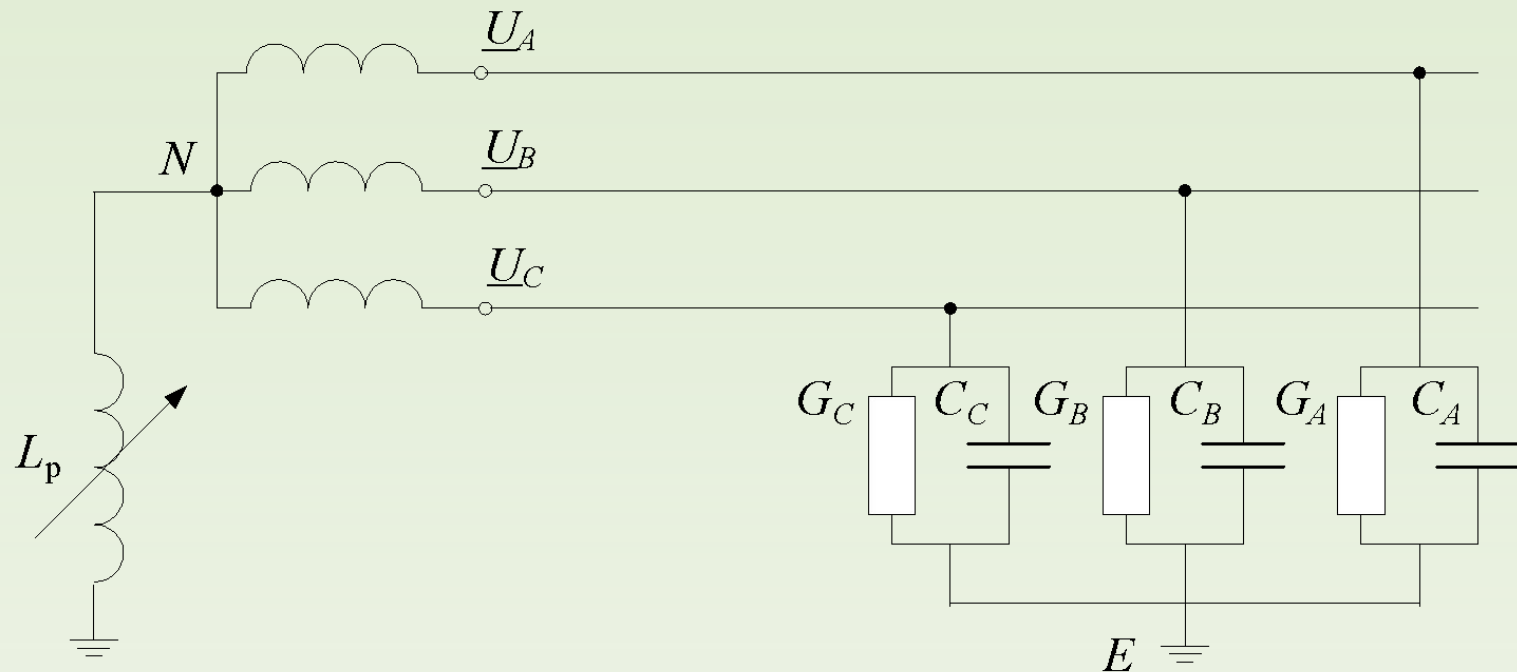
$$I_C = 3I_{C\phi} = 3\omega C_{cp} U_{\phi} = \sqrt{3}\omega C_{cp} U,$$

Электрические сети 6-35 кВ с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор



- Нейтраль системы N заземлена через специальную катушку с индуктивностью L_p , называемую дугогасящей катушкой или дугогасящим реактором (ДГР).

Схема замещения сети с компенсированной нейтралью



Напряжение смещения нейтрали $\underline{U}_{NE}$:

$$\underline{U}_{NE} = -\frac{j\omega U_{\phi}(C_A + \underline{a}^2 C_B + \underline{a} C_C)}{3G + j\omega C_S - j\frac{1}{\omega L_p}}.$$

Разделим числитель и знаменатель на $j\omega C_S$, получим:

$$\underline{U}_{NE} = -U_{\phi} \frac{\frac{(C_A + \underline{a}^2 C_B + \underline{a} C_C)}{C_S}}{\frac{3G}{j\omega C_S} + \frac{1}{\omega C_S} - \frac{1}{\omega L_p}} = -U_{\phi} \frac{\underline{u}_{\text{фс}}}{v - jd} = -\frac{\underline{U}}{v - jd},$$

$$\underline{u}_0 = \frac{C_A + \underline{a}^2 C_B + \underline{a} C_C}{C_S}$$

степень несимметрии
электрической сети;

$$\underline{U}_{\text{нс}} = U_{\phi} \underline{u}_0 - \text{напряжение несимметрии;}$$

$$d = \frac{3G}{\omega C_S} \quad \text{коэффициент успокоения сети;}$$

$$v = \frac{\omega C_S - \frac{1}{\omega L_p}}{\omega C_S} = 1 - \frac{1}{\omega^2 C_S L_p} = 1 - k$$

коэффициент,
характеризующий степень
расстройки контура $L_p - C_S$
по отношению к
резонансному состоянию;

k – коэффициент, называемый степенью настройки
резонансного контура.

В зависимости от величины $\frac{1}{\omega L_p}$

может быть три случая работы сети с компенсированной нейтралью:

$$\omega C_s > \frac{1}{\omega L_p}$$

степень расстройки ν имеет положительное значение. Сеть работает с недокомпенсацией.

$$\omega C_s = \frac{1}{\omega L_p}$$

расстройка равна нулю $\nu = 0$. В сети имеет место резонансная настройка. В этом случае через нейтраль протекает ток несимметрии, определяемый напряжением несимметрии сети и активными проводимостями утечки.

$$\omega C_s < \frac{1}{\omega L_p}$$

степень расстройки имеет отрицательное значение. В этом случае сеть работает с перекомпенсацией. С увеличением индуктивной проводимости сеть переходит в режим работы с глухозаземленной нейтралью.

При резонансной настройке сети напряжение смещения нейтрали по величине (модулю):

$$U_{NE} = \frac{U_{\text{НС}}}{d}.$$

Для сети с компенсированной нейтралью коэффициент успокоения сети d больше, чем для сети с изолированной нейтралью, **из-за активных потерь в ДГР** (как в обмотке, так и в сердечнике) и в среднем может быть принят равным 0,05.

При этом, в соответствии, напряжение смещения нейтрали становится очень большим, т.е. в 20 раз превышает напряжение несимметрии сети.

Таким образом, настройка ДГР в резонанс с электрической сетью вызывает значительное повышение напряжения смещения нейтрали по отношению к небольшому напряжению несимметрии, которое могло быть в этой сети при отсутствии ДГР.

Снизить, причем очень значительно, U_{NE} можно расстройкой резонансного контура. Но это не приемлемо – почему?

Другим путем снижения напряжения U_{NE} является уменьшение напряжения несимметрии $U_{нс}$. В связи с этим особое внимание в электрических сетях с компенсированной нейтралью должно быть обращено на симметрию емкостей проводов фаз ВЛ относительно земли.

В ПТЭ указывается, что в сетях, работающих с компенсацией емкостного тока, напряжение несимметрии должно быть не выше 0,75 % фазного напряжения.

При отсутствии в сети замыкания на землю напряжение смещения нейтрали допускается не выше 15 % фазного напряжения длительно и не выше 30 % в течение 1 ч.

Снижение напряжения несимметрии и смещения нейтрали до указанных значений должно быть осуществлено **выравниванием емкостей фаз сети** относительно земли (изменением взаимного положения фазных проводов, а также **распределением конденсаторов высокочастотной связи между фазами** линий).

Однофазное замыкание на землю в сети

3-35 кВ с компенсированной нейтралью

При однофазном замыкании фазы C на землю через проводимость G_3 в сети с компенсированной нейтралью напряжение $\underline{U}_{NE}$:

$$\underline{U}_{NE} = - \frac{U_{\phi} j\omega(C_A + \underline{a}^2 C_B + \underline{a} C_C) + \underline{U}_{CN} G_3}{(3G + G_3) + j\omega(C_A + C_B + C_C) - j \frac{1}{\omega L_p}} =$$
$$= -U_{\phi} \left(\frac{\underline{u}_0}{v - j(d + d_3)} + \frac{1}{1 + \frac{d + jv}{d_3}} \right) = \underline{U}'_{NE} + \underline{U}''_{NE}.$$

Величина $\underline{U}'_{NE}$ может быть вычислена по выражению:

$$U'_{NE} = U_{\phi} \frac{\underline{u}_0}{\sqrt{v^2 + (d + d_3)^2}}.$$

Вторая составляющая

$\underline{U}''_{NE}$

$$U''_{NE} = U_{\phi} \frac{d_3}{\sqrt{v^2 + (d + d_3)^2}}.$$

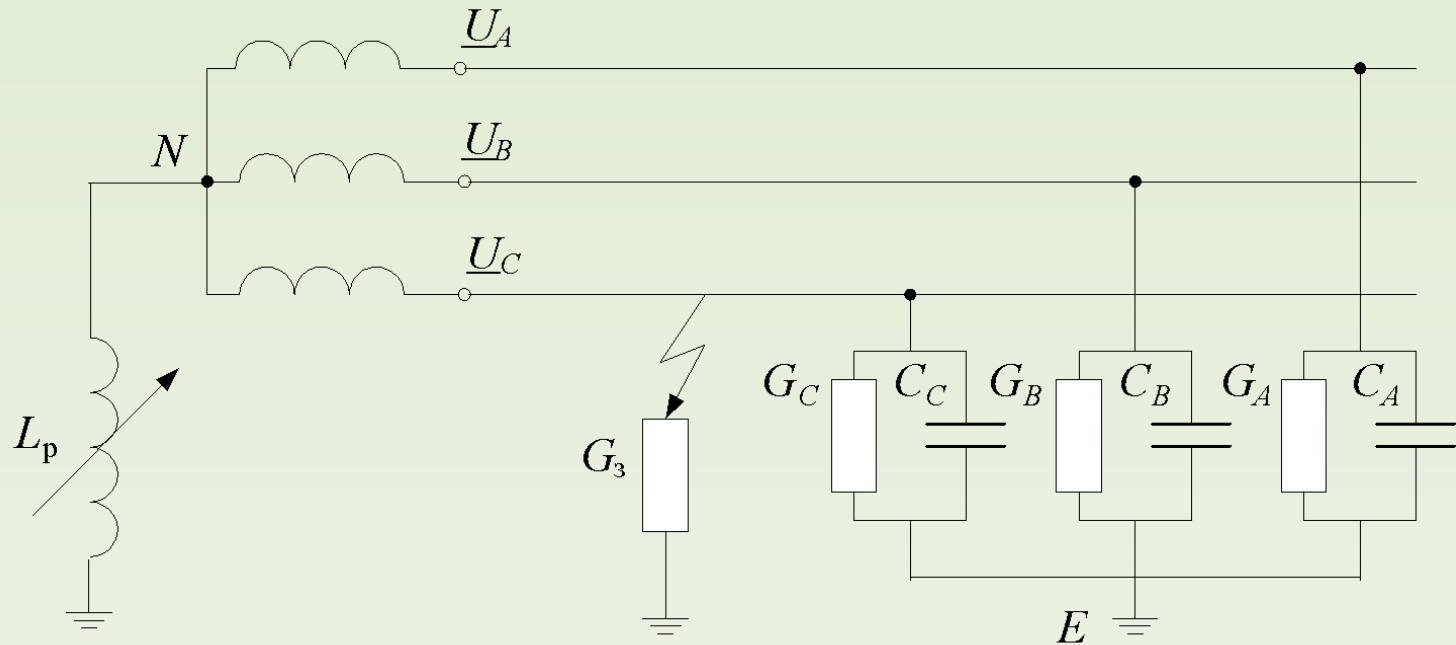
При металлическом замыкании на землю $d_3 = \infty$ и $U'_{NE} = 0$; $U''_{NE} = U_\phi$; $U_{NE} = U_\phi$.

При $d_3 = 0$

$$\underline{U}'_{NE} = -U_\phi \frac{\underline{u}_0}{v - jd}; \underline{U}''_{NE} = 0; \underline{U}_{NE} = -U_\phi \frac{\underline{u}_0}{v - jd},$$

т.е. смещение нейтрали определяется условиями нормального режима работы сети.

Схема замещения сети с компенсированной нейтралью при однофазном замыкании фазы С на землю



Можно показать, что

$$I_{33} = I_C d = 3U_{\phi} G.$$

В этом случае ток замыкания на землю определяется лишь активной проводимостью токов утечки электрической сети.

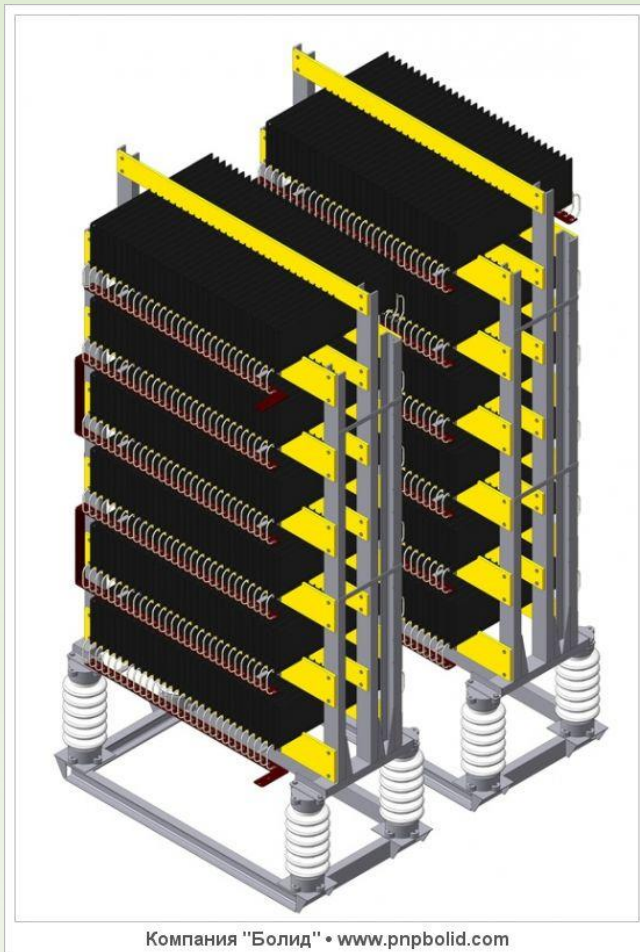
Заземление нейтрали в сети 6-35 кВ через резистор

- Заземление нейтрали через активное сопротивление называют резистивным заземлением нейтрали. Возможны два варианта реализации резистивного заземления нейтрали: **высокоомный или низкоомный.**
- При высокоомном заземлении нейтрали резистор выбирается таким образом, чтобы ток, создаваемый им в месте однофазного замыкания, был равен или немного больше емкостного тока сети. Это гарантирует отсутствие дуговых перенапряжений при однофазных замыканиях. При этом возможна длительная работа сети при замыкании на землю.



