

УДК 621.311.1(083.96)

## ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6–35 кВ

**Л. И. ЕВМИНОВ, Т. В. АЛФЁРОВА**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Рассмотрена проблема выбора режима заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ. Показано, что применение в сетях 6–35 кВ резисторов заземления нейтрали позволяет существенно повысить надежность работы сетей, автоматизировать процесс поиска поврежденного фидера и снизить аварийность при однофазных замыканиях на землю. Приведен пример расчета величины сопротивления резистора для подстанции НПС. Для сохранения величины кратности перенапряжений на принятом или заданном уровне при отключении присоединений рассмотрена возможность увеличения величины сопротивления резистора на значение уменьшения тока замыкания на землю.*

**Ключевые слова:** резистивное заземление нейтрали, однофазное замыкание на землю, резистор, подстанция НПС, ток замыкания на землю, перенапряжения, электробезопасность, бесперебойность электроснабжения потребителей, релейная защита.

## USE OF RESISTIVE GROUNDING OF NEUTRAL IN ELECTRIC NETWORKS 6–35 KILOVOLT

**L. I. EVMINOV, T. V. ALFEROVA**

*Educational Institution “Sukhoi State Technical University of Gomel”, the Republic of Belarus*

*The article considers a problem of selection of neutral grounding mode in electrical networks 6–35 kV. It has been shown that the use of neutral grounding resistors in 6–35 kV networks makes it possible to significantly increase the reliability of the networks, automate the process of searching for a damaged feeder and reduce accidents in case of single-phase earth faults. There is an example of calculation of resistor resistance value for substation of oil pumping station. In order to maintain the overvoltage multiplicity at the received or given level, when disconnecting connections, the possibility of increasing the resistance value of the resistor by the value of reducing the ground fault current is considered.*

**Keywords:** resistive grounding of neutral, single-phase ground fault, resistor, substation of oil pumping station, ground fault current, overvoltages, electrical safety, uninterrupted electric power supply to consumers, relay protection.

### **Введение**

Выбор режима заземления нейтрали в распределительной сети 6–35 кВ (или способа заземления нейтрали) является важным вопросом при проектировании, эксплуатации и реконструкции электрических распределительных сетей.

Режим заземления нейтрали в сети 6–35 кВ определяет:

- перенапряжения на неповрежденных фазах при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ);
- безопасность персонала и электрооборудования при ОЗЗ;
- ток в месте повреждения при ОЗЗ;
- релейную защиту от ОЗЗ;
- бесперебойность электроснабжения потребителей;

- уровень изоляции электрооборудования;
- допустимое сопротивление контура заземления подстанции.

Таким образом, очевидно, что режим заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ напряжения влияет на значительное число технических решений, которые реализуются в конкретной сети [1], [2].

В мире в сетях 6–35 кВ (сети среднего напряжения) используются два возможных варианта заземления нейтрали, а именно:

- изолированная (незаземленная) нейтраль;
- заземленная нейтраль через резистор (низкоомный или высокоомный).

Если посмотреть на мировую практику эксплуатации сетей среднего напряжения, то видно, что в отличие от России, где используется режим изолированной нейтрали (более 80 % сетей 6–35 кВ), подавляющее число стран (Германия, Франция, Италия, Швеция, США и др.) используют нейтраль, заземленную через резистор (низкоомный или высокоомный).

В Республике Беларусь до настоящего времени широкое распространение получила система изолированной нейтрали, однако в соответствии с [3], [4], на вновь вводимых и реконструируемых подстанциях предусматривается резистивное заземление нейтрали.

Целью данной работы является применение резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ.

## Основная часть

### 1. Режим изолированной нейтрали

Режим изолированной нейтрали [3, п. 1.2.15] используется достаточно давно и подавляющее большинство сетей 6–35 кВ в Республике Беларусь работает именно с этим режимом заземления нейтрали.

При замыкании на землю одной из фаз, например, на линии по «здоровым» фазам будут протекать емкостные токи, значение которых зависит от величины емкости данных линий относительно земли, а следовательно, от параметров линии (длина и сечение). В поврежденной фазе эти токи складываются и проходят через точку замыкания на землю. Для выделения емкостного тока из общего тока нагрузки линии применяют фильтр тока нулевой последовательности в виде кабельного трансформатора нулевой последовательности (рис. 1).

Определить направление тока  $3\underline{I}_0$  можно, если его вектор сравнить с неким вектором базовой величины, в качестве которого принят для всех линий вектор напряжения нулевой последовательности  $3\underline{U}_0$ , получаемый от обмотки разомкнутого треугольника трансформатора напряжения. В неповрежденных фазах протекают собственные емкостные токи, поэтому векторы токов  $3\underline{I}_0$  в неповрежденных линиях опережают вектор напряжения  $3\underline{U}_0$  на  $90^\circ$ . Следовательно, вектор тока  $3\underline{I}_0$  в поврежденной линии отстает от вектора  $3\underline{U}_0$  на  $90^\circ$ . Поэтому в аналоговых реле типов ЗЗП-1М и ЗЗН применяется орган направления мощности нулевой последовательности с углом максимальной чувствительности  $\varphi_{м.ч} = +90^\circ$ .

В цифровых реле для защиты нулевой последовательности применяются те же принципы построения защит от замыкания на землю, что и в аналоговых защитах.

Основное достоинство таких систем заземления нейтрали заключается в том, что даже в режиме ОЗЗ без отключения поврежденного участка сети представляется возможным осуществлять электроснабжение потребителей определенное время (до обнаружения и устранения повреждения).

