

УДК 621.316.99

Разработка технических мероприятий по компенсации емкостных токов замыкания на землю и ограничению перенапряжений в промышленных распределительных электрических сетях

А.Е. Веселов, Ю.М. Невретдинов, В.В. Ярошевич, И.Е. Кабеев,
Г.П. Фастий, Е.А. Токарева

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,
лаборатория надежности и эффективности оборудования энергосистем*

Аннотация. Приводится характеристика внутренних перенапряжений в распределительных электрических сетях 6-10 кВ промышленных предприятий. На примере схемы электроснабжения комбината "Североникель" показана проблематичность определения единого подхода при выборе режима заземления нейтрали. Приводятся расчетные оценки значений токов однофазных замыканий на землю в сети 10 кВ комбината для нормальных и ремонтных режимов. Предложены технические мероприятия по изменению режимов работы нейтралей секционированных участков, позволяющие компенсировать емкостные токи замыкания на землю и ограничить уровни перенапряжений.

Abstract. The characteristic of system-generated overvoltage in the distribution power grid 6-10 kV of industrial enterprises has been given. The problematical character of the determination of the unified approach with the selection of the neutral grounding condition based on the example of the power supply drawing of Severonickel metallurgical combine has been shown. The calculated values of the single-phase ground short currents in the combine network 10 kV for the normal and repair regimes have been given. Some technical measures for a change in the neutral grounding mode of the subdivided sections to compensate the capacitive ground short currents and to limit the overvoltage levels have been proposed.

1. Введение

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях с изолированной нейтралью 6-35 кВ – основная причина большинства аварий, увеличения вероятности внутренних перенапряжений и их уровня, преждевременного выхода из строя электрооборудования высокого напряжения и обесточивания потребителей. При металлическом однофазном замыкании на землю в результате однократного переходного процесса перенапряжение на неповрежденных фазах носит характер кратковременного пика с амплитудой до (2.1-2.5) U_{ϕ} . Но наиболее часто замыкания на землю осуществляются через дуговое перекрытие изоляции. В этом случае в результате гашений и повторных зажиганий дуги возникают дуговые перенапряжения, которые имеют наибольшую величину на неповрежденных фазах. Это может привести к перекрытию изоляции неповрежденной фазы в ослабленном месте и, соответственно, к двойному замыканию на землю. Кроме того, при ОЗЗ изменяется емкость системы, в результате чего возможны возбуждения резонансных и феррорезонансных перенапряжений.

В настоящее время перенапряжения в сетях 6-35 кВ достаточно изучены, и имеется много экспериментального материала по их видам и кратностям. В табл. 1 приведены уровни основных внутренних перенапряжений, характерных для сетей данного класса напряжений (Аношин, 2003).

Можно выделить два основных направления решения проблемы снижения аварийности и повышения эффективности системы электроснабжения. Одно из них – совершенствование методов ограничения опасных факторов и своевременная замена изношенного сетевого оборудования. Второе – кардинальное изменение режима заземления нейтрали:

- 1) низкоомное заземление;
- 2) компенсация емкостных токов ОЗЗ;
- 3) заземление через высокоомный резистор.

Проблема выбора способа заземления нейтрали должна решаться индивидуально для каждой электрической системы питания и потребления. Получение максимума преимуществ от выбранного способа заземления должно увязываться со специфическими требованиями производственного процесса, основным из которых, как правило, является надежность системы электроснабжения и стоимость обеспечения заданной надежности.

Таблица 1. Характеристика внутренних перенапряжений по (Аношин, 2003)
(сети с изолированной нейтралью)

№	Вид перенапряжений	Кратность перенапряжений
1	Дуговые замыкания на землю	3.0-3.5
2	Поиск "земли" при ОЗЗ	4.0-6.0
3	Резонансные перенапряжения	до 4.0
4	Включение электродвигателей	2.6-3.3
5	Включение электродвигателей при наличии в сети ОЗЗ	3.4
6	АПВ и АВР электродвигателей	4.0-4.5
7	Включение КЛ и ВЛ при наличии в сети ОЗЗ	3.0-3.5
8	Отключение ненагруженных ВЛ и КЛ	3.0-4.5
9	Отключение ненагруженных трансформаторов	5.0-6.0
10	Отключение двойного замыкания на землю	3.3
11	Отключение вращающихся электродвигателей	4.0-5.0
12	Отключение заторможенных электродвигателей	5.0-6.0

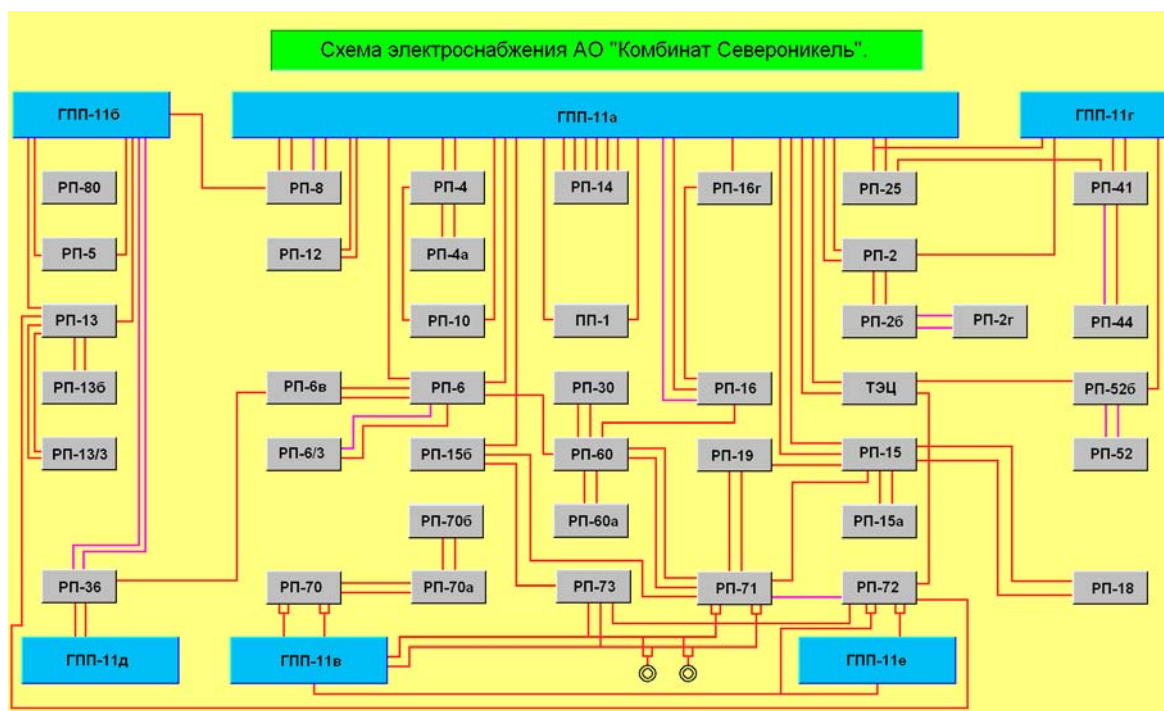


Рис. 1. Схема электроснабжения АО комбината "Североникель"

2. Выбор способа заземления нейтрали в схеме электроснабжения комбината "Североникель"

Рассмотрим проблему выбора способа заземления нейтрали на примере системы электроснабжения комбината "Североникель" (рис. 1).

Комбинат получает электроэнергию от шести главных понижающих подстанций (ГПП) напряжением 150/10 кВ, расположенных в центрах электрических нагрузок отдельных узлов потребления электроэнергии: ГПП-11А, ГПП-11Б, ГПП-11В, ГПП-11Г, ГПП-11Д, ГПП-11Е. Распределение электроэнергии от ГПП к отдельным распределительным подстанциям (РП) и трансформаторным подстанциям (ТП) осуществляется преимущественно кабельными линиями 10 кВ. На рис. 1 приведена схема связи отдельных РП с соответствующими ГПП, а также между РП. Как видно, схема включает около 40 подстанций 10 кВ.

Распределительная сеть 10 кВ комбината имеет сложную структуру и разветвленную кабельную сеть – более 700 кабельных линий. Общая длина кабелей 10 кВ превышает 250 км. Сеть 10 кВ разделена на восемнадцать секционированных участков, подключенных к соответствующим шинам шести головных подстанций ГПП-11А – ГПП-11Е и имеющих разнообразную и достаточно сложную структуру. Суммарная длина кабелей, подключенных к отдельным (секционированным) участкам сети 10 кВ колеблется от 2 км (II система шин (с.ш.) ГПП-11В) до 58 км (II с.ш. ГПП-11А). Соответственно величина тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) различных участков сети 10 кВ составляет в нормальