



# НОВОСТИ Электротехники

ИНФОРМАЦИОННО-СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Журнал №5 (65) 2010 год

Сергей Дмитриев, директор МП «Городские электрические сети» муниципального образования город Ханты-Мансийск

Сергей Нестеров, к.т.н., Юрий Целебровский, д.т.н., профессор, Новосибирский государственный технический университет

## ГОРОДСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

### Обеспечение надежности и безопасности электроснабжения

Одной из характерных особенностей систем электроснабжения малых городов является сочетание в электрических сетях среднего напряжения (6–35 кВ) воздушных (ВЛ) и кабельных (КЛ) линий электропередачи.

Если для кабелей на первый план выходит надежность самих КЛ, связанная со старением изоляции и в некоторых случаях с коррозией алюминиевых оболочек, то для ВЛ наиболее существенным фактором является обеспечение электробезопасности. Большие токи однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях без компенсации емкостного тока, обусловленные наличием КЛ, создают при любом замыкании в воздушной сети опасные и смертельные напряжения прикосновения. Компенсация емкостного тока в таких сетях, как показывает практика, весьма серьезная проблема, вызванная постоянной изменчивостью параметров сети и трудностями автоматической подстройки дугогасящих реакторов (ДГР) в большом диапазоне токов, связанной, кроме того, с наличием заметной несимметрии сети, исключающей точную настройку. Другой проблемой является ненадежная работа разнообразных селективных защит от ОЗЗ, дающих сбой при переходных процессах, дуговых замыканиях с перемежающейся дугой, замыкании фазы на землю через большое переходное сопротивление и т.п.

Все эти проблемы своей исходной точкой имеют существенные недостатки нормативной базы [1, 2] и трудно изменяющиеся традиции эксплуатации сетей среднего напряжения. Создаваемые в соответствии с Законом РФ «О техническом регулировании» стандарты предприятий практически повторяют в рассматриваемой части требования ПУЭ и ПТЭ, не устраняя недостатки последних. Технического регламента о безопасности электрических станций и сетей, предусмотренного упомянутым законом, пока не существует.

В цикле статей мы изложим свои соображения о недостатках существующей НТД, ошибках при выполнении верных требований и путях улучшения ситуации.

## Однофазные замыкания на землю

В данном материале из множества задач и проблем повышения надежности электроснабжения малых городов мы выделили одну, которая представляется нам наиболее существенной. Это неотключаемые ОЗЗ. Существование такого режима в сети электроснабжения города и поселка вызывает целый ряд явлений, процессов и событий, существенно снижающих надёжность и электробезопасность сети. К ним относятся:

- старение кабельной изоляции и снижение срока службы кабельных линий;
- дуговые перенапряжения и феррорезонансные явления, приводящие в итоге к серьезным повреждениям оборудования;
- невозможность существенно снизить внешние перенапряжения современными средствами (ОПН), выбираемыми по линейному напряжению (а не по фазному);
- существование длительных электроопасных ситуаций у опор ВЛ 6–35 кВ, в районе оборванных и упавших на землю проводов, а также у открытых проводящих частей сетей 0,4 кВ, питающихся по системе TN от подстанций 6–10/0,4 кВ. Это подтверждается общероссийской статистикой тяжелых и смертельных несчастных случаев.

Одной из наиболее устойчивых традиций эксплуатации является мнение о допустимости работы сети с ОЗЗ. Немного утрируя, эту традицию следует назвать «идеологией бедности», а в некоторых случаях и «идеологией лени». В настоящее время все городские сети имеют возможности резервирования, поэтому реализовать селективное отключение и автоматическое включение резерва принципиально всегда возможно. Однако упомянутой традиции способствует не всегда надежная работа защит от ОЗЗ. Эту проблему мы рассмотрим подробно в следующих статьях.