- Низкоомное заземление способствует быстрому отключению сети защитой от замыканий на землю.
- Высокоомное резистивное заземление нейтрали также используют совместно с ДГК – комбинированное заземление нейтрали.

Резисторы защитные типа РЗ4 для сетей 20, 35 кВ



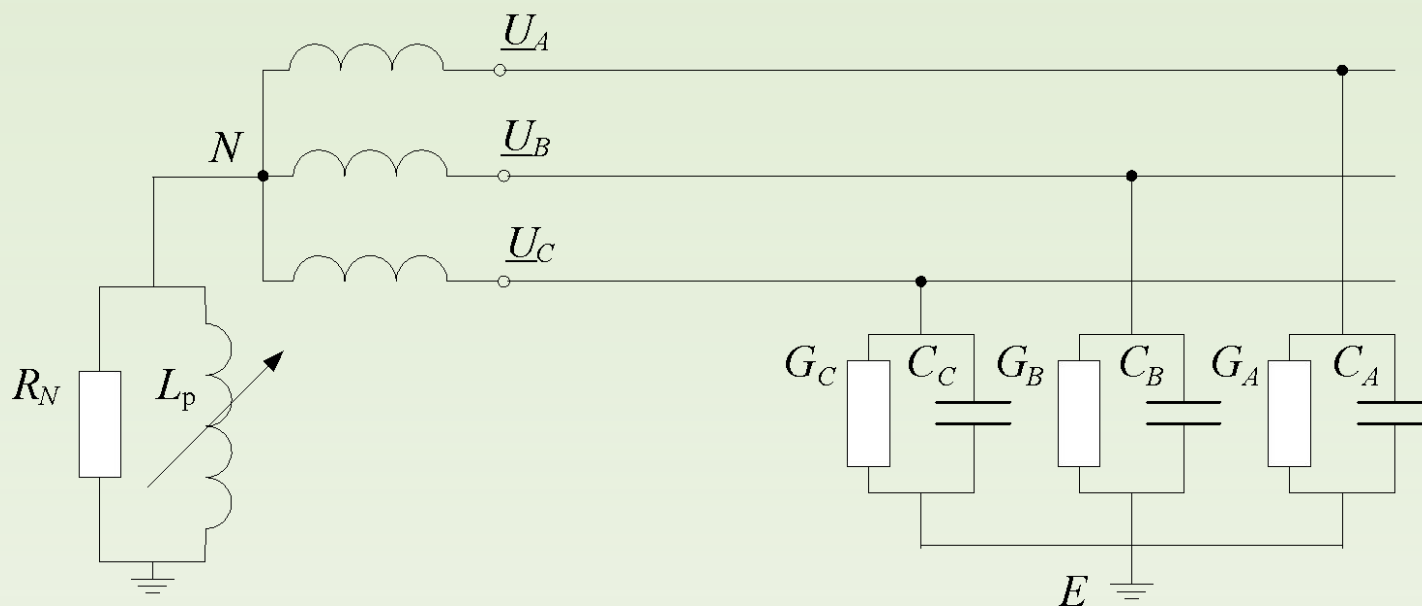
Для обеспечения селективной работы релейной защиты, а также ограничения перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях и устранения феррорезонансных явлений.

Номинальное сопротивление резистора от 13 до 250 Ом

Компания «Болид» выпускает также: резисторы защитные типов:

- РЗ для сети 3-35 кВ;
- РЗ1 для КРУ
- РЗ2 для сети 6-10 кВ
- РЗ5 для сети 20, 35 кВ

Схема замещения сети с комбинированным заземлением нейтрали



При чисто резистивном заземлении нейтрали:

$$I_{33} = U_{\phi} \sqrt{(3G + G_N)^2 + (3\omega C_{cp})^2},$$

С комбинированным:

$$I_{33} = U_{\phi} (3G + G_N),$$

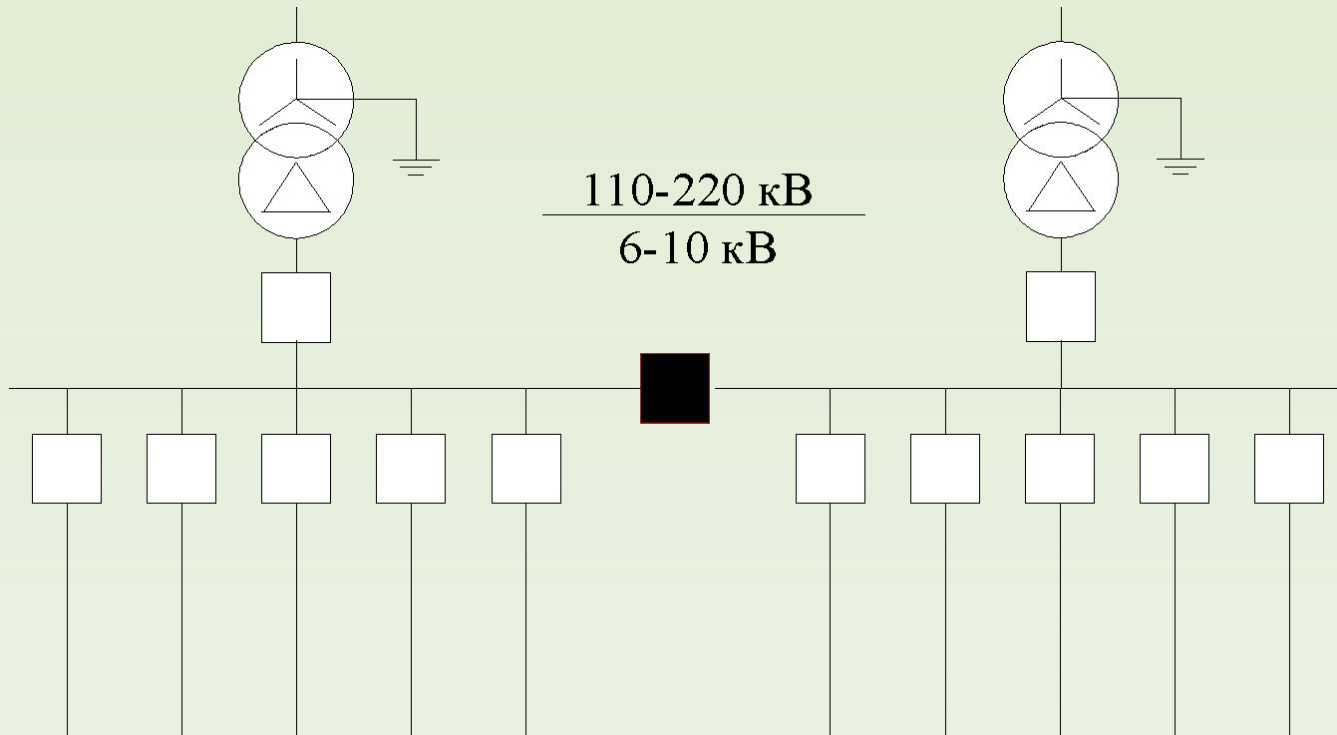
Выбор режима нейтрали в сетях 6-35 кВ

- Выбор режима нейтрали электрических сетей зависит от последствий, которые могут быть при нарушении нормальной работы электрической сети. В основном такими нарушениями считаются однофазные замыкания на землю.

- Отключение поврежденного участка сети предотвращает развитие аварий и обеспечивает безопасность людей. При глухом заземлении нейтрали быстрое отключение сети, в которой произошло замыкание на землю, основано на срабатывании релейной защиты на величину тока короткого замыкания. Во многих странах, таких, как США, Канада, Англия, Австралия, Бельгия, Португалия, Франция и другие, отказ от режима изолированной нейтрали произошел еще в 40–50-х годах прошлого века.
- Главной проблемой в сетях среднего напряжения с глухозаземленной нейтралью являются частые отключения линий, одни из которых связаны с короткими замыканиями в сети, а другие являются ложными срабатываниями из-за различных перенапряжений в сети. Надежность электроснабжения потребителей становится крайне низкой

- Режим изолированной нейтрали имеет одно безусловное преимущество перед остальными режимами – при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) представляется возможным определенное время осуществлять электроснабжение потребителей без отключения поврежденного участка сети.

Схема двухтрансформаторной подстанции и сети с изолированной нейтралью



Достоинствами режима электрической сети с изолированной нейтралью являются:

- Отсутствие необходимости в немедленном отключении первого однофазного замыкания на землю и сохранения, таким образом, электроснабжения потребителей;
- Малый ток в месте повреждения (при малой емкости сети на землю).

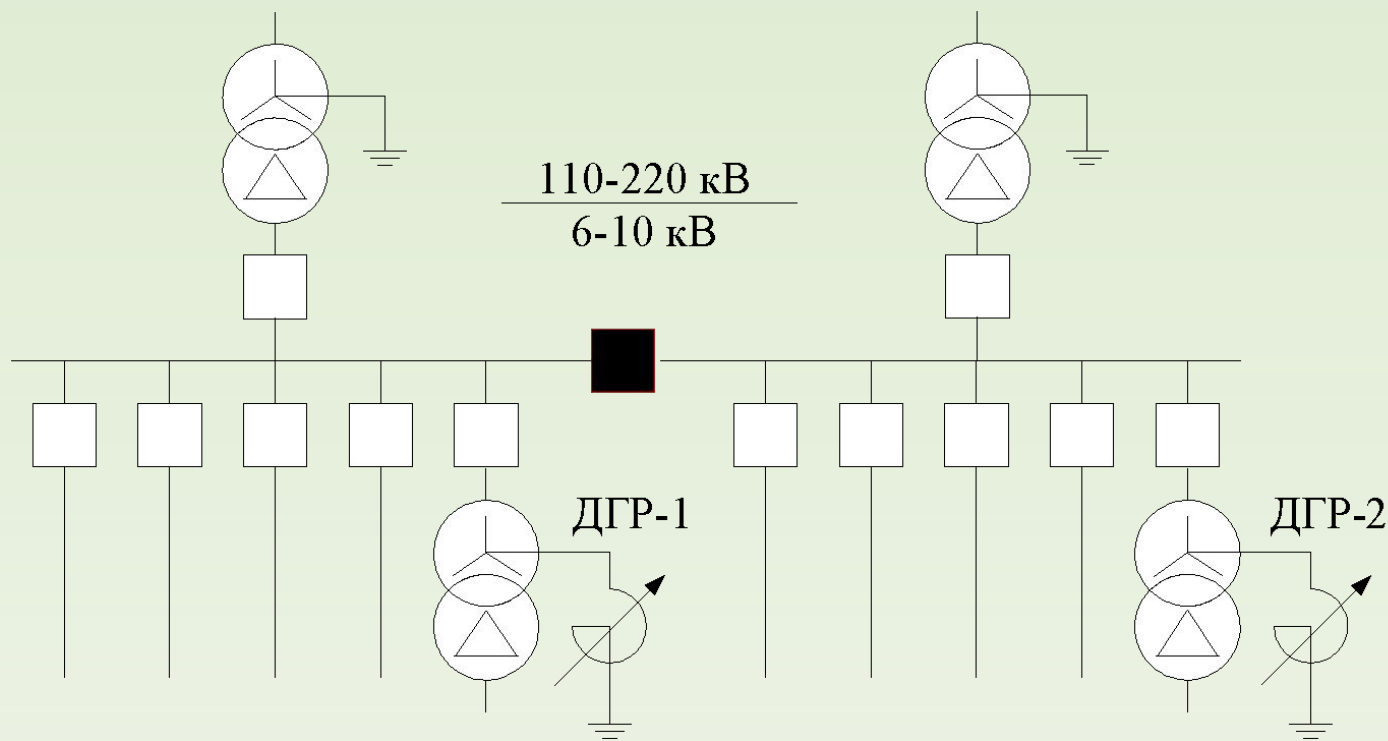
К недостаткам этого режима относятся:

- Возможность возникновения дуговых перенапряжений при перемежающемся характере дуги с малым током (единицы-десятки ампер) в месте однофазного замыкания на землю;
- Возможность возникновения многоместных повреждений (выход из строя нескольких электродвигателей, кабелей) из-за пробоя изоляции на других присоединениях, связанного с дуговыми перенапряжениями;
- Возможность длительного воздействия на изоляцию дуговых перенапряжений, что ведет к накоплению в ней дефектов и снижения срока службы;
- Необходимость выполнения изоляции электрооборудования относительно земли на линейное напряжение;

- Сложность обнаружения места повреждения на линиях;
- Опасность поражения людей электрическим током при длительном существовании замыкания на землю в сети;
- Сложность обеспечения правильной работы релейных защит от однофазных замыканий, так как реальный ток замыкания на землю зависит от режима работы сети (числа включенных присоединений).

- В других странах режим изолированной нейтрали не применяют или применяют весьма ограниченно. В нашей стране исторически сложилось так, что изначально строительство большинства сетей 6-35 кВ рассматривалось с изолированной нейтралью и поэтому такой режим сохранился во многих сетях.
- Способ заземления нейтрали через ДГР достаточно часто применяется в России. Как правило, он находит применение в разветвленных кабельных сетях промышленных предприятий и городов. При этом способе нейтральную точку сети получают, используя специальный трансформатор

Схема двухтрансформаторной подстанции с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор



Достоинствами этого метода заземления нейтрали являются:

- отсутствие необходимости в немедленном отключении первого однофазного замыкания на землю;
- малый ток в месте повреждения (при точной компенсации – настройке дугогасящего реактора в резонанс);
- возможность самоликвидации однофазного замыкания, возникшего на воздушной линии или ошиновке (при точной компенсации – настройке дугогасящего реактора в резонанс). Для кабельных сетей самоликвидация однофазных замыканий не существует;
- исключение феррорезонансных процессов, связанных с насыщением трансформаторов напряжения и неполнофазными включениями

