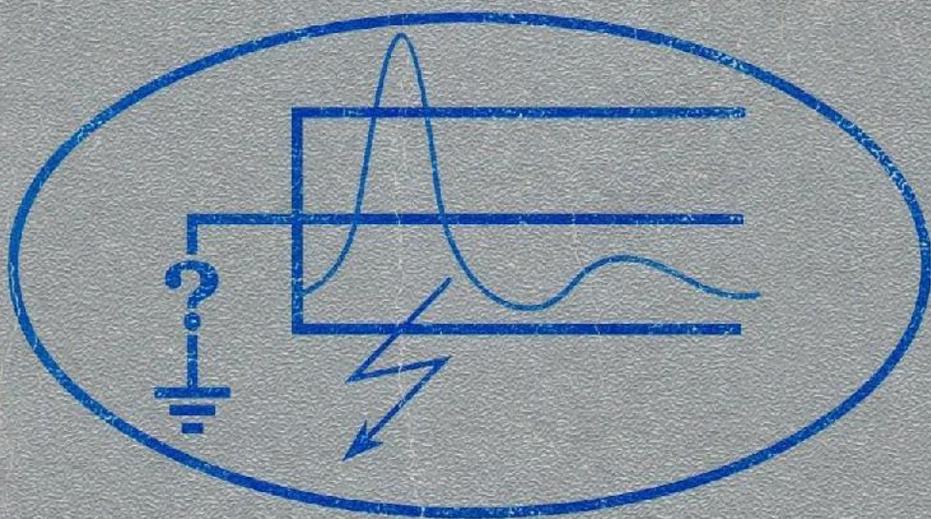


**ТРУДЫ  
ВТОРОЙ  
ВСЕРОССИЙСКОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ**

**ОГРАНИЧЕНИЕ  
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ  
И РЕЖИМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ  
НЕЙТРАЛИ СЕТЕЙ 6–35 кВ**



**Новосибирск  
15–17 октября 2002 года**

Департамент научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России»

Новосибирский государственный технический университет

Сибирская энергетическая академия

Производственное научное предприятие «Болид»

ОАО «СибНИИЭ»

ЗАО «Феникс-88»

*Посвящается 40-летию факультета энергетики  
Новосибирского государственного технического университета*

# **ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И РЕЖИМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ СЕТЕЙ 6–35 кВ**

**ТРУДЫ ВТОРОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**15–17 октября 2002 года  
Новосибирск**

ББК 31.279.1  
УДК 621.316.92+621.311.1.027.5  
П 27

Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ  
Труды Второй Всероссийской научно-технической конференции.  
Новосибирск, 2002. — 200 с.

ISBN 5-93889-020-9

*Редакционная коллегия:*

Кадомская К.П., д-р тех. наук, проф. (отв. редактор)  
Сарин Л.И. (зам. отв. редактора)  
Виштибеев А.В., канд. тех. наук (ученый секретарь)  
Емельянов Н.И., канд. тех. наук, доц.  
Заболотников А.П., канд. тех. наук

*Рецензенты:*

Манусов В.З., д-р тех. наук, проф.  
Горелов В.П., д-р тех. наук, проф.

Представленные доклады посвящены режимам заземления нейтрали электрических сетях 6–35 кВ различного конструктивного исполнения и назначения. Рассматриваются способы ограничения всех видов перенапряжений (коммутационных, дуговых, грозовых), параметры и конструктивное исполнение устройств для ограничения перенапряжений. Анализируется опыт эксплуатации сетей 6–35 кВ с использованием устройств для ограничения перенапряжений.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Раздел I

#### Сравнительная эффективность различных способов заземления нейтрали

*Г.А.Евдокунин*

Анализ внутренних перенапряжений в сетях 6–10 кВ и обоснование необходимости перевода сетей в режим с резистивным заземлением нейтрали ..... 9

*Н.В.Даки, С.Н.Великий, А.А.Челазнов*

Режимы заземления нейтрали сетей 6–10 кВ ОАО «Газпром» ..... 13

*Н.А.Зыков, Т.А.Стогний*

О режиме заземления нейтрали в сетях СН электростанций ..... 23

### Раздел II

#### Эффективность резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ различного конструктивного исполнения и назначения

*М.В.Ильиных, Л.И.Сарин, В.И.Павлов, С.М.Асосков, А.А.Лыков*

Оценка эффективности применения высокоомных резисторов по результатам опытов искусственного ОДЗ в сети 10 кВ КС «Давыдовская» ООО «Мострансгаз» ..... 31

*Л.И.Сарин, М.В.Ильиных, Н.Г.Царегородцев, Н.И.Емельянов*

Высоковольтные резисторы заземления нейтрали типа РЗ. Опыт эксплуатации ..... 36

*М.В.Ильиных, Л.И.Сарин, В.И.Кучеренко, Д.В.Багаев, И.И.Хуртов*

Внедрение резисторов в сети собственных нужд ТЭЦ-3 ОАО «Саратовэнерго» ..... 40

*М.В.Ильиных, Л.И.Сарин, Н.А.Дарков, Б.И.Тагильцев, В.И.Ваганов, Д.С.Кудряшов*

Ограничения высокоомными резисторами перенапряжений при ОДЗ в сети 35 кВ ПС «Тяжинская» ОАО «Кузбассэнерго» ..... 45

*М.В.Ильиных, Л.И.Сарин, А.А.Челазнов*

Применение высокоомных резисторов в сети с компенсированной нейтралью ..... 49

*С.М.Коробейников, Л.И.Сарин, А.А.Челазнов*

Резистор с частотной зависимостью для уменьшения перенапряжений ..... 52

*Ю.В.Целебровский*

Выбор сопротивления резистора в нейтрали по условиям электробезопасности ..... 59

*А.И.Шалин, Ю.В.Целебровский, А.И.Щеглов*

Особенности резистивного заземления в городских сетях 10 кВ ..... 63

*А.И.Гаврилко*

Анализ технических мероприятий по ограничению перенапряжений при замыканиях на землю в сети 6 кВ собственных нужд электростанций ..... 68

*А.С.Зубков, К.П.Кадомская*

Повышение надежности эксплуатации изоляции сетей средних классов напряжения, содержащих двухцепные воздушные линии, оснащением нейтралей сетей высокоомными резисторами ..... 73

*А.В.Виштибеев, Н.И.Емельянов, М.В.Ильиных, Л.И.Сарин*

О длительности работы резистора для заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ ..... 78

*В.И.Виштибеев, А.В.Виштибеев, В.В.Дубровский*

К вопросу об учете токов небаланса при выборе уставок токовых защит от ОЗЗ ..... 81

*А.В.Виштибеев*

Эффективность резистивного заземления нейтрали в кабельных электрических сетях 6–10 кВ ..... 84

### Раздел III

#### Эффективность резонансного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ различного конструктивного исполнения и назначения

- А.М.Брянцев, Б.И.Базылев, В.В.Базуткин, А.Г.Долгополов*  
К проблеме компенсации емкостных токов в сетях 6–10–35 кВ ..... 97
- Д.И.Никонов*  
Опыт эксплуатации сетей с компенсированной нейтралью в ОАО «Башкирэнерго» ..... 103
- М.П.Дергилев, В.К.Обабков*  
Перенапряжения в сетях 6–10 кВ с двигательной нагрузкой при различных способах заземления нейтрали ..... 106
- Н.П.Гуров, В.Г.Сажаяев, В.К.Обабков*  
Перенапряжения в кабельной сети 6 кВ с большими емкостными токами и борьба с ними средствами резонансного заземления нейтрали ..... 112

### Раздел IV

#### Перенапряжения в сетях средних классов напряжения (моделирование и экспериментальные исследования)

- С.М.Коробейников, Л.И.Сарин, М.В.Ильиных*  
Особенности пробоя воздушного промежутка в опытах искусственного ОДЗ при различных режимах заземления нейтрали ..... 123
- С.В.Нестеров, А.И.Щеглов, Ю.В.Целебровский*  
Анализ осциллограмм токов и напряжений при однофазных дуговых замыканиях в сети 10 кВ с резистивным заземлением нейтрали ..... 127
- В.Е.Дмитриев, В.Н.Ларионов, А.И.Лавринец*  
Испытания силикатного изоляционного покрытия токоведущих и конструктивных элементов в КРУ 10 кВ ..... 132
- В.Е.Качесов, Ю.А.Лавров, А.Г.Овсянников, В.Н.Ларионов, Д.Е.Павликов*  
О мониторинге распределительных сетей ..... 136
- Н.Д.Кузнецов, И.Л.Дегтярёв*  
Перенапряжения при коммутациях высоковольтных электродвигателей вакуумными выключателями ..... 142
- И.Л.Дегтярев, К.П.Кадомская, Р.В.Копылов*  
Режимы заземления нейтрали и защита от перенапряжений электрических сетей с вращающимися электрическими машинами ..... 147
- А.В.Портнягин, И.Ф.Суворов*  
Моделирование коммутационных перенапряжений при отключении электродвигателя в сети 6 кВ ..... 152

### Раздел V

#### Повышение надежности эксплуатации изоляции электрических сетей при установке нелинейных ограничителей перенапряжений и RC-цепочек

- О.А.Аношин, Е.Н.Красильников*  
Повышение надежности работы электрических сетей на основе глубокого ограничения внутренних перенапряжений ..... 157
- О.А.Аношин*  
Повышение надежности эксплуатации ограничителей перенапряжений в электрических сетях 6–10 кВ ..... 159

<i>Г.А.Евдокунин, С.С.Титенков</i>	
О методических указаниях по применению нелинейных ограничителей перенапряжений в сетях 6–35 кВ .....	162
<i>Ю.Ф.Васюра, А.В.Вильнер, А.В.Вычегжанин</i>	
Результаты экспериментальных исследований и опыта эксплуатации нелинейных ограничителей перенапряжений в сетях 6–10 кВ .....	165
<i>А.А.Безносков, Е.А.Борисов, К.П.Кадомская</i>	
Моделирование ограничителей перенапряжений при воздействии срезанных грозовых волн и высокочастотных коммутационных перенапряжений .....	170
<i>А.П.Заболотников, Л.И.Сарин, Б.И.Тагильцев</i>	
Анализ повреждений ограничителей перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в «Кузбассэнерго» .....	175
<i>А.П.Заболотников</i>	
Выбор ограничителей перенапряжений для сетей 6–35 кВ .....	177
<i>С.В.Кузьмин, А.И.Кожин</i>	
Анализ коммутационных перенапряжений в сетях 6–10 кВ угольных разрезов .....	183