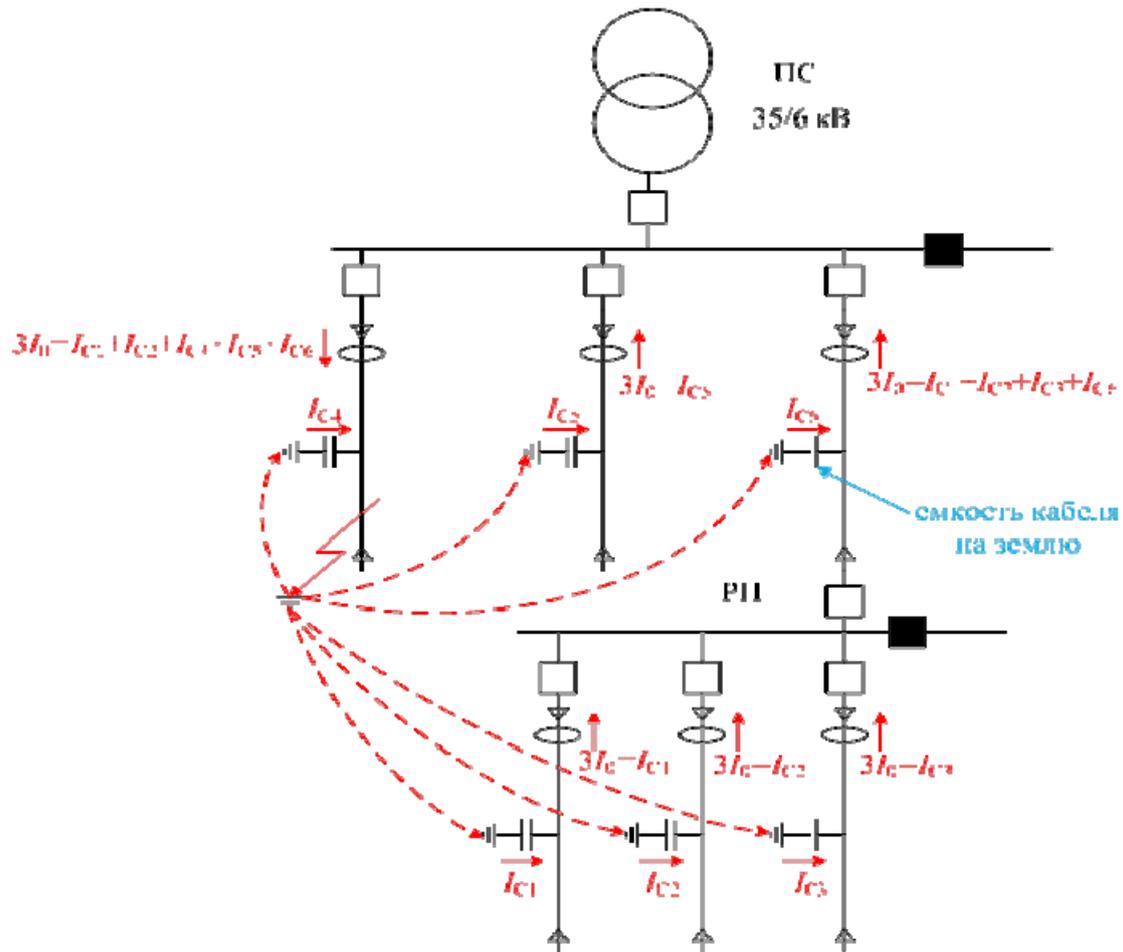


Рис. 1. Распределение токов при замыкании на землю одной из фаз

Многолетний опыт эксплуатации сетей с изолированной нейтралью позволяет говорить о существенных недостатках этого режима в сетях 6–35 кВ, таких как:

- при металлическом ОЗЗ напряжение на неповрежденных фазах повышается до линейного, что требует выполнения фазной изоляции на линейное напряжение;
- появляются значительные перенапряжения, которые способствуют увеличению вероятности перехода ОЗЗ в двухфазные и трехфазные короткие замыкания;
- режим ОЗЗ может приводить к развитию феррорезонансных перенапряжений в цепи намагничивания измерительных трансформаторов напряжения (НТМИ, НАМИТ, ЗНОМ) при замыканиях на землю;
- возникает сложность обнаружения места повреждения (места замыкания);
- возможна неправильная работа релейных защит от однофазных замыканий на землю;
- повышается опасность поражения людей и животных по причине длительного существования режима работы электрической сети в режиме ОЗЗ.

В связи с наличием такого количества недостатков режим изолированной нейтрали в распределительных сетях был исключен в большинстве стран Европы, Северной и Южной Америки и других странах еще в 40–60-х гг. прошлого века.

Осциллограмма аварийного процесса, записанная цифровым блоком релейной защиты на одной из нефтеперекачивающих станций (НПС), приведена на рис. 2.

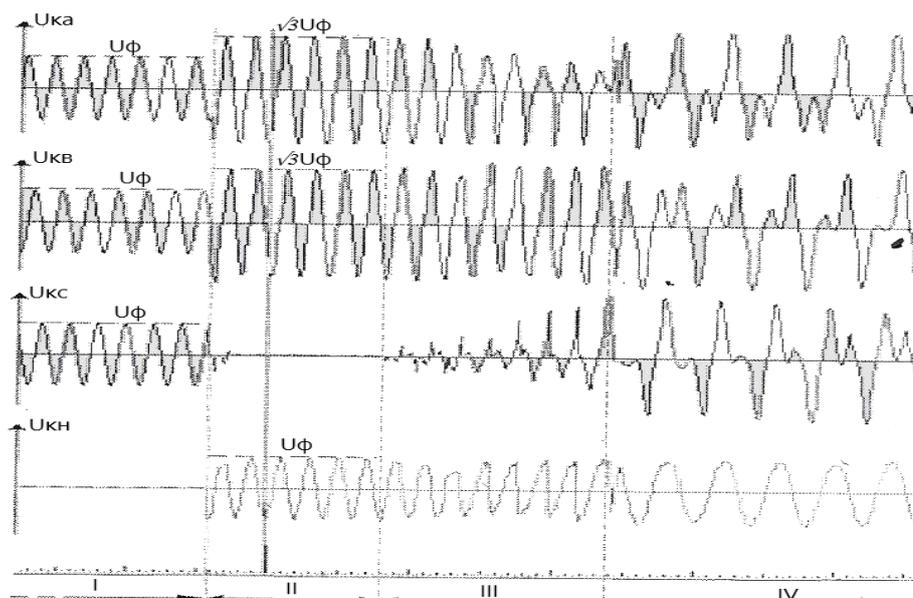


Рис. 2. Переходный процесс в сети 6 кВ НПС (однофазное замыкание с последующим возникновением феррорезонанса)