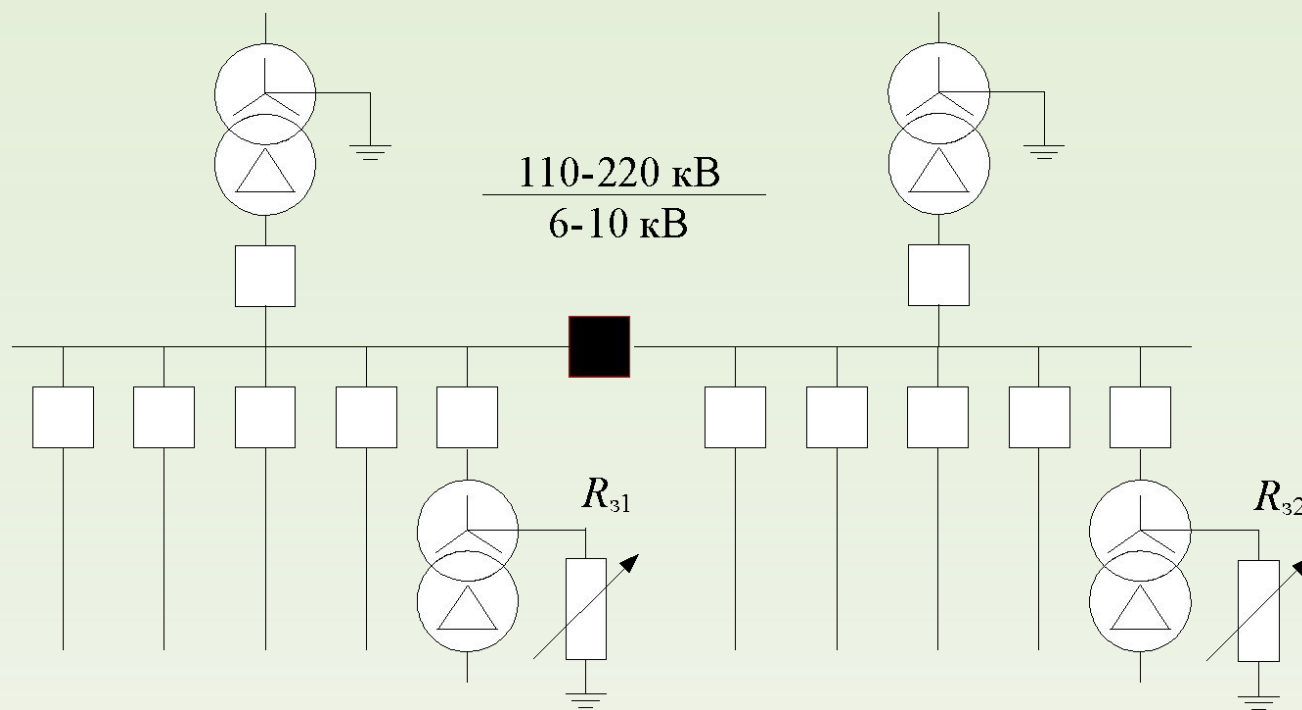
Недостатками этого режима заземления нейтрали являются:

- возникновение дуговых перенапряжений при значительной расстройке компенсации;
- возможность возникновения многоместных повреждений при длительном существовании дугового замыкания в сети;
- возможность перехода однофазного замыкания в двухфазное при значительной расстройке компенсации;
- возможность значительных смещений нейтрали при недокомпенсации и возникновении неполнофазных режимов;
- возможность значительных смещений нейтрали при резонансной настройке в воздушных сетях;

- сложность обнаружения места повреждения;
- опасность электропоражения персонала и посторонних лиц при длительном существовании замыкания на землю в сети;
- сложность обеспечения правильной работы релейных защит от однофазных замыканий, так как ток поврежденного присоединения очень незначителен.

- При дуговом характере однофазного замыкания скважность воздействия перенапряжений на изоляцию сети ниже, чем при изолированной нейтрали, но и здесь существует возможность возникновения многоместных повреждений.
- В последние десятилетия сети 6-10 кВ разрослись, а мощность компенсирующих устройств на подстанциях осталась той же, соответственно значительная доля сетей среднего напряжения сейчас работает с существенной недокомпенсацией.
- Это ведет к исчезновению всех положительных свойств сетей с компенсированной нейтралью.
- Отметим дополнительно, что дугогасящий реактор компенсирует только составляющую промышленной частоты тока однофазного замыкания. При наличии в сети источников высших гармоник последние могут содержаться в токе замыкания и в некоторых случаях даже усиливаться.

Резистор в сетях 6-10 кВ может включаться так же, как и реактор, в нейтраль специального заземляющего трансформатора и может быть регулируемым – резистивная регулируемая установка



При низкоомном заземлении нейтрали используется резистор, создающий ток в пределах 10-2000 А. Величина тока, создаваемого резистором, выбирается исходя из нескольких конкретных условий:

- стойкость опор ВЛ, оболочек и экранов кабелей к протеканию такого тока однофазного замыкания;
- наличие в сети высоковольтных электродвигателей и генераторов;
- чувствительность релейной защиты.

