

*Валькевич А.Н.*

**НАДЁЖНОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-35 кВ.  
ПРОБЛЕМА ОГРАНИЧЕНИЯ ДУГОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ**

*A.N. Valkevich*

**RELIABILITY OF THE ELECTRIC NETS OF 6-35 kV. THE PROBLEM  
OF SUPPRESSION OF ARC OVERVOLTAGES**

УДК: 621.316.1.027

*В статье представлены характеристика и состояния электрических сетей 6-35 кВ, особое внимание обращено проблемам ограничения дуговых и феррорезонансных перенапряжений. Статья содержит анализ возможных режимов нейтрали электрических сетей 6-35 кВ, основные преимущества и недостатки каждого из режимов.*

*The article contains the main characteristic and the condition of electrical nets of 6-35 kV. The especial attention is paid to the problem of restriction of arc and ferroresonance overvoltages. There is analysis of possible mode of operation of neutral point in electrical nets of 6-35 kV in the article. The primary advantages and disadvantages of every mode operation are considered.*

Широко распространённые сети среднего класса напряжения 6-35 кВ (сети промышленных предприятий, городов, сети собственных нужд электростанций и т.д.), как правило, являются очень разветвлёнными. Являясь наиболее протяжёнными, распределительные сети зачастую работают в весьма тяжелых условиях загрязнения, увлажнения, частых динамических и термических перегрузок, при этом средняя продолжительность эксплуатации большей части основного электрооборудования этих сетей значительно превышает нормативные сроки службы.

Поддавляющее число нарушений нормальной работы этих сетей связаны с повреждением изоляции относительно земли - с однофазным замыканием на землю. Наибольшую опасность представляют дуговые перенапряжения, возникающие в сети при перемежающемся (неустойчивом) характере горения дуги в месте пробоя фазной изоляции на землю. Дуговые перенапряжения делают небезопасным длительное существование однофазного замыкания на землю и могут привести к пробоям изоляции в других точках сети и, как следствие, к возникновению множественных повреждений. В свою очередь при однофазных замыканиях на землю создаются благоприятные условия для появления феррорезонансных перенапряжений, которые приводят к повреждению трансформаторов напряжения.

Изучению однофазных замыканий на землю, сопровождающихся горением перемежающейся электрической дуги в месте замыкания,

посвящено достаточно много работ [1, 2, 3, 4]. Основоположником исследований дуговых перенапряжений был немецкий электроэнергетик Петерсен, который в 1916 г. разработал теорию, объясняющую физическую сущность процесса возникновения максимальных перенапряжений. В 1923 г. американские инженеры Петерс и Слепян предложили другую теорию, принципиально отличную от теории Петерсена. Позднее эти теории дополнялись различными авторами на основании теоретических и лабораторных исследований в отношении уровней максимальных перенапряжений и формы их развития. В 1957 г. Н. Н. Беляковым была опубликована новая теория возникновения перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью [1]. Представленные теории отличаются друг от друга в различном представлении поведения дуги.

Теория Петерсена предполагает, что дуга гаснет при первом переходе через нуль тока высокочастотных колебаний и вновь зажигается через полпериода в момент максимума напряжения на повреждённой фазе.

Теория Петерса и Слепяна предполагает, что дуга гаснет при переходе через нуль тока промышленной частоты и зажигается вновь при максимальном значении напряжения промышленной частоты на поврежденной фазе.

Экспериментальные исследования Н.Н.Белякова показали, что дуга может гаснуть как при первом или последующем переходе через нуль высокочастотного тока, так и при переходе через нуль тока промышленной частоты.

Теоретические исследования [5, 6, 7, 8, 9, 10] и опыт эксплуатации показывают, что уменьшить величину дуговых перенапряжений и число замыканий на землю можно с помощью оптимизации режима нейтрали сетей 6-35 кВ.

Эффективное решение задачи существенного повышения уровня надежности работы распределительных сетей может быть найдено только в комплексном подходе к решению этой проблемы. С одной стороны, необходимо идти по пути постепенной замены электрооборудования с изношенной изоляцией на новое, для которого большинство внутренних перенапряжений не

будут опасны в такой степени, а с другой - принять меры по предельному снижению всех электрических воздействий на ослабленную изоляцию, создав условия для продления срока эксплуатации состарившегося электрооборудования.

Повышение надежности работы распределительных сетей может быть достигнуто путем существенного ограничения внутренних перенапряжений за счет оптимизации режима заземления нейтрали. Режим нейтрали электрической сети высокого напряжения является важнейшим фактором, определяющим характер эксплуатации электрооборудования, 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.

В настоящее время в мировой практике используются следующие способы заземления нейтрали сетей среднего класса напряжения (термин «среднее напряжение» используется в зарубежных странах для сетей с диапазоном рабочих напряжений 1-69 кВ):

- изолированная (незаземленная) нейтраль;
- глухозаземленная (непосредственно присоединенная к заземляющему контуру) нейтраль;
- нейтраль, заземленная через дугогасящий реактор;
- нейтраль, заземленная через резистор (низкоомный или высокоомный).

В табл. 1.1.[11] приведены способы заземления нейтрали, используемые в разных странах мира.

В Российской Федерации, согласно п.1.2.16 последней редакции Правил Устройства Электроустановок (ПУЭ), введенных в действие с 1 января 2003 г., «...работа электрических сетей напряжением 3-35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор». Таким образом, в настоящее время в сетях 6-35 кВ в Российской Федерации формально разрешены к применению все принятые в мировой практике способы заземления нейтрали, кроме глухого заземления. В Кыргызской республике действует предыдущее издание ПУЭ, в котором не предусматривается применение электрических сетей напряжением 3-35 кВ с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор.

Таблица 1.1.

Способы заземления нейтрали силового трансформатора в различных странах

Таблица	Класс напряжения кВ	Способ заземления нейтрали			
		Изолированная нейтраль	Через дугогасящий реактор	Через резистор	Глухое
Россия	6-35	+	+		
Австралия	11-12			+	+
Канада	4-25			+	+
США	4-25			+	+
Испания	10-30			+	+
Италия	10-20	+			
Португалия	10-30			+	
Франция	12-24			+	
Япония	6,6	+		+	
Германия	10-20		+		
Австрия	10-30		+		
Бельгия	6.3-17			+	
Великобритания	11			+	+
Швейцария	10-20		+		
Финляндия	20	+	+		

*Сети с изолированной нейтралью.* Основным достоинством сетей с изолированной нейтралью является высокая степень надежности электро-снабжения потребителей электрической энергии при относительно малых расходах на резервирование, поскольку при однофазных замыканиях на землю (наиболее частый вид повреждения) сеть может оставаться в работе длительное время (до четырех часов), что достаточно для отыскания и устранения места повреждения.

Однако, при однофазных замыканиях на землю имеется возможность длительного воздействия дуговых перенапряжений на изоляцию электрических сетей с изолированной нейтралью, что приводит к возникновению множественных повреждений (выход из строя нескольких электродвигателей, кабелей и т.д.).

Во многих странах, таких, как США, Канада, Англия, Австралия, Бельгия, Португалия, Франция и другие, отказ от режима изолированной нейтрали произошел в 40–50-х годах прошлого века. В Российской Федерации и странах СНГ до последнего времени режим изолированной нейтрали был закреплен в ПУЭ. Именно этим объясняется сложившееся положение, когда даже в сетях с высоковольтными электродвигателями, где защита от однофазных замыканий выполнена с действием на отключение без выдержки времени, применяется режим изолированной нейтрали.

*Сети с компенсированной нейтралью.* Самым распространенным в России и странах

СНГ в настоящее время методом предотвращения аварийных последствий от однофазных замыканий в рассматриваемых сетях является заземление нейтрали сетей через настроенные дугогасящие катушки индуктивности (ДГК). ДГК, сохраняя преимущества сетей с изолированной нейтралью, призваны улучшить условия работы электрооборудования при однофазных замыканиях на землю. Такое улучшение предполагается за счет существенного снижения скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе после погасания дуги и уменьшения тока в месте замыкания на землю до уровня активной составляющей и высших гармоник. Вследствие этого, происходит самопроизвольное погасание дуги, а, следовательно, сокращение объемов разрушений, связанных с термическим действием заземляющей дуги, а также снижением кратности перенапряжений до безопасной величины, так как появляются пути для стекания на землю статических зарядов с емкости элементов сети здоровых фаз. Однако достижение таких результатов наблюдается при точной настройке индуктивности ДГК в резонанс с емкостью сети. В реальных сетях настроить точно в резонанс индуктивность используемых в настоящее время ДГК невозможно. В ПТЭ [12] допускается расстройка ДГК 5%. При расстройке в 5% восстанавливаемое напряжение на поврежденной фазе имеет характер биений. Максимумы биений восстанавливаемого напряжения в этом случае могут вызвать повторные пробои, что не исключает появления дуговых перенапряжений.

В нормальном режиме сети при наличии несимметрии ДГК из-за преобладания в катушке индуктивного сопротивления перед активным сопротивлением может привести к значительным смещениям нейтрали, которое существенно превышает фазное напряжение.

*Сети с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор.* Одним из способов снижения величины дуговых перенапряжений в электрических сетях 6-35 кВ и числа замыканий на землю, сохранив тем самым возможность работы сети без автоматического отключения однофазных повреждений, является включение в нейтраль сети высокоомного резистора.

В последние годы в Кыргызской Республике в связи с участившимися случаями повреждения трансформаторов напряжения остро стоит вопрос о защите сетей 6-35 кВ от дуговых и феррорезонансных перенапряжений. Одной из мер защиты оборудования 6-35 кВ предполагается разработка и использование высокоомного резистора.

Первым условием, которое определяет параметры для разработки конструкции резистивного сопротивления, является равенство емкостной  $I_c$  и активной  $I_a$  составляющих токов однофазного замыкания на землю:

$$R_N = \frac{U_\phi}{I_c} = \frac{1}{3\omega C} \approx \frac{1}{900C}, \quad (1.1)$$

где  $R_N$  – величина высокоомного сопротивления;

$U_\phi$  – амплитудное значение фазного напряжения сети;

$C$  – ёмкость фазы сети по отношению к земле.

Второе условие предполагает полное стекание заряда в паузу между повторными дуговыми замыканиями (полпериода промышленной частоты  $t = 0,01c$ ). В этом случае постоянная времени стекания заряда  $T$  определяется выражением:

$$T = 3R_N C$$

При времени полного стекания заряда  $t = 3T = 0,01c$  получаем:

$$R_N = \frac{0,01}{3 \cdot 3C} = \frac{1}{900C}; \quad (1.2)$$

Следовательно, мы имеем два одинаковых условия выбора резистивного сопротивления. Таким образом, выбор величины активного сопротивления резистивного сопротивления зависит от величины емкостного тока однофазного замыкания на землю в месте установки резистора.

В этом случае кратность перенапряжений не превышает кратности перенапряжений при первом зажигании дуги, так как при наличии резистора обеспечивается практически полное стекание заряда нулевой последовательности (равенство нулю напряжения на нейтрали) за время от момента самогашения дуги до момента возникновения максимального напряжения на поврежденной фазе, которое становится близким к фазному. В том случае, если установится процесс многократных зажиганий и гашений дуги, то кратность дуговых перенапряжений не превысит таковую при первом зажигании.

Важной особенностью применения высокоомного резистивного заземления нейтрали является то, что при снижении емкости сети постоянная времени стекания заряда нулевой последовательности через выбранный резистор уменьшится, и, следовательно, стекание заряда будет происходить ещё быстрее. Следует отметить также, что высокоомный резистор может быть применен и как средство, улучшающее режим работы сети с трудно устранимой несимметрией емкостей до 30-40% для обеспечения напряжения на нейтрали  $U_N$  в

несимметричных режимах не выше нормированного  $U_N=0,7U_\phi$ . Применение высокоомного резистора упрощает (по сравнению с сетями с изолированной или заземленной через ДГР нейтралью) выполнение селективной релейной защиты от замыканий на землю, а также является одним из основных мероприятий по защите трансформаторов напряжения от феррорезонансных перенапряжений.

*Сети с нейтралью, заземленной через дугогасящую катушку и высокоомный резистор.* Снижение перенапряжений в сети при расстройке дугогасящего реактора (а также при несимметричных режимах, сопровождающихся резонансными перенапряжениями) может быть достигнуто путем применения высокоомного резистора, включенного параллельно ДГР [13]. Данная схема заземления нейтрали не имеет применения, она находится на стадии изучения. Выбор резистора с помощью соотношения [13]