На осциллограмме период времени I соответствует нормальному режиму работы сети, период II – устойчивому замыканию на землю, период III – дуговому замыканию на землю, период IV – исчезновению однофазного замыкания на землю и возбуждению феррорезонансного процесса в сети (феррорезонанс на измерительных трансформаторах напряжения четко фиксируется по возникновению на нейтрали субгармоники напряжения с частотой 25 Гц). При возбуждении феррорезонансного процесса в сети происходило насыщение трансформаторов напряжения (ТН), повышение их тока значительно выше номинального и термическое повреждение ТН со взрывом и коротким замыканием в ячейке 6 кВ КРУ.

## 2. Заземление нейтрали в сети 6–35 кВ через резистор

Действующим в Республике Беларусь ТКП 181–2009 (02230) [4] указано применение того или иного варианта режима заземления нейтрали через резистор  $R_N$  (рис. 3):

– низкоомное резистивное заземление нейтрали производится [4, п. 5.9.42] в случаях, когда режим ОЗЗ должен быть селективно отключен за минимально возможное время. Величина сопротивления низкоомного резистора должна выбираться из условий обеспечения селективного срабатывания защит от ОЗЗ на защищаемом присоединении. Защита также должна быть отстроена от бросков тока замыкания на землю;

– высокоомное резистивное заземление нейтрали [4, п. 5.9.43] производится в тех случаях, когда сеть имеет возможность длительной работы при ОЗЗ. Величина сопротивления резистора определяется в основном необходимостью снижения уровня перенапряжений и обеспечения величины тока ОЗЗ, достаточного для определения поврежденного присоединения при помощи простых токовых защит, работающих хотя бы на сигнал.

В настоящее время с учетом опыта эксплуатации признано целесообразным производить модернизацию системы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ путем заземления ее через резистор, т. е. переходить на резистивную систему заземления нейтрали. Нейтрали сетей 6–35 кВ заземляются через резистор на питающих подстанциях (ПС). Резисторы для заземления нейтрали сети устанавливаются на каждой секции шин напряжением 6–35 кВ. На рис. 3 приведена типовая схема двухтрансформаторной подстанции с нейтралью на стороне 6–35 кВ, заземленной через резистор.

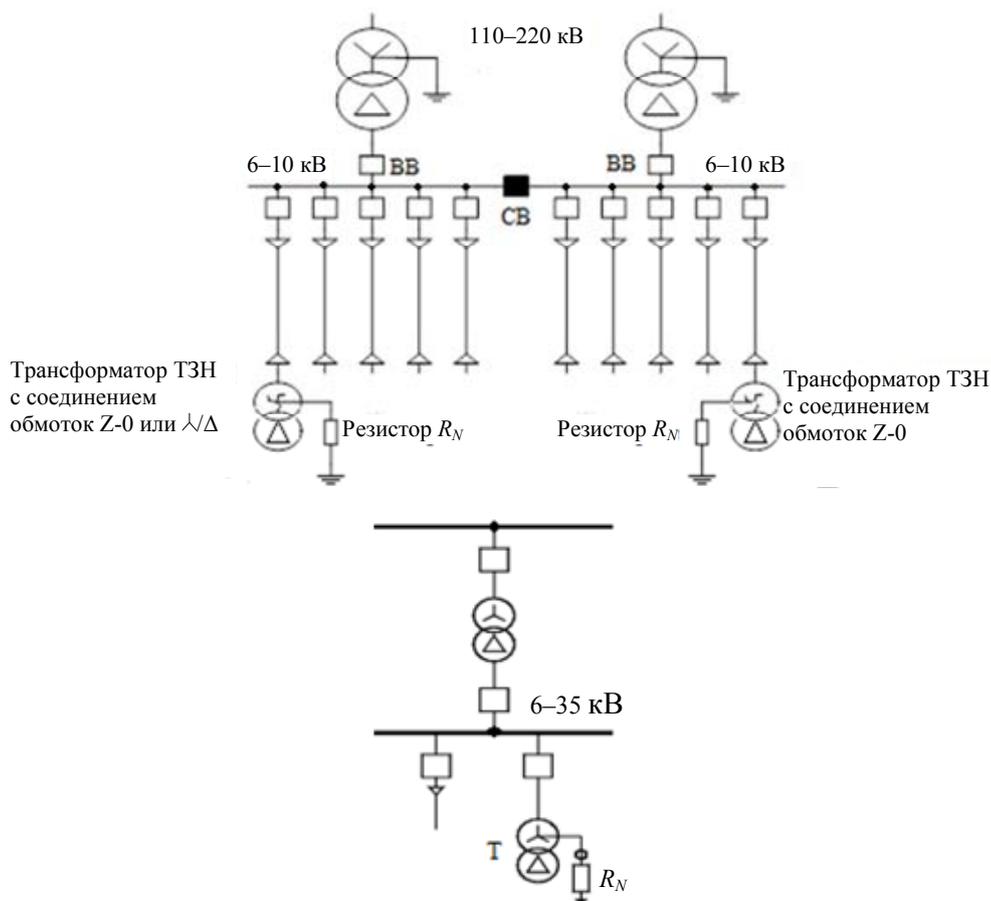


Рис. 3. Принципиальная схема понижающей подстанции с нейтралью на стороне 6–10 кВ, заземленной через резистор, и схема включения резистора в нейтраль трансформатора заземления нейтрали (ТЗН)

Недостатком резистивного заземления нейтрали, помимо указанных в табл. 1, являются дополнительные затраты на заземление нейтрали сетей 6–35 кВ через резистор:

- проектирование перехода сети на заземление нейтрали 6–35 кВ через резистор;
- приобретение специального трансформатора (ТЗН) и резистора;
- приобретение трансформаторов тока в цепи подключения резистора и для всех отходящих линий, если отсутствует трансформатор тока нулевой последовательности;
- монтаж камеры для подключения резистора;
- приобретение, монтаж и наладка устройств релейной защиты и автоматики.