## Раздел VI

### Релейная защита в электрических сетях 6–35 кВ

<i>А.И.Гаврилко</i>	
Комплекс токовых защит нулевой последовательности для сетей собственных нужд электростанций .....	191
<i>С.И.Головко, Р.А.Вайнштейн, В.В.Шестакова, С.М.Юдин</i>	
Опыт разработки защиты от замыканий на землю в электроустановках с компенсацией емкостного тока замыкания на землю .....	196
<i>В.О.Столбов, С.Н.Розова, И.Ф.Суворов</i>	
Исследование электромагнитной совместимости трансформатора напряжения типа НТМИ с изоляцией в сетях 6–10 кВ .....	198

**РАЗДЕЛ I**

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ**

## РЕЖИМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ СЕТЕЙ 6–10 кВ ОАО «Газпром»

*Н.В. Даки, С.Н. Великий, А.А. Челазнов (ОАО «Газпром», Москва)*

### **1. Введение**

Режим нейтрали электрической сети высокого напряжения является важнейшим фактором, определяющим идеологию эксплуатации оборудования, влияющим на выбор изоляции и организацию релейной защиты. Этот режим определяет переходные электромагнитные процессы и связанные с ними перенапряжения, условия электробезопасности при замыканиях на землю и требования к заземляющим устройствам электроустановок сети.

Электрические сети напряжением 6 и 10 кВ в России относятся к сетям с изолированной нейтралью [1]. Наиболее распространенный вид повреждений в таких сетях — однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) с перемежающейся дугой [2]. Возникающие при этом перенапряжения кратностью до  $3+4 U_{\phi}$  опасны для электрооборудования, и в первую очередь для высоковольтных электродвигателей,

генераторов, кабелей и трансформаторов напряжения. Шаговое напряжение и напряжение прикосновения в месте ОЗЗ опасно для людей и животных [3, 4].

В настоящее время в России активно обсуждаются вопросы изменения режима нейтрали и отказа от изолированной нейтрали в этих сетях. Предлагаются новые комплектные устройства для низкоомного или высокоомного резистивного заземления нейтрали, позволяющие в той или иной степени устранить указанные недостатки. В ряде отраслей промышленности уже приняты меры по изменению режима нейтрали, например в сетях 6 кВ собственных нужд тепловых электростанций применен способ заземления нейтрали сети через низкоомный (100–200 Ом) резистор [8, 9].

Необходимость изменения режима нейтрали особенно остро стоит в питающих сетях 6–10 кВ электроприводных компрессорных станций (КС) с мощной двигательной нагрузкой. Синхронные электродвигатели (СД) 4...6.3...12.5 МВт, длительное время находящиеся в эксплуатации, особенно критичны к действию импульсных дуговых перенапряжений.

В то же время в действующем и планируемом к выпуску новом издании ПУЭ эти вопросы пока еще не отражены, в связи с чем и потребовалась разработка настоящих методических указаний.

В ходе выполнения работы был проведен сравнительный анализ перенапряжений в сетях 6–10 кВ с различными режимами работы нейтрали. На основании большого объема данных, полученных по результатам моделирования на ЭВМ и экспериментов, проведенных в условиях эксплуатации, подтверждена эффективность заземления нейтрали через низкоомный или высокоомный резистор, либо в их комбинации с дугогасящим реактором (ДГР).

## **2. Назначение и область применения документа**

Ведомственный руководящий документ «Методические указания по выбору режима заземления нейтралей в сетях 6–10 кВ в газовой промышленности» (далее ВРД) определяет состояние нейтралей сетей 6–10 кВ промышленных объектов газовой промышленности, выбор технических средств по регулированию режима нейтралей и обоснование их основных параметров.

Действие ВРД распространяется на все объекты электроснабжения предприятий РАО «Газпром» и включает:

- питающие и распределительные сети, распрестройства 6–10 кВ компрессорных станций электроприводных, газотурбинных и др.;
- сети 6–10 кВ систем электроснабжения газовых промыслов и промплощадок;
- питающие высоковольтные сети буровых установок;
- распределительные сети 6–10 кВ электростанций собственных нужд промышленных объектов предприятий РАО «Газпром»;
- сети электроснабжения подземных хранилищ газа;
- сети 6–10 кВ газоперерабатывающих заводов.

ВРД не отменяет действие норм ПУЭ, однако в части выбора состояния нейтралей сетей различного назначения, структуры и используемого оборудования для регулирования режима нейтралей, является уточняющим документом.

## **3. Механизм возникновения дуговых перенапряжений**

При однофазном замыкании в кабелях и статорной изоляции двигателей возникновение перемежающейся дуги наиболее вероятно в начальной стадии ОЗЗ до времени 0.1 сек, когда еще не наступило обуглероживание дугового канала и возможно кратковременное восстановление электрической прочности после погасания дуги.

При однофазном замыкании на наружной изоляции возникновение перемежающейся дуги возможно при неустойчивом контакте фазы с заземляющим проводником.

Параметры переходного процесса при возникновении однофазного дугового замыкания в сети с изолированной и резонанснозаземленной нейтралью определяются емкостью фаз, индуктивностями источника питания, трансформатора и ДГР, а также сопротивлением дуги.

Основными факторами, определяющими максимум перенапряжений при ОДЗ, являются: напряжение на аварийной фазе в момент первичного зажигания дуги ( $U_3$ ), момент погасания дуги и напряжение повторного зажигания дуги ( $U_{II}$ ).

Момент первичного пробоя определяется мгновенным значением напряжения в месте замыкания. При перекрытии загрязненной и дефектной изоляции пробой наступает вблизи максимума напряжения аварийной фазы  $U_{\text{макс}}$  [2, 3].

Для закрытой статорной изоляции двигателей, а также изоляции кабелей, характерно кратковременное увеличение  $U_{\text{ЭП}}$  в начальной стадии процесса за счет выдувания дуги из узкого канала в поврежденной изоляции с последующим понижением напряжения пробоя при выгорании изоляции в месте повреждения [2, 3].

Для наружной изоляции воздушных линий (ВЛ) характерно интенсивное охлаждение места пробоя, что обуславливает погасание тока замыкания при первом или последующих переходах через нулевое значение высокочастотной составляющей тока. При этом происходит быстрое восстановление  $U_{\text{ЭП}}$ , что обуславливает эскалацию перенапряжений и увеличение напряжения повторных пробоев.

На длительность горения дуги и условия ее гашения оказывают существенное влияние переходное сопротивление в месте горения дуги, вид диэлектрика, непосредственно контактирующего с дуговым каналом, интенсивность ее охлаждения, давление в зоне горения дуги, возможность ее растяжения и др.

На начальных стадиях горения дуги возможно кратковременное восстановление электрической прочности изоляции, если наблюдалось быстрое погасание дуги. В этом случае процесс погасания дуги носит неустойчивый характер, когда окончательному погасанию дуги предшествует несколько попыток гашения при переходе тока через нулевое значение с последующим зажиганием дуги. Такая перемежающаяся дуга приводит к развитию колебаний, возникающих при каждом обрыве и зажигании, т.е. к появлению перенапряжений.

#### **4. Сеть с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор**

Исключить эскалацию напряжения на нейтрали при дуговом замыкании можно обеспечив разряд емкости здоровых фаз за время бестоковой паузы, то есть за  $t_{II}=0.008...0.01$  сек.

Подключение активного резистора в цепь протекания тока нулевой последовательности обеспечивает уменьшение постоянной времени разряда емкости здоровых фаз и снижение напряжения на нейтрали [12–16].

Наиболее распространенное подключение резистора в цепь нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$  выполняется одним из двух способов.

Первый способ — между нулевой точкой обмотки ВН трансформатора ТСН и контуром заземления включается высоковольтный резистор  $R_N$ , рис.1а.

Второй способ — нейтраль обмотки ВН соединяется с землей, а во вторичную обмотку (в разомкнутый треугольник) включается низковольтный резистор  $R_\Delta$ , при этом трансформатор ТЗН должен быть специальной броневого конструкции, рис.1б.

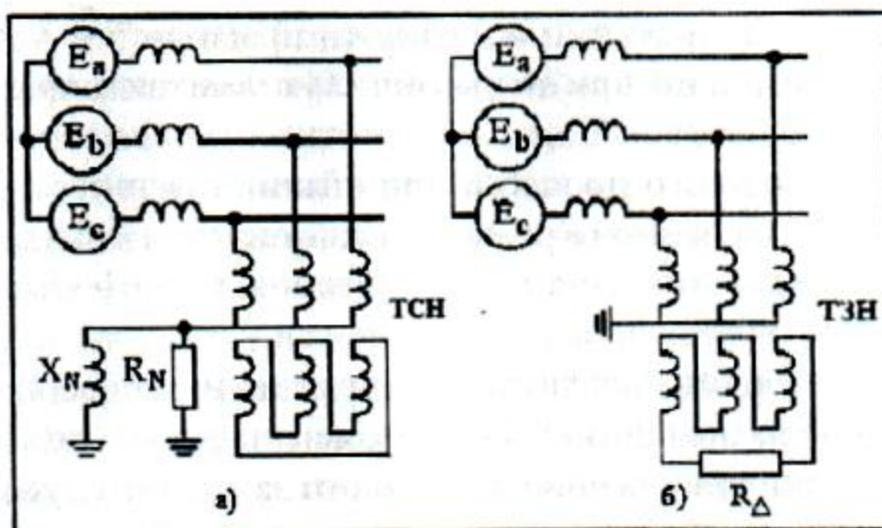


Рис.1. Схемы подключения резистора в цепь протекания тока нулевой последовательности

Конкретная схема подключения резистора определяется схемой сети и параметрами установленного оборудования. В сетях 6–10 кВ генераторного напряжения и собственных нужд электростанций наиболее приемлемы варианты подключения к нейтралям трансформаторов собственных нужд (ТСН) или специальных фильтров нулевой последовательности типа ФМЗО. При этом мощность устройств определяется необходимостью длительной работы в режиме однофазного замыкания и обеспечения апериодического процесса разряда емкости фаз.

Уменьшение величины сопротивления резистора приводит к увеличению тока ОЗЗ, что обеспечивает, с одной стороны, быстрый разряд емкости фаз и уменьшение напряжения на нейтрали, с другой стороны обуславливает увеличение тока ОЗЗ и повышение энергии, рассеиваемой резистором.

Для обеспечения полного разряда емкостей фаз за время  $t_{11}=0.008...0.01$  сек. сопротивление резистора  $R_N$  (или  $R_{\Delta}$ ) рассчитывается из условия, чтобы активная составляющая тока замыкания на землю была равна или больше емкостной.