Статистика ОЗЗ показывает, что во многих случаях ОЗЗ достаточно быстро переходят в двухфазные или двойные замыкания на землю и отключаются соответствующими защитами. Этому способствуют процессы, сопровождающие однофазные замыкания в сетях 6–35 кВ, – дуговые перенапряжения и феррорезонансные явления. Осциллографический мониторинг замыканий в городских электрических сетях Ханты-Мансийска показал, что 38% замыканий переходят в двухфазные и отключаются максимальной токовой защитой. Если оставшиеся однофазные замыкания принять за 100%, то 29,5% из них самоликвидируются. Причем диспетчерским персоналом регистрируется только 3% из них, у которых время самоликвидации доходит до нескольких минут, а иногда и до десятков минут. Остальные замыкания, как показали осциллограммы, самоликвидируются за время менее 0,5 с. Из оставшихся ОЗЗ 44% носят устойчивый («металлический») характер, а 26,5% сопровождаются перемежающейся дугой.

В эксплуатационной практике России традиционно следуют требованиям пункта 2.8.11 ПТЭ [2]: *«В сетях с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостных токов допускается работа воздушных и кабельных линий электропередачи с замыканием на землю до устранения повреждения».* Хотя в том же пункте ниже написано: *«В электрических сетях с повышенными требованиями по условиям электробезопасности людей (а это и есть город с воздушными линиями и большими токами замыкания на землю – Примеч. авторов) ... работа с однофазным замыканием на землю не допускается. В этих сетях все отходящие от подстанции линии должны быть оборудованы защитами от замыканий на землю».* То же самое имеется и в ПУЭ [1]:

*«1.7.64 ... Защита от замыканий на землю должна устанавливаться с действием на отключение по всей электрически связанной сети в тех случаях, в которых это необходимо по условиям безопасности...».*

Вопросы безопасности мы рассмотрим ниже, а сейчас немного коснемся надежности КЛ. На конференциях [3], в технической литературе сейчас усиленно дискутируется вопрос о целесообразности испытаний кабелей повышенным напряжением. Последнее, так или иначе, разрушительно влияет на изоляцию кабеля и сокращает срок ее службы. Аналогичное влияние оказывает и длительное пребывание изоляции кабелей под линейным напряжением, которое воздействует на изоляцию кабеля при неотключаемых ОЗЗ. Опасность повреждения кабеля возрастает при этом с его старением. Можно предположить, что большинство КЗ в давно эксплуатируемых кабельных сетях являются следствием неотключаемого ОЗЗ.

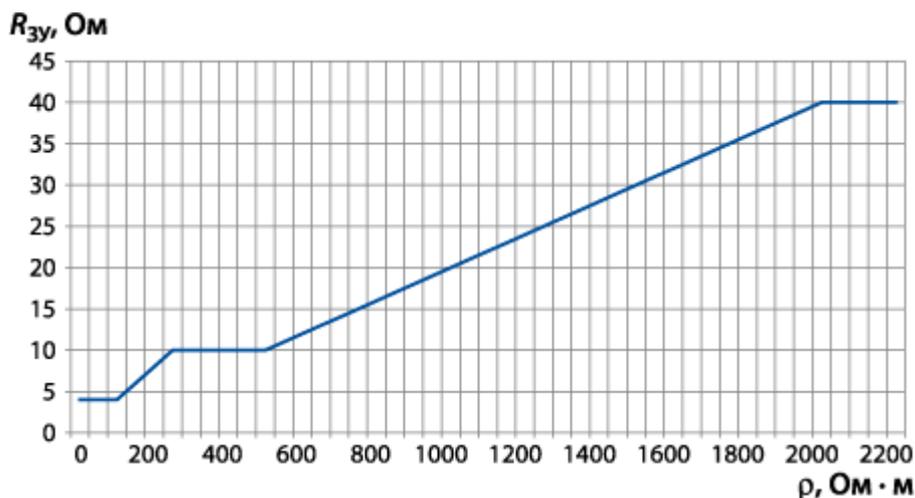
### **Обеспечение электробезопасности при ОЗЗ**

ПУЭ 7-го изд. [1] ослабило требования к заземляющим устройствам (ЗУ) рассматриваемых электроустановок. В соответствии с п. 1.7.96 сопротивление ЗУ не должно превышать  $250/I$ , где  $I$  – ток замыкания на землю или увеличенный на 25% номинальный ток дугогасящего реактора. Это требование означает, что при замыканиях на землю напряжение на ЗУ допускается равным 250 В! Если бы речь шла только о подстанции 35/10(6) кВ, которая не питает потребителей напряжением до 1 кВ, то такая цифра была бы приемлемой (при условии, что ограждение подстанции не подсоединено к ЗУ).

Однако большинство городских подстанций – это ТП 10/0,4 кВ, а сеть 0,4 кВ в соответствии с ПУЭ организована по системе TN, когда нулевой защитный и рабочий проводники подсоединены к ЗУ ТП. Это означает, что при замыкании на землю на ТП указанное напряжение появляется на нулевых проводах (проводе) и на всех подсоединенных к нему корпусах (открытых проводящих частях) электроприемников обширной сети 0,4 кВ. В шестом и более ранних изданиях ПУЭ для этих случаев предусматривалось допустимое значение сопротивления  $125/I$ , что при наличии повторных заземлений нулевого провода уже более приемлемо.

Напряжение на ЗУ (а не сопротивление ЗУ) – это главный критерий безопасности, определяющий воздействие на человека при прикосновении последнего к поврежденному оборудованию. Поэтому странно, что во всем последующем тексте гл. 1.7 ПУЭ про этот критерий больше не упоминается. Более того, при увеличении удельного сопротивления грунта допускается увеличивать сопротивление заземления без оглядки на значения тока замыкания и напряжения, возникающие при ОЗЗ на заземлителе подстанции. Суммируя все возможности увеличения сопротивления заземления (п. 1.7.101, 1.7.108 ПУЭ), получаем кривую допустимых сопротивлений в зависимости от удельного сопротивления грунта (рис. 1) [4]. Из рисунка видно, что сопротивление может достигать 40 Ом, что при допустимом некомпенсированном токе замыкания на землю в 10 А (п. 1.2.16 ПУЭ) означает возможность появления на открытых проводящих частях оборудования и бытовых приборов, работающих в сети 0,4 кВ, напряжения в 400 В.

**Рис. 1. Нормативные значения сопротивления заземления ПС 6–35/0,4 кВ в зависимости от удельного сопротивления грунта**



Если замыкание произошло на опоре ВЛ, то у опоры ВЛ возникает напряжение прикосновения 100 В и выше, ибо опоры в населенной местности должны иметь сопротивление заземления 10 Ом и менее (п. 2.5.129 ПУЭ). Следует отметить, что это в первую очередь относится к сети с ВЛ.

В сети, состоящей только из КЛ, проблемы заземления с позиций ОЗЗ практически не существует. Ток замыкания на землю по земле не растекается, а протекает в основном по металлическим оболочкам и экранам кабелей, замыкаясь через емкости «оболочка – здоровые фазы». Несущественные доли тока через землю создают незначительные напряжения прикосновения, не превышающие, как правило, нескольких вольт. В соответствии с [5] напряжение тока промышленной частоты 2 В не ощущается человеком и допустимо при длительном прикосновении, а напряжение ниже 20 В не вызывает судорог и допустимо при кратковременном прикосновении.

В электрической сети, включающей как ВЛ, так и КЛ, ситуации могут быть самыми различными, и даже при строгом выполнении норм степень электроопасности может соответствовать в некоторых случаях чисто воздушным сетям. Увеличению электроопасности способствуют некомпенсированные токи ОЗЗ, достигающие иногда десятков ампер.