При ОЗЗ в сетях с нейтралью, заземленной через резистор, во всех присоединениях протекают собственные емкостные токи, однако в поврежденном присоединении, кроме суммарного емкостного тока, протекает активный ток, обусловленный включением в цепь тока нулевой последовательности активного сопротивления резистора.

Это принципиальное положение и обуславливает физическую сущность способа заземления нейтрали через резистор, который позволяет наиболее просто решить важные технологические задачи:

- снизить уровень дуговых, феррорезонансных и коммутационных перенапряжений. При этом появляется возможность защиты оборудования ПС с помощью ограничителей перенапряжений (ОПН) с более низким остаточным напряжением при коммутационном импульсе;

- определить поврежденное присоединение и незамедлительно принять меры по устранению повреждения;
- создать предпосылки для выбора простой токовой релейной защиты, действующей либо на сигнал, либо на отключение поврежденного присоединения;
- повысить уровень электробезопасности для людей и животных в результате быстрого отключения поврежденного присоединения;
- обеспечить экономическую целесообразность принимаемых мероприятий.

В этом режиме на секцию шин 6–35 кВ через специально выделенную ячейку подключается трансформатор вывода нейтрали (с соединением обмоток  $Y_0/\Delta$  или Z-0), в нейтраль которого включается резистор.

Таблица 1

### Преимущества и недостатки сетей с нейтралью, заземленной через резистор

Преимущества		Недостатки	
для высокоомного заземления нейтрали	для низкоомного заземления нейтрали	для высокоомного заземления нейтрали	для низкоомного заземления нейтрали
1. Отсутствие необходимости в немедленном отключении однофазного замыкания на землю. 2. Возможность продолжительной работы сети в режиме ОЗЗ при действии защит на сигнал. 3. Снижение уровня дуговых, феррорезонансных и коммутационных перенапряжений до допустимой величины. 4. Простая реализация эффективной релейной защиты от ОЗЗ с действием на сигнал. 5. Исключение повреждений измерительных ТН из-за феррорезонансных процессов	1. Снижение уровня дуговых, феррорезонансных и коммутационных перенапряжений. 2. Простая реализация релейной защиты. 3. Исключение повреждений измерительных ТН из-за феррорезонансных процессов. 4. Уменьшение вероятности поражения персонала и посторонних лиц при быстром отключении	1. Незначительное увеличение тока в месте повреждения	1. Увеличение тока в месте повреждения. 2. Необходимость отключения однофазных замыканий. 3. Необходимость организации резервного питания потребителей

#### 2.1. Режимы резистивного заземления нейтрали

В зависимости от соотношения сопротивлений резистора  $R_N$  и емкостного сопротивления сети  $X_c$  принято условное разделение резистивного заземления нейтрали на низкоомное и высокоомное:

- для низкоомного резистивного заземления  $R_N \leq X_c$ ;
- для высокоомного резистивного заземления  $R_N > X_c$ .

Резистивное заземление нейтрали можно разделить на две группы с позиции создаваемого активного тока при ОЗЗ:

1) *низкоомное резистивное заземление нейтрали* – это заземление нейтрали через резистор, при котором суммарный ток в месте замыкания (активный ток резистора плюс емкостный ток сети) превышает 10 А. Как правило, суммарный ток однофазного замыкания при этом режиме заземления нейтрали существенно превышает 10 А, что требует действия защит от замыканий на землю на отключение без выдержки времени (или с малой выдержкой времени). Обычно ток, создаваемый резистором при низкоомном резистивном заземлении нейтрали, лежит в пределах:

$$I_R = 10\text{--}200 \text{ А.}$$

Низкоомное заземление нейтрали может выполняться в сетях с любым емкостным током, при этом активный ток  $I_R$ , создаваемый резистором, также должен быть больше емкостного тока сети. Как правило, активный ток, создаваемый резистором, превышает емкостный ток сети не менее чем в 2 раза.

Низкоомное резистивное заземление нейтрали характеризуется значительным снижением уровня перенапряжений в сети и организацией простой и эффективной защиты от ОЗЗ.

Существенные преимущества сетей с резистивным заземлением нейтрали преопределили широкое использование этого режима.

Присущие режиму резистивного заземления нейтрали недостатки (увеличение тока в месте повреждения и необходимость отключения замыканий) преодолеваются за счет быстрого отключения поврежденного фидера и организации резервного питания потребителей;

2) *высокоомное резистивное заземление нейтрали* – это заземление нейтрали через резистор, при котором суммарный ток в месте замыкания (активный ток резистора плюс емкостный ток сети) не превышает 10 А. Как правило, однофазное замыкание на землю при таком режиме заземления нейтрали можно не отключать и защиты от замыканий на землю действуют на сигнал. Высокоомное резистивное заземление нейтрали целесообразно применять в случаях, когда сеть имеет возможность длительной работы в режиме ОЗЗ до обнаружения места ОЗЗ и устранения повреждения или есть ограничения по величине тока повреждения. При этом ток в нейтрали должен быть такой величины, чтобы исключить появление опасных негативных явлений, связанных с перенапряжениями и электробезопасностью, но быть достаточным для определения поврежденного присоединения и работы релейной защиты на сигнал.