Резистор, выбранный из этих условий, обеспечивает стекание избыточного заряда емкости нулевой последовательности сети при ОЗЗ за время, примерно равное полупериоду промышленной частоты. При этом напряжение на нейтрали относительно земли к моменту возможного повторного зажигания дуги уменьшается практически до нулевого значения.

Если сопротивление резистора  $R_N$  больше расчетного, т.е. ток  $I_C > I_R$ , то кратность перенапряжений в сети увеличивается.

Если сопротивление  $R_N$  меньше расчетного, эффект ограничения перенапряжений и предотвращения повторных дуговых замыканий не снижается.

При увеличении сопротивления за время бестоковой паузы напряжение на нейтрали снижается не до нуля, а до конкретной величины  $\Delta U_n$ , за счет чего увеличивается уровень дуговых перенапряжений  $K_{11}$ .

Значение сопротивления резистора в нейтрали должно определяться исходя из величины тока замыкания на землю и требуемого уровня снижения дуговых перенапряжений. При необходимости выбранное сопротивление проверяется по условиям ограничения феррорезонансных явлений и по устойчивости в несимметричном режиме.

Высокоомное заземление нейтрали сети можно выполнить, заземлив через резистор нейтраль генератора. Для этого необходимо, чтобы обмотка статора генератора имела нулевой вывод.

Такое решение может быть применено на электростанциях с блочной схемой генератор — трансформатор, а также на электростанциях со сборными шинами генераторного напряжения при отсутствии связи с энергосистемой.

Если сеть может питаться не только от генераторов, но и от других источников энергии (например, от энергосистемы через понизительные трансформаторы 110/6–10 кВ), то следует применять ТЗН, чтобы обеспечить заземление нейтрали сети в режиме, когда генераторы остановлены.

### **5. Сеть с нейтралью, заземленной через низкоомный резистор**

Заземление нейтрали сети через низкоомный резистор осуществляется с помощью специального трансформатора заземления нейтрали со схемой соединения обмоток Y/Δ, рис.1а. Между нулевой точкой обмотки ВН и контуром заземления включается резистор  $R_N$ , с сопротивлением 100...200 Ом для сетей 6 кВ или 150...300 Ом для сетей 10 кВ. Минимальное значение сопротивления резистора выбирается по условию обеспечения чувствительности защиты от ОЗЗ, в частности для наибольшего охвата токовыми защитами от ОЗЗ обмоток электрических машин, максимальное — по максимально допустимому значению тока ОЗЗ и мощности заземляющего трансформатора.

Заземляющий трансформатор для низкоомного заземления нейтрали рассчитывается на кратковременный режим работы в течение 10...60 секунд, длительность которого определяется его нормируемыми температурными параметрами.

Защита от ОЗЗ в сети организуется на всех линиях питания одиночных электроприемников, в том числе электродвигателей. Устанавливается релейная защита нулевой последовательности с использованием трансформаторов тока типа ТЗЛМ и цифровых терминалов или реле РТЗ-50, РТЗ-51 (РТ-40/0,2) с действием на отключение этих присоединений без выдержки времени. Уставки защиты от замыканий на землю этих присоединений выбирают по выражению:

$$I_{с.з} = K_H \cdot K_B \cdot I_C, \quad (5.1)$$

где  $I_C$  — первичный емкостной ток нулевой последовательности, протекающий по защищаемому присоединению при ОЗЗ на секции ЗРУ-6 (10) кВ;  $K_B$  — коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока, принимается для реле РТЗ-51 равным 2–3, для реле РТЗ-50 — равным 3–4, для цифровых терминалов равным 1.2;  $K_H$  — коэффициент надежности, принимается равным 1.2.

При питании сети 6 (10) кВ от генератора низкоомное заземление сети допускается выполнять, заземлив через резистор нейтраль генератора. Для этого необходимо, чтобы обмотка статора генератора имела нулевой вывод. Такое решение может быть применено при отсутствии связи с энергосистемой.

Если сеть питается не только от генераторов, но и от других источников энергии (например, от энергосистемы через понизительные трансформаторы 110/6 (10) кВ, то дополнительно следует применять ТЗН, чтобы обеспечить низкоомное заземление нейтрали сети в режиме, когда генераторы остановлены.

### **6. Сеть с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор**

Заземление нейтралей через дугогасящие реакторы (ДГР) приводит к компенсации емкостных токов в месте замыкания и к снижению величин дуговых перенапряжений. Однако остается опасность возникновения больших кратностей перенапряжений при сочетании ОДЗ и неполнофазных режимов, возникающих при замедленной работе или отказе фаз выключателя и неточной настройке дугогасящего реактора.

При возникновении ОЗЗ в сети с расстройкой компенсации на 5...10% возможны повторные дуговые замыкания и перенапряжения, существенно превышающие фазное. При расстройке компенсации до 15...30% дуговые перенапряжения достигают 2,8–

3,0  $U_{\phi}$ , что с точки зрения ограничения перенапряжений делает применение ДГР неэффективным.

При точной настройке ДГР после возникновения ОЗЗ и погасании тока дуги возможные повторные пробои происходят на напряжении меньшем или равном фазному, что приводит к перенапряжениям на здоровых фазах, не превышающим 2,4  $U_{\phi}$ .