### **Результаты практических измерений**

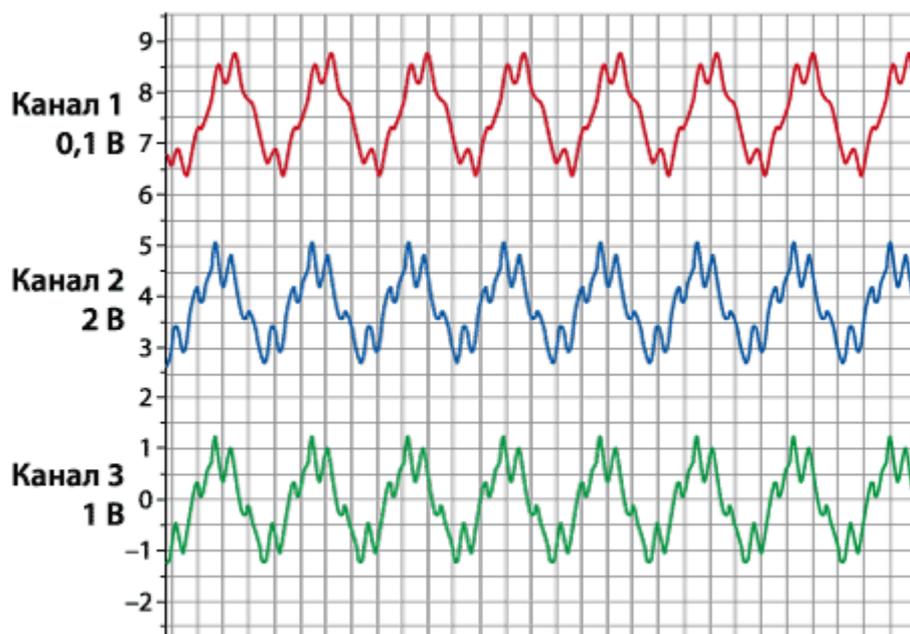
На практике по тем или иным причинам выполненные и эксплуатируемые ЗУ могут не соответствовать даже описанным нормам ПУЭ. Нами были проведены многочисленные измерения сопротивления ЗУ в городе. Измерение параметров ЗУ производилось при помощи приборов ПИНП, Ф-4103 и цифрового осциллографа. Сопротивление ЗУ определялось путем снятия потенциальной кривой. При измерениях напряжений прикосновения учитывалось сопротивление основания за счет применения измерительного электрода в виде металлической пластины размерами  $25 \times 25$  см<sup>2</sup>, располагаемой у входа в здание РП, у привода разъединителей и т.п.

С помощью цифрового осциллографа, делителей и шунтов производились измерения емкостного тока ОЗЗ, напряжения на ЗУ при ОЗЗ и напряжения прикосновения. Примеры результатов измерений показаны в табл. 1 и на рис. 2.

**Таблица 1. Результаты измерений емкостного тока ОЗЗ**

№ канала	Источник сигнала	Коэффициент деления блока делителей	Измеренное действующее значение напряжения	Значения регистрируемых величин
Закоротка в яч. № 5. Питание с ф. 23 РП-8				
1	$I_{\text{ОЗЗ с адаптера}}$	1:4	71,9 мВ	71,9 А
2	$U_{\text{прик. ож.}}$	1:4	1,27 В	5,1 В
3	$U_{\text{ЗУ}}$	1:10	0,68 В	6,8 В
Закоротка в яч. № 6. Питание с ф. 22 РП-8				
1	$I_{\text{ОЗЗ с адаптера}}$	1:4	74,2 мВ	74,2 А
2	$U_{\text{прик. ож.}}$	1:4	1,12 В	4,48 В
3>	$U_{\text{ЗУ}}$	1:10	0,59 В	5,9 В

**Рис. 2. Осциллограммы тока (канал 1), напряжения прикосновения (канал 2) и напряжения на ЗУ (канал 3) при ОЗЗ**



В табл. 2 приведены характерные значения сопротивлений заземляющих устройств и напряжений прикосновения в электроустановках, измеренные при опытах ОЗЗ.

**Таблица 2. Напряжения прикосновения в сетях Ханты-Мансийска, измеренные при ОЗЗ**

№ п/п	Условное наименование электроустановки	Сопротивление заземления, Ом	Напряжение прикосновения при ОЗЗ, В
1	ТП 123	0,08	5,1
2	ТП 20	0,07	0,25
3	ТП 26	0,04	1,2
4	ТП 6	0,2	2,5
5	ТП 166	0,06	0,64
6	РП8	0,05	2,2
7	ТП 3001	0,3	У внешнего ограждения – 43,9 У привода разъединителя – 124,1
8	ТП 3024	0,12	У внешнего ограждения – 3,2 У КТПН – 2,1 У привода разъединителя – 4,4
9	ТП 3031	0,2	У внешнего ограждения – 3,4 У привода разъединителя – 6,2
10	ТП 5112	0,28	У внешнего ограждения – 6,7
			У привода разъединителя – 3,2
11	ТП 3233	0,4	11,8
12	ТП 3202	0,85	20,8
13	ТП 1315	0,62	У металлического основания – 9 У привода разъединителя – 654
14	Опора с разъединителем Ф 11–34	0,46	20,3
15	Опора № 17 с разъединителем Ф. 7–10	4,5	165
16	Опора № 12 с разъединителем Ф. 11–10	6,3	151
17	ТП 1316	5,5	У КТПН – 22,6 У привода разъединителя – > 1000 В
18	ТП 1313	0,25	У КТПН – 3,7 У привода разъединителя 3,7
19	ТП 1116	0,65	У КТПН – 10,5 У привода разъединителя – > 1000 В
20	ЯКНО10	0,7	У КТПН – 2,9 У привода разъединителя – 2,9

Из табл. 2 можно видеть, что сопротивление заземления в большинстве случаев имеет значение значительно меньше нормируемого и лишь в 3-х случаях имеет сопротивление выше 4 Ом, допустимых для заземления нейтрали сети 0,4 кВ. В то же время напряжения прикосновения в 30% случаев превышают нормируемые ГОСТ

12.1.038-82 20 В (выделено красным), т.е. выходят за пределы 20 В. Особенно опасное положение у опор с разъединителями, где напряжение прикосновения может превысить 1000 В.

В данном материале из множества задач и проблем повышения надёжности электроснабжения малых городов мы выделили одну, которая представляется нам наиболее существенной. Это неотключаемые однофазные замыкания на землю. Существование такого режима в сети электроснабжения города и посёлка вызывает целый ряд явлений, процессов и событий, существенно снижающих надёжность и электробезопасность сети. К ним относятся:

- старение кабельной изоляции и снижение срока службы кабельных линий;
- дуговые перенапряжения и феррорезонансные явления, приводящие в итоге к серьёзным повреждениям оборудования;
- невозможность существенно снизить внешние перенапряжения современными средствами (ОПН), выбираемыми по линейному напряжению (а не по фазному);
- существование длительных электроопасных ситуаций у опор ВЛ 6–35 кВ, в районе оборванных и упавших на землю проводов, а также у открытых проводящих частей сетей 0,4 кВ, питающихся по системе TN от подстанций 6–10/0,4 кВ. Это подтверждается общероссийской статистикой тяжёлых и смертельных несчастных случаев.

По нашему мнению основными мероприятиями по повышению надёжности городских сетей в свете описанной ситуации должны стать:

- повсеместный переход на заземление нейтрали сети через резистор с большим сопротивлением;
- установка надёжных селективных защит от замыканий на землю с действием на отключение;
- выбор и установка ОПН на фазное напряжение, что становится возможным при реализации первых двух мероприятий.

В этом направлении в последние годы велись работы в городских электрических сетях Ханты-Мансийска, о результатах которых и накопленном опыте мы расскажем в последующих публикациях.

## Литература

1. Правила устройства электроустановок. Раздел 1. Общие правила. Главы 1.1, 1.2, 1.7, 1.9. Раздел 7. Электрооборудование специальных установок. Главы 7.5, 7.6. – 7-е изд. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. 176 с.
2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Утв. Приказом Минэнерго России № 6 от 13.01.03. Введены в действие с 01.07.2003.
3. Энергоснабжение городов. Проблемы обсуждали в Петербурге // Новости ЭлектроТехники. 2010. №1 (61).
4. Целебровский Ю.В. О необходимости пересмотра требований к заземляющим устройствам электроустановок напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью // Вторая Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов / под ред Ю.В. Целебровского. Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2005. С. 15–23.
5. ГОСТ 12.1.038-82 Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов // Система стандартов безопасности труда. Часть 3. М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. С. 237–243.