Высокоомное резистивное заземление нейтрали может выполняться только в сетях с емкостным током  $I_c$  не более 10 А: при этом активный ток  $I_R$ , создаваемый резистором, должен быть больше емкостного тока сети (рис. 4):

$$I_c \leq 10 \text{ А}; \quad I_c \leq I_R.$$

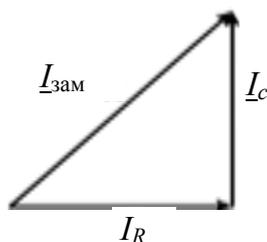


Рис. 4. Векторная диаграмма токов при однофазном замыкании в сети с резистивным заземлением нейтрали

При высокоомном резистивном заземлении нейтрали суммарный ток в месте повреждения складывается из емкостного тока сети и активного тока, создаваемого резистором заземления нейтрали (рис. 4):

$$I_{\text{зам}} = \sqrt{I_c^2 + I_R^2}. \quad (1)$$

Указанные активный и емкостной токи суммируются векторно и сдвинуты друг относительно друга на  $90^\circ$ .

Высокоомное резистивное заземление нейтрали характеризуется снижением уровня перенапряжений в сети до допустимой величины, организацией эффективной защиты от ОЗЗ с действием на сигнал и возможностью продолжительной работы сети в режиме ОЗЗ при действии защит на сигнал.

### 2.2. Рекомендации по определению емкостного тока замыкания на землю

Расчет токов замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью производится для определения параметров срабатывания релейной защиты от замыканий на землю, выбора дугогасящих устройств и т. д.

Расчет ведется при следующих допущениях:

- учитывается лишь емкостной ток замыкания на землю;
- замыкание на землю считается металлическим, т. е.  $R_{\text{п}} = 0$ .

Приближенное значение величины емкостного тока замыкания на землю сети определяется по удельным емкостным токам и протяженности отдельных участков этой сети.

Расчет тока замыкания на землю по току замыкания воздушных и кабельных ЛЭП и двигателей можно производить по формуле

$$I_c = \sum I_{\text{скл}} L_{\text{скл}} + \sum I_{\text{свл}} L_{\text{свл}} + \sum I_{\text{сдв}}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{скл}}$  и  $I_{\text{свл}}$  – удельные токи кабельных и воздушных линий, А/км;  $L_{\text{скл}}$  и  $L_{\text{свл}}$  – длина однотипных электрически связанных кабельных и воздушных ЛЭП, км;  $I_{\text{сдв}}$  – ток замыкания на землю двигателей, подключенных к секции шин 6–10 кВ, А.

Увеличение емкостного тока сети за счет емкости оборудования подстанций может ориентировочно оцениваться для воздушных и кабельных сетей 6–10 кВ – на 10 %, для воздушных сетей 35 кВ – на 12 %. Для кабельных сетей 35 кВ увеличение емкостного тока за счет оборудования подстанций учитывать не следует.

Величина емкостного сопротивления  $X_c$  определяется для каждой секции шин по формуле

$$X_c = \frac{U_{\text{лин}}}{\sqrt{3} \cdot I_c}, \text{ Ом}, \quad (3)$$

где  $U_{\text{лин}}$  – линейное напряжение секции шин, В;  $I_c$  – определено по (2), А.

Недостаточная точность аналитического метода определения емкостных токов замыкания на землю реальных линий электропередачи определяет применение расчетов только для предварительной оценки параметров проектируемых сетей и уточняется прямыми их измерениями.

### 2.3. Условия выбора режима резистивного заземления нейтрали

Задача определения типа резистивного заземления нейтрали сети является многогранной и включает в себя следующие составляющие:

- обеспечение электробезопасности;
- надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей;
- снижение уровня перенапряжений в сети;
- организацию эффективной релейной защиты от ОЗЗ;
- технико-экономическое обоснование применения резистивного заземления.

### 2.3.1. Выбор величины сопротивления резистора по условию обеспечения электробезопасности

Условие обеспечения электробезопасности заключается в соблюдении условий электробезопасности для людей при ОЗЗ на ПС с учетом существующего нормирования величин допустимого сопротивления заземляющего устройства (ЗУ) или напряжения прикосновения.

На ПС 6–35 кВ с нейтралью, заземленной через резистор, электробезопасность обеспечивается при допустимой величине сопротивления ЗУ  $R_{\text{ЗУдоп}}$ , удовлетворяющего условию

$$R_{\text{ЗУдоп}} \leq \frac{R_{\text{ЗУ(ПУЭ)}} R_N}{\sqrt{R_N^2 + X_c^2}}, \text{ Ом}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{ЗУ(ПУЭ)}}$  – величина сопротивления заземляющего устройства, нормируемая правилами устройства электроустановок (ПУЭ), Ом.

Из (4) следует, что по сравнению с принятой в соответствии с [3] допустимой величиной сопротивления ЗУ при заземлении нейтрали сети через резистор всегда ухудшаются условия электробезопасности. В этом случае электробезопасность обеспечивается двумя способами: либо путем выбора допустимого сопротивления ЗУ по (4), либо путем выполнения на ПС специальных защитных мероприятий, связанных с отключением поврежденного присоединения.

### 2.3.2. Условие надежности электроснабжения потребителей

Данное условие определяется возможностью обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей. При длительном существовании режима ОЗЗ в сети возможен переход ОЗЗ в многофазное повреждение. При необходимости сохранения работы сети в режиме ОЗЗ необходимо использовать высокоомное резистивное заземление нейтрали с действием релейной защиты от ОЗЗ на сигнал.

### 2.3.3. Выбор величины сопротивления резистора по условию снижения уровня перенапряжений [5]

Выбор величины сопротивления резистора по критерию снижения уровня перенапряжений производится по требуемой степени защиты изоляции сети и электрооборудования от перенапряжений, которая определяется допустимым коэффициентом кратности перенапряжений  $K_{\text{п}}$ :

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{\text{max}} \sqrt{3}}{U_{\text{лин}}}, \quad (5)$$

где  $U_{\text{max}}$  – напряжение профилактических высоковольтных испытаний оборудования присоединенных к секции шин.

При этом коэффициент кратности перенапряжений составляет:

- для низкоомного резистивного заземления нейтрали  $K_{\text{п}} = 1,0\text{--}2,2$ ;
- для высокоомного резистивного заземления нейтрали  $K_{\text{п}} = 2,2\text{--}2,6$ .

Сопротивление резистора по заданной кратности уровня перенапряжений  $K_n$  определяется по выражению

$$R_N = X_c \frac{K_n - 1}{3,4 - K_n}, \text{ Ом}, \quad (6)$$

где величина  $X_c$  определяется по выражению (3).

Рекомендуемый номинальный ряд сопротивлений резисторов для заземления нейтрали [6]: 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 800, 1000, 1250, 1500, 1800, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 7000, 10000 Ом.

Аттестация проектируемых резисторов по критерию снижения перенапряжений производится по величине кратности перенапряжений  $K_n$ , которая определяется по выражению

$$K_n = \frac{2,4R_N}{R_N + X_c} + 1. \quad (7)$$

В качестве базовой степени защиты изоляции сети и электрооборудования от перенапряжений принимается степень защиты  $K_n = 2,6$ , что соответствует норме на профилактические испытания вращающихся машин (генераторов, высоковольтных двигателей и другого оборудования). Выбор степени защиты  $K_n > 2,6$  должен иметь соответствующее обоснование.

#### **2.3.4. Выбор величины сопротивления резистора по условию эффективной работы релейной защиты**

Выбор величины сопротивления резистора по критерию эффективной работы релейной защиты заключается в определении необходимого вида защиты, обладающей требуемой селективностью и чувствительностью. Защита от ОЗЗ в сети организуется на всех присоединениях.

При низкоомном резистивном заземлении нейтрали в режиме ОЗЗ по поврежденному присоединению протекает ток величиной в десятки и сотни ампер, и поэтому устанавливается максимальная токовая защита нулевой последовательности с действием на отключение поврежденного присоединения.

При высокоомном резистивном заземлении нейтрали могут устанавливаться как простые токовые защиты, так и более сложные виды защит с действием на отключение или сигнал.

Допустимое сопротивление резистора по условию эффективной работы релейной защиты и автоматики определяется по выражению

$$R_N \leq \frac{U_{\text{лин}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{сз}}}, \text{ Ом}, \quad (8)$$

где  $I_{\text{сз}}$  – ток срабатывания релейной защиты от ОЗЗ, А.

Величина  $I_{\text{сз}}$  отстраивается от максимального собственного тока защищаемого присоединения:

$$I_{\text{сз}} = K_n K_{\text{бр}} I_{\text{сmax}}, \quad (9)$$

где  $K_n = 1,2$  – коэффициент надежности;  $K_{\text{бр}}$  – коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока в момент возникновения ОЗЗ (3,5–5 принимается для реле РТ-40, 2–3 – для реле РТЗ-51, 1–1,5 – для цифровых защит).

Чувствительность защиты при ОЗЗ проверяется по формуле

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_3}{I_{\text{сз}}}, \quad (10)$$

где  $I_3$  – полный ток ОЗЗ, определенный по (1), т. е. геометрическая сумма суммарного емкостного тока и активного тока резистивного заземления, протекающий в месте установки защиты при ОЗЗ на защищаемом присоединении.

Коэффициент чувствительности должен составлять:

- $K_{\text{ч}} \geq 1,5$  – для защиты воздушных и кабельных линий;
- $K_{\text{ч}} \geq 2$  – для защиты двигателей.

На практике при коэффициенте чувствительности меньше требуемого ПУЭ ток  $I_{\text{сз}}$  определяется по выражению

$$I_{\text{сз}} = \frac{I_3}{K_{\text{ч}}}. \quad (11)$$

### 2.3.5. Проверка термической стойкости резистора

Величина сопротивления резистора должна выбираться при условии наибольшего рабочего напряжения на шинах  $U_{\text{н.раб}}$ , которое составляет:

- $U_{\text{н.раб}} = 7,2$  кВ – для сети напряжением 6 кВ;
- $U_{\text{н.раб}} = 12$  кВ – для сети напряжением 10 кВ;
- $U_{\text{н.раб}} = 40,5$  кВ – для сети напряжением 35 кВ.

Термическая стойкость низкоомного резистора оценивается по допустимому кратковременному току  $I_{\text{рдоп}}$ , который должен удовлетворять условиям

$$I_{\text{рдоп}} \geq I_p, \quad (12)$$

где  $I_p = \frac{U_{\text{лин}}}{\sqrt{3} \cdot R_N}$  – ток протекающий по резистору в режиме ОЗЗ, А.

### 2.3.6. Определение мощности трансформатора присоединения резистора

Наиболее простым и распространенным способом включения резистора в нейтраль сети является установка специального трансформатора ТЗН со схемой соединения обмоток  $Y_0/\Delta$ -11 (рис. 3), мощность которого выбирается по условию [8]:

$$S_T \geq \frac{U^2}{3K_{\text{пер}}R_N}, \text{ кВ} \cdot \text{А}, \quad (13)$$

где  $K_{\text{пер}} = 1,0$ – $1,4$  – коэффициент перегрузки трансформатора.

Для включения резистора в нейтраль сети также может использоваться специальный сетевой фильтр нулевой последовательности типа ФМЗО [5].

## 2.4. Влияние на величину $K_{\text{п}}$ изменения параметров системы электроснабжения 6–35 кВ

При эксплуатации системы электроснабжения 6–35 кВ возможны отключения присоединений или подключение соседней секции шин включением секционного выключателя для профилактического ремонта электрооборудования. При таких действиях существенно изменяется емкостной ток замыкания на землю и изменяется величина  $K_{\text{п}}$ . Расчеты  $K_{\text{п}}$ , выполненные по п. 2.3.3, показали следующие результа-

ты. При снижении емкостного тока в 2 раза (отключение протяженной кабельной линии)  $K_{\Pi}$  уменьшился на 16 %, при увеличении емкостного тока замыкания на землю в 2 раза (подключение соседней секции шин секционным выключателем)  $I_{\Pi}$  увеличился на 11 %. Зависимость величины  $K_{\Pi}$  от емкостного тока при неизменном значении  $R_N$ , рассчитанная по формуле (5), показана на рис. 5.