При неточной настройке ДГР процесс выравнивания напряжений фаз после погасания дуги носит характер биений, амплитуды и частота которых определяются степенью расстройки компенсации и добротностью колебательного контура. При точной настройке ДГР или небольшой перекомпенсации, расстройка и возникновение биений при ОЗЗ возможны при отключении присоединения с большим емкостным током подпитки. Опасность биений состоит в том, что повторное замыкание может произойти при напряжении, близком к максимуму, что вызывает повышенные перенапряжения на здоровых фазах.

Устройства релейной защиты, основанные на токовом принципе, не обеспечивают селективности в условиях полной компенсации тока замыкания на землю. Для работы наиболее массовых устройств релейной защиты необходимо, чтобы ток ОЗЗ был больше тока срабатывания защиты  $I_{ср.з}$ , поэтому сети с ДГР часто эксплуатируют с перекомпенсацией емкостного тока ОЗЗ.

При недокомпенсации ( $I_L < I_C$ ) эксплуатационное отключение части линий сети приводит к уменьшению тока замыкания на землю и возможному отказу защит, поэтому режим недокомпенсации недопустим. Кроме того, возможно резонансное повышение напряжения в нормальном режиме и при неполнофазных режимах.

При частой коммутации присоединений рекомендуется применять автоматическую подстройку степени компенсации дугогасящего реактора, используя реакторы типа РУОМ и УАРК. Автоматическая настройка реактора позволяет снизить ток ОЗЗ до значений, определяемых точностью работы автоматики и принятой степенью отстройки от резонанса в нормальном режиме. Подключение реакторов с автоматической настройкой степени компенсации применяется в схемах, допускающих длительное существование режима с неустраненным ОЗЗ.

### **7. Комбинированное заземление нейтрали в сетях 6–35 кВ**

Подключение высокоомного резистора параллельно компенсационному реактору позволяет устранить биения при неточной настройке реактора. В первом приближении величина резистора может быть выбрана исходя из соотношения:

$$R_N = U_{\phi} / \Delta I_3, \quad (7.1)$$

где  $\Delta I_3$  — ток расстройки компенсационного реактора.

Определенное по (7.1) значение сопротивления резистора  $R_N$ , подключенного параллельно ДГР, приводит к полному устранению биений после погасания дуги и снижению перенапряжений при повторных пробоях до уровня  $U_{\max} @ 2.4 U_{\phi, \max}$ .

Уточнение значения сопротивления резистора, позволяющего снизить перенапряжения до заданной величины, осуществляется расчетным путем с учетом всех демпфирующих факторов. Расчетным путем показано, что максимальные перенапряжения не превышают уровня  $U_{\max} \cong 2.6 U_{\phi, \max}$  при подключении параллельно ДГР резистора с номиналом:

$$R_N = (1.5 \dots 2.0) U_{\phi} / \Delta I_3 \quad (7.2)$$

Подключение параллельно ДГР высокоомного резистора повышает селективность существующих защит от замыканий на землю и создает возможность использования специальных защит на токовом принципе.

В этом случае параметры резистора рассчитываются по условиям:

- ограничения перенапряжений в режиме ОЗЗ до заданной величины  $K_{п}$  (обычно до уровня испытательного напряжения при профилактических испытаниях для вращающихся машин);
- ограничения напряжений, возникающих на нейтрали в нормальном режиме за счет несимметрии параметров схемы;
- увеличения активной составляющей тока замыкания на землю до уровня, обеспечивающего селективную работу защит на токовом принципе или направленную;
- ограничения феррорезонансных явлений.

### **8. Режимы нейтрали сетей РАО «Газпром»**

В ПУЭ существующей и вновь разрабатываемой редакции для определения режима работы нейтрали сетей 6–35 кВ используется два параметра — напряжение сети и значение тока замыкания на землю. Исходя из этих параметров делаются однозначные выводы о том, какой режим нейтрали использовать — разземленная нейтраль или заземленная через дугогасящий реактор. Предпринятая попытка дополнить список режимов резистивным заземлением нейтрали предопределила увеличение числа параметров схемы, которые необходимо конкретизировать при определении параметров резистора в нейтрали.

Существующий в настоящее время несогласованный подход к выбору значений резисторов в нейтрали приводит к тому, что в одинаковых по конфигурации схемах с отличающимися значениями сопротивлений в нейтрали приходится использовать аппаратуру с разными параметрами, не говоря уже о алгоритмах работы релейной защиты.

Поэтому при разработке РД, регламентирующего режимы нейтрали сетей 6–10 кВ газовой промышленности, на первом этапе проведена систематизация сетей по определяющим признакам.

Варианты систем заземления нейтрали сети устанавливаются с учетом следующих условий:

- величина тока  $I_c$  однофазного замыкания на землю;
- минимальный уровень изоляции электрооборудования;
- наличие вращающихся электрических машин;
- возможность осуществления отключения присоединения с однофазным замыканием на землю с точки зрения потребителя (резервируемость присоединений);
- возможность организации селективной защиты от однофазного замыкания на землю;
- предельно допустимые величины токов ОЗЗ;
- электробезопасность;
- наличие явно выведенной нейтрали в сети с изолированной нейтралью.

Применительно к схемам сетей 6–10 кВ РАО «Газпром» можно применить градацию этих сетей по двум наиболее важным признакам — току замыкания на землю и наличию мощных вращающихся машин. Наличие вращающихся машин является принципиальным фактором, поскольку предполагает обязательное отключение ОЗЗ присоединения с двигателем и накладывает более жесткие требования на допустимые величины перенапряжений [10]. В таблице приведено разбиение схем объектов РАО «Газпром» по этим двум признакам.

## Характеристика сетей

Характеристика групп	Сеть, содержащая мощные вращающиеся машины (а)	Сеть без вращающихся машин (б)
I группа $I_c \leq 5A$	КС с электроприводными ГПА.	Распределительные подстанции с неразветвленной сетью.
II группа $5A < I_c < 20A$	Объекты, питаемые от электростанций собственных нужд ПАЭС. Объекты с комбинированным питанием от энергосистем и ПАЭС.	Сети питания жилых поселков и промзоны.
III группа $I_c \geq 20A$	Газоперерабатывающие заводы. Разветвленные сети с комбинированным питанием от энергосистем и ПАЭС.	Разветвленные сети питания жилых поселков и промзоны.

Для схемы типовой электроприводной КС ток однофазного замыкания отдельной секции шин определяется в основном емкостью кабелей, емкостью обмоток статора электродвигателей, емкостью ошиновки, емкостью кабелей секции собственных нужд и обычно не превышает значения  $I_c \leq 5A$ . Типовая схема КС относится к группе I-а приведенной классификации.

Если на шинах электроприводных КС отсутствуют присоединения, отключение которых в режиме ОЗЗ недопустимо (например, питание цепей управления или линий электрохимзащиты), то заземление нейтрали может осуществляться через **низкоомный резистор** ( $R_N = 150 \dots 250 \text{ Ом}$ ), позволяющий снизить дуговые и резонансные перенапряжения и осуществить быстродействующее селективное отключение ОЗЗ.

Защита от замыканий на землю на мощных электродвигателях должна предусматриваться с действием на отключение без выдержки времени.

Ограничением на использование низкоомных резисторов может служить недопустимое термическое воздействие дуги даже при быстром отключении ОЗЗ. С целью снижения термического воздействия дуги на статорные обмотки высоковольтных двигателей может быть использовано регулируемое резистивное заземление нейтрали. В этом случае резистор включается в рассечку треугольника специального **трансформатора Y/Δ, с возможностью регулирования номинала резистора**. Управление величиной активного тока в зависимости от напряжения нулевой последовательности позволяет исключить нежелательное повышение активного тока ОЗЗ при замыканиях обмотки двигателя вблизи высоковольтных выводов и обеспечить достаточную селективность релейной защиты при замыкании вблизи нейтральной точки обмотки. Такие решения возможны, если питание неотключаемых в режиме ОЗЗ присоединений осуществляется со специальной секции шин.

Для схем КС, в которых осуществляется пуск СД с помощью пусковой секции шин, за счет более разветвленной кабельной сети происходит увеличение уровней токов ОЗЗ. Питание секций шин собственных нужд, на которых **присутствуют присоединения, отключение которых в режиме ОЗЗ недопустимо**, осуществляется с основных секций шин. Это накладывает ограничения на использование низкоомного заземления нейтрали ( $R_N = 150 \dots 250 \text{ Ом}$ ). Для таких схем ограничение дуговых перенапряжений и повышение селективности защиты от замыканий на землю может быть осуществлено подключением к нейтрали **высокоомных резисторов** ( $R_N = 500 \dots 1500 \text{ Ом}$ ). Такие резисторы позволяют длительную эксплуатацию сети в режиме неустраненного ОЗЗ, в то же время, за счет введения активной составляющей в ток ОЗЗ, улучшают селективность индикации установленных токовых защит от ОЗЗ и исключают эскалацию перенапряжений в режиме дугового ОЗЗ.

**На газотурбинных КС** рекомендуется применять низкоомное заземление нейтрали сетей 6 (10) кВ с быстрым отключением поврежденного участка при ОЗЗ. Если быстрое отключение нежелательно, то рекомендуется применять высокоомное заземление нейтрали, при этом поиск и отключение поврежденного участка выполняется эксплуатационным персоналом вручную.

В этом случае достаточно обеспечить сигнализацию о наличии ОЗЗ в сети.

**Схемы распределительных подстанций технологического назначения**, не содержащие мощную двигательную нагрузку, как правило не имеют 100% резервирования питания отдельных видов нагрузки и могут быть отнесены к типу I-б (см. табл.). В этом случае неприемлемо решение об обязательном селективном отключении присоединений с ОЗЗ. Режим заземления нейтрали в таких схемах должен быть ориентирован на установку в нейтрали узловых точек схемы высокоомных резисторных установок, позволяющих демпфировать переходные процессы во всей схеме при работе делительной автоматики.

**Энергообъекты, питаемые от автономных электростанций**, как правило, представляют собой промышленные предприятия с непрерывным циклом производства. Токи ОЗЗ в таких схемах находятся в интервале  $5A < I_c < 20A$ , что позволяет отнести их к типу II-а. В отношении таких объектов также действует запрет на отключение в режиме ОЗЗ. Единственным решением для этих объектов может быть использование высокоомных резисторов в нейтрали.

**На электростанциях блочного исполнения** (со схемой генератор-трансформатор) рекомендуется применять заземление нейтрали генераторов через высокоомный резистор. На электростанции со сборными шинами генераторного напряжения при токах заземления на землю  $I_3 \leq 10$  А рекомендуется использовать низкоомное заземление нейтрали с работой защиты на отключение.