$$R_N = U_\phi / \Delta I_3 \quad (1.3)$$

(относительно тока расстройки  $\Delta I_3 = |I_a| - |I_c|$ ) приводит к прекращению биений напряжений на фазах после погасания дуги и, как следствие, к прекращению пробоев в поврежденной фазе при пробивном напряжении ослабленного места больше фазного ( $U_{np} > U_\phi$ ). Максимальная кратность перенапряжений здесь определяется первым замыканием и не превышает  $U_{max} = (2.2...2.4)U_\phi$ . Применение высокоомного резистора в случае резонансной настройки приводит к некоторому увеличению числа повторных зажигания, но только для  $U_{np} < U_\phi$ . Высокоомный резистор весьма благоприятно сказывается на снижении времени воздействия повышенных напряжений на изоляцию неповрежденной фаз даже в случае расстройки резонансной настройки ДГР, что является несомненным достоинством такой схемы заземления нейтрали.

#### Выводы

1. Подавляющее число нарушений нормальной работы электрических сетей 6-35 кВ связано с однофазным замыканием на землю. Наибольшую опасность представляют дуговые однофазные перенапряжения. Дуговые перенапряжения делают небезопасным длительное существование однофазного замыкания на землю и могут привести к пробоям изоляции в других точках сети и, как следствие, к возникновению множественных повреждений.
2. Повышение надежности работы распределительных сетей может быть достигнуто путем существенного ограничения внутренних перенапряжений за счет оптимизации режима заземления нейтрали. Этот режим определяет

переходные электромагнитные процессы и связанные с ними перенапряжения.

3. Наличие высокоомных резисторов в нейтрале 6-35 кВ силовых трансформаторов обеспечивает более глубокое ограничение дуговых перенапряжений, приводит к прекращению биений напряжений на фазах после гашения дуги в сетях с компенсированной нейтралью, что снижает вероятность повторных пробоев при дуговых однофазных замыканиях на землю. Следовательно, применение высокоомного сопротивления в нейтрале электрических сетей 6-35 кВ является эффективным средством защиты электрооборудования от дуговых замыканий на землю.
4. Применение высокоомного резистора упрощает (по сравнению с сетями с изолированной или заземленной через ДГР нейтралью) выполнение селективной релейной защиты от замыканий на землю, а также является одним из основных мероприятий по защите трансформаторов напряжения от феррорезонансных перенапряжений.

#### Литература:

1. *Беляков Н. Н.* Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью. // *Электричество*. 1957. №5.
2. *Джуварлы Ч. М.* Основные результаты исследования перенапряжений от
3. *заземляющих дуг.* // *Электрические станции*. 1951. №5.
4. *Джуварлы Ч. М.* К теории перенапряжений от заземляющих дуг в сети с изолированной нейтралью. // *Электричество*. 1953. №6.
5. *Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Таджибаев А.И.* Защита сетей 6-35кВ от перенапряжений. – Санкт-Петербург, 2002.
6. *Агафонова Н.Е.* Повышение надежности работы электрооборудования распределительных сетей с компенсацией емкостных токов на землю // *Промышленная энергетика*. 1998. №1.
7. *Лихачев Ф.А., Бойко В.И., Змиевский В.М., Панасюк Д.И., Стреляев П.И.*
8. *Компенсация емкостных токов в сетях 6 – 10 кВ.* // *Электрические станции*. 1978. №10.
7. *Лихачев Ф. А.* Повышение надежности распределительных сетей 6 – 10 кВ. // *Электрические станции*. 1981. №11.
8. *Алексев В. Г., Дунайцев С. Г., Зихерман М. Х., Ильин В. П.* Исследование режимов работы трансформаторов напряжения контроля изоляции в сетях 6–10 кВ. // *Электрические станции*. 1980. №1.
9. *Виштинбеев А.В.* Принципы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ для повышения надежности эксплуатации // *Материалы Международной научно-технической конференции*. Выпуск 1. – Санкт – Петербург, 2003.
10. *Виштинбеев А.В., Кадомская К.П.* О резистивном заземлении нейтрали в сетях 6–35 кВ // *Энергетик*. 2001. №3.

11. *Титенков С.С.* 4 режима заземления нейтрали в сетях 6 – 35 кВ. Изолированную нейтраль объявим вне закона.// *Новости Электротехники*. 2003. №5(23).
12. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Издание 15-е, переработанное и дополненное. РД 34.20.501-95 – М., 1996.
13. *Евдокунин Г.А., Титенков С.С.* Внутренние перенапряжения в сетях 6-35 кВ. Санкт-Петербург, 2004.