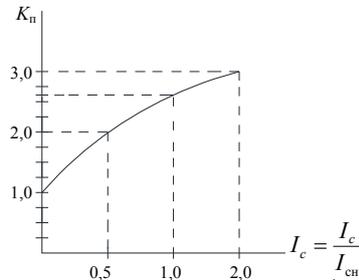


Рис. 5. Изменение величины  $K_{\Pi}$  от емкостного тока замыкания на землю

Изменение величины  $K_{\Pi}$  при изменении токов замыкания на землю необходимо учитывать при расчетах параметров резистивного заземления нейтрали.

Для сохранения величины  $K_{\Pi}$  на принятом или заданном уровне при отключении присоединений необходимо предусмотреть увеличение величины  $R_N$  на значение уменьшения тока замыкания на землю.

### 2.5. Пример расчета величины сопротивления резистора для подстанции НПС

В качестве примера выполним расчет величины сопротивления резистора для одной из секций шин подстанции НПС, являющейся потребителем первой категории. К рассматриваемой секции шин кабелями подключены двигатели мощностью 2–4 МВт и потребители мощностью 100–400 кВ · А. Технические данные оборудования приведены на рис. 6, на котором также показано распределение емкостного тока для одной секции шин подстанции НПС в сети с изолированной нейтралью при ОЗЗ.

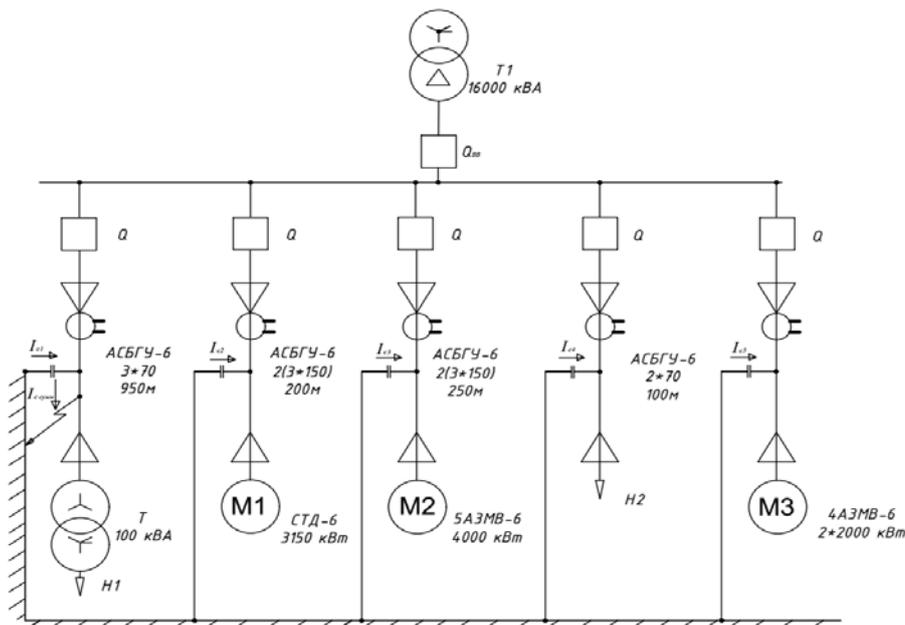


Рис. 6. Распределение емкостного тока в первой секции подстанции НПС в сети 6 кВ с изолированной нейтралью

Определим емкостные токи  $I_{c1}-I_{c5}$ , протекающие через присоединения при ОЗЗ на оборудовании одной секции 6 кВ.

Результаты расчетов, произведенные по рекомендациям п. 2.2, приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Значения емкостных токов, протекающих через присоединения  
однофазного замыкания на землю**

Ток присоединения	$I_{c1}$	$I_{c2}$	$I_{c3}$	$I_{c4}$	$I_{c5}$
Емкостной ток двигателя, А	–	0,055	0,068	–	0,094
Емкостной ток кабеля, А	0,608	0,368	0,45	4,33	0,110
Емкостной ток $I_c$ , А	0,608	0,423	0,518	4,33	0,204
Суммарный емкостной ток, А	6,08	–	–	–	–

Емкостной ток сети 6 кВ на секциях подстанции НПС по рекомендациям п. 2.2 составляет  $(6,08 + 0,6) = 6,68$  А, поэтому для исключения феррорезонансных явлений было принято техническое решение по заземлению нейтрали секций 6 кВ через высокоомные резисторы.

**Проверка условия обеспечения электробезопасности**

На ПС 6 кВ с нейтралью, заземленной через резистор, электробезопасность обеспечивается при допустимой величине сопротивления ЗУ  $R_{зудоп}$ , удовлетворяющего условию (6):

$$R_{зудоп} \leq \frac{10(\text{ПУЭ})2000}{\sqrt{2000^2 + 1036^2}} = 8,88 \text{ Ом},$$

где  $R_{зудоп} = 10$  Ом – величина сопротивления заземляющего устройства, нормируемая [3, п. 1.7.57].

Таким образом, условие обеспечения электробезопасности выполняется.

**Условие надежности электроснабжения** потребителей определяется возможностью обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей.

Для потребителей первой категории при необходимости сохранения работы сети в режиме ОЗЗ необходимо использовать высокоомное резистивное заземление нейтрали с действием релейной защиты от ОЗЗ на сигнал.

**Выбор величины сопротивления резистора по условию снижения уровня перенапряжений**

Выбор величины резистора по критерию снижения уровня перенапряжений производится по требуемой степени защиты изоляции сети и электрооборудования от перенапряжений, которая определяется допустимым коэффициентом кратности перенапряжений  $K_n$ .