Согласно ПУЭ, при токах ОЗЗ, превышающих 20 А в сети 10 кВ и 30 А в сети 6 кВ, должна применяться компенсация емкостного тока замыкания на землю. Поэтому в разветвленных схемах питающих подстанций должны быть предусмотрены меры по ограничению перенапряжений в условиях подключения к нейтрали дугогасящих реакторов. Схемы, содержащие мощные синхронные двигатели, должны быть отнесены к типу III-а, без двигателей — к типу III-б.

Поскольку компенсация токов ОЗЗ вызвана только необходимостью уменьшения аварийного тока в месте замыкания, альтернативные варианты режимов заземления нейтрали должны исходить именно из условия снижения термического действия тока ОЗЗ. Это возможно при использовании быстродействующего селективного отключения ОЗЗ, в результате которого уменьшается время протекания тока ОЗЗ, что позволяет исключить реактивное сопротивление нейтрали и снизить сопутствующие опасные перенапряжения. В этом случае использование низкоомного резистора ( $R_N = 150 \dots 250$  Ом) позволяет осуществить быстродействующее отключение, в результате чего уменьшается термическое действие дуги тока ОЗЗ. Такое мероприятие может быть реализовано в сети с достаточной резервируемостью потребителей.

В сетях, для которых неприемлемо быстродействующее отключение потребителей, необходимо использовать подключение ДГР, позволяющее уменьшить ток в месте замыкания. Перенапряжения в реактированной сети возникают при разбалансе в настройке ДГР, превышающем 20%. Такой разбаланс достаточно частое явление в условиях поиска присоединений с ОЗ методом поэтапного отключения присоединений. В этой ситуации в сетях с токами, превышающими указанные в ПУЭ предельные значения, необходимо применять резистивное и реакторно-резистивное заземление нейтрали.

Исключение перенапряжений при разбалансе ДГР и создание условий для применения селективной защиты с определением и последующим плановым отключением ОЗ, осуществляется подключением параллельно ДГР резистора, с сопротивлением, определяемым исходя из максимального ожидаемого значения тока небаланса  $DI$  по соотношению  $R_N = 1.5 - 2.5 U_{\Phi} / \Delta I$ , что составляет для сетей 6–10 кВ при токах небаланса 20...30 А значения  $R_N = 120...500$  Ом.

### Литература

1. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. — 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 648 с.
2. Костенко М.В., Богаченков И.М., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю, включениях и отключениях индуктивных элементов // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Серия «Электрические станции и сети». — Т.17. — 105 с.
3. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений / Под научной ред. Н.Н.Тиходеева. — 2-е изд. — СПб.: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. — 153 с.
4. Электроустановки зданий. Основные положения. Требования по обеспечению безопасности. — М.: Изд-во стандартов, 1998. — 180 с.
5. Правила устройства электроустановок. Раздел 6. Электрическое освещение. Раздел 7. Электрооборудование специальных установок. Глава 1.7. Электроустановки жилых, общественных административных и бытовых зданий. Глава 7.2. Электроустановки зрелищных предприятий, клубных учреждений и спортивных сооружений. — 7-е изд. — М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 1999. — 80 с.
6. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Министерство топлива и энергетики РФ, РАО «ЕЭС России»: РД 34.20.501-95. — 15-е изд., перераб. и доп. — М.: СПО ОРГРЭС, 1996. — 160 с.
7. Правила эксплуатации электроустановок потребителей / Госэнергонадзор Минтопэнерго РФ. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 288 с.
8. Зильберман В.А., Эпштейн И.М., Петрищев А.С., Рождественский Г.Г. Влияние способа заземления нейтрали сети собственных нужд блока 500 МВт на перенапряжения и работу релейной защиты // Электричество. — 1987. — №12.
9. Васюра Ю.Ф., Гамилко В.А., Евдокунин Г.А., Утегулов Н.И. Защита от перенапряжений в сетях 6–10 кВ // Электротехника. — 1994. — № 5/6.
10. Нормы испытаний электрооборудования / Под ред. С.Г.Королева. — М.: Атомиздат, 1978.
11. Сирота И.М., Богаченко А.Е., Каневский Я.М. Опыт работы защиты от замыканий на землю статорных цепей генераторов, работающих непосредственно на сборные шины и электродвигателей высокого напряжения // Электрические станции. — 1993. — №7.
12. О частичном заземлении нейтрали в электрических сетях напряжением 6 и 10 кВ. ЦП-980-89 / Мингазпром, ПО «Союзоргэнергогаз», СУ «Леноргэнергогаз», 1989.
13. Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ // Электричество. — 1998. — №12.
14. О повышении надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков АЭС. Циркуляр Ц-01-97(Э). — М.: Росэнергоатом, 1997.
15. Методические указания по повышению надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков (частичное заземление нейтрали). — М.: Атомэнергопроект, 1997.
16. Евдокунин Г.А. Основные характеристики различных способов заземления нейтрали сетей 6–35 кВ // Защита от однофазных замыканий на землю в электроустановках 6–35 кВ: Сборник статей и информации кафедры релейной защиты и автоматики ПЭИПК. — СПб., 1999.
17. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под ред. И.А.Баумштейна. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Энергоиздат, 1981. — 656 с.
18. Шаргородский В.А. Релейная защита двигателей выше 1 кВ. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 248 с.
19. Заболотников А.П., Кадомская К.П., Тихонов А.А. Математическое моделирование и перенапряжения в электрических сетях 6...35 кВ. — Новосибирск: НГТУ, 1993. — 158 с.