Достоинствами резистивного заземления нейтрали являются:

- отсутствие дуговых перенапряжений высокой кратности и многоместных повреждений в сети;
- отсутствие необходимости в отключении первого однофазного замыкания на землю (только для высокоомного заземления нейтрали);
- исключение феррорезонансных процессов и повреждений трансформаторов напряжения;
- уменьшение вероятности поражения персонала и посторонних лиц при однофазном замыкании (только для низкоомного заземления и быстрого селективного отключения повреждения);

- практически полное исключение возможности перехода однофазного замыкания в многофазное (только для низкоомного заземления и быстрого селективного отключения повреждения);
- простое выполнение чувствительной и селективной релейной защиты от однофазных замыканий на землю, основанной на токовом принципе.

Недостатками резистивного режима заземления нейтрали являются:

- увеличение тока в месте повреждения;
- необходимость в отключении однофазных замыканий (только для низкоомного заземления);
- ограничение на развитие сети (только для высокоомного заземления).

Выбор резисторов для заземления нейтрали

- Выбор заземляющего резистора зависит от основной цели резистивного заземления:
- Сохранение продолжительной работы сети при ОЗЗ на время поиска и отключения поврежденного элемента при одновременном ограничении дуговых перенапряжений и устранении феррорезонансных явлений – высокоомное заземление нейтрали;
- Быстрое отключение ОЗЗ релейной защитой – низкоомное заземление нейтрали.

В обоих случаях резистор подключается к сети с помощью специального трансформатора заземления нейтрали со схемой соединения обмоток Y_0 / D или применением нейтралеобразующего устройства (в сети 6 и 10 кВ). Выбор высокоомного резистора выполняется по току резистора I_R , который должен быть не ниже емкостного тока замыкания на землю I_C :

$$I_R \geq I_C,$$

Откуда

$$R_N \leq \frac{U}{\sqrt{3}I_C},$$

где U – напряжение сети.

Расчетная мощность трансформатора заземления и резистора S , получается по формуле:

$$S \geq \frac{U_{\phi}^2}{R_N} = \frac{U^2}{3R_N}.$$

Величина тока, протекающего через резистор в режиме однофазного замыкания на землю:

$$I_R = \frac{U}{\sqrt{3}R_N},$$

а ток в точке замыкания на землю:

$$I_{33} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}.$$

При комбинированном заземлении нейтрали сопротивление резистора, в общем случае, берут большим, чем при чисто резистивном заземлении по формуле:

$$R_N = \frac{U_\Phi}{\Delta I},$$

где ΔI – ток расстройки ДГР, определяемый по формуле

$$\Delta I = |v| I_C, \quad \text{где } v \text{ – степень расстройки резонансного контура сети с компенсированной нейтралью}$$

При выборе низкоомного резистора используют два условия:
Обеспечение устойчивого горения дуги при однофазном замыкании на землю, по которому ток резистора должен превышать емкостной ток однофазного замыкания на землю в $m = 3,5 \dots 4$ раза.

$$R_N \leq \frac{U}{m\sqrt{3}I_C}.$$

Обеспечение селективного срабатывания токовых защит на отключение однофазных замыканий на землю (создание тока однофазного замыкания на землю не менее 40 А), по которому ток резистора должен превышать максимальный ток защиты от однофазных замыканий на землю $I_{сз. \max}$:

$$R_N \leq \frac{U}{\sqrt{3}I_{сз. \max}}.$$

Выбранный из указанных условий резистор обеспечивает ток замыкания на землю:

$$I_{33} = \frac{U}{\sqrt{3}\sqrt{R_N^2 + (\omega C_s)^2}} \approx \frac{U}{\sqrt{3}R_N},$$

В ПУЭ-7, п.1.2.16

- указывается, что работа электрических сетей напряжением 3-35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор.
- Способ заземления нейтрали зависит, главным образом, от величины емкостного тока при замыкании одной фазы электрической сети на землю.

ПУЭ

- В электрических сетях 6-35 кВ емкостные токи замыкания на землю могут быть совсем небольшими (менее 10 А) и тогда работа сети возможна с изолированной нейтралью.
- В этом случае дуга в месте замыкания быстро гаснет и авария дальше не развивается.
- При больших емкостных токах замыкания на землю выполняется их компенсация и заземление нейтрали через резистор.

Компенсация емкостного тока замыкания на землю должна применяться при значениях этого тока в нормальных режимах (ПУЭ):

- 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;
- в сетях, не имеющих железобетонных и металлических опор на воздушных линиях электропередачи:
 - более 30 А при напряжении 3-6 кВ;
 - более 20 А при напряжении 10 кВ;
 - более 15 А при напряжении 15-20 кВ;
- в схемах генераторного напряжения 6-20 кВ блоков генератор-трансформатор – более 5 А.

ПУЭ

- При токах замыкания на землю более 50 А рекомендуется применение не менее двух заземляющих реакторов.
- Работа электрических сетей напряжением 110 кВ может предусматриваться как с глухозаземленной, так и с эффективно заземленной нейтралью.
- Электрические сети напряжением 220 кВ и выше должны работать только с глухозаземленной нейтралью