Величина допустимого коэффициента кратности перенапряжений определяется оборудованием и уровнем изоляции сети. Для высокоомного резистивного заземления нейтрали  $K_n = 2,2-2,6$ .

Емкостное сопротивление сети  $X_c$  определяется по выражению (3):

$$X_c = \frac{U_{\text{сф}}}{I_c} = \frac{3640}{6,68} = 545 \text{ Ом},$$

где  $U_{\text{сф}}$  – фазное напряжение, В;  $I_c$  – емкостной ток сети, А.

Сопротивление резистора по заданной кратности уровня перенапряжений  $K_{\text{п}}$  определяется по выражению (6):

$$R_N = 545 \frac{2,6-1}{3,4-2,6} = 1090 \text{ Ом.}$$

Для заземления нейтрали применяем резистор NER-1250.

Аттестация проектируемых и действующих резисторов по критерию снижения перенапряжений производится по величине кратности перенапряжений  $K_{\text{п}}$ , которая определяется по выражению (7):

$$K_{\text{п}} = \frac{2,4 \cdot 1250}{1250 + 545} + 1 = 2,67.$$

При резистивном заземлении нейтрали степень защиты изоляции сети и электрооборудования от перенапряжений должна соответствовать условию  $K_{\text{п}} = 2,6$ .

Проведенные эксперименты показали, что после заземления нейтрали на секциях 6 кВ подстанции через резисторы NER-1250 (активное сопротивление 1250 Ом) повреждения трансформаторов напряжения прекратились. Проведенный в сети 6 кВ НПС эксперимент показал, что после исчезновения однофазного замыкания на землю феррорезонансный процесс в сети с резистивным заземлением нейтрали не возникает.

#### **Выбор величины сопротивления резистора по условию эффективной работы релейной защиты**

При высокоомном резистивном заземлении нейтрали определение поврежденного присоединения производится по наличию активной составляющей тока ОЗЗ, которая имеет достаточно малую величину, что, в свою очередь, ведет к усложнению и удорожанию релейной защиты от ОЗЗ. При высокоомном резистивном заземлении нейтрали могут устанавливаться как простые токовые защиты, так и более сложные виды защит с действием на отключение или сигнал.

Ток срабатывания релейной защиты от ОЗЗ должен удовлетворять условию (13).

#### **Проверка термической стойкости резистора**

Величина сопротивления резистора должна выбираться при условии наибольшего рабочего напряжения на шинах  $U_{\text{н.раб}}$ , которое составляет:

$$U_{\text{н.раб}} = 7,2 \text{ кВ} - \text{для сети напряжением 6 кВ.}$$

Термическая стойкость низкоомного резистора оценивается по допустимому кратковременному току  $I_{\text{рдоп}}$  и времени его протекания  $t_{\text{рдоп}}$ , которые должны удовлетворять условию  $I_{\text{рдоп}} > I_{\text{р}}$ .

#### **Определение мощности трансформатора присоединения резистора**

Наиболее распространенным способом включения резистора в нейтраль сети является установка специального трансформатора ТЗН со схемой соединения обмоток  $\frac{Y_0}{\Delta}$  – 11 (рис. 3), мощность которого выбирается по условию

$$S_T \geq \frac{6,3^2}{3 \cdot 1,4 R_N} = 4,72 \text{ кВ} \cdot \text{А,}$$

где  $K_{\text{пер}} = 1,0-1,4$  – коэффициент перегрузки трансформатора.

Для включения резистора в нейтраль сети также может использоваться специальный сетевой фильтр нулевой последовательности типа ФМЗО [5].

### **Заключение**

На основании вышеизложенного можно сформулировать следующие выводы:

1. Резистивный режим заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ имеет широкое применение в мировой практике, так как обладает значительными преимуществами по сравнению с изолированной и компенсированной нейтралью.

2. Применение в сетях 6–35 кВ резисторов заземления нейтрали позволяет существенно повысить надежность работы сетей, автоматизировать процесс поиска поврежденного фидера и снизить аварийность при однофазных замыканиях на землю.

3. Необходимо учитывать снижение коэффициента степени защиты от перенапряжений при отключении части отходящих линий для правильной работы защит от замыканий на землю, автоматизированного поиска поврежденного фидера и уменьшения последствий от возникновения однофазных замыканий на землю.

4. Для сохранения величины кратности перенапряжений на принятом или заданном уровне при отключении присоединений необходимо предусмотреть увеличение величины сопротивления резистора на значение уменьшения тока замыкания на землю.

### **Литература**

1. Короткевич, М. А. Повышение надежности электрических сетей при внедрении современной техники / М. А. Короткевич // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования : Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2004. – Вып. 3. – С. 147–154.
2. Кадомская, К. П. О резистивном заземлении нейтрали в сетях 6–35 кВ различного назначения / К. П. Кадомская, А. Б. Виштибеев // Режимы заземления нейтрали сетей 3–6–10–35 кВ : докл. науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2000. – С. 41–48.
3. Правила устройства электроустановок / Изд. 6-е, доп. и перераб. – Минск : Дизайн ПРО, 2007. – 703 с.
4. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей, ТКП 181-2009 (02230) / Минэнерго. – Минск, 2009. – 325 с.
5. Методические указания по заземлению нейтралей сетей 6–35 кВ : СТП 09110.20187.09–55. – Минск : Белэнергосетьпроект, 2009. – 71 с.
6. Ильиных, М. В. Основные положения по выбору номиналов резисторов для заземления нейтралей сетей 6–35 кВ / М. В. Ильиных, Л. Н. Сарин, А. А. Челазнов // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ : Тр. третьей Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2004. – С. 38–44.
7. Короткевич, М. А. Выбор мощности заземляющего трансформатора для подключения в нейтраль сети напряжением 10 кВ высокоомного резистора / М. А. Короткевич, А. Ю. Окраменко // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ : Тр. третьей Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2004. – С. 155–161.

*Получено 08.06.2022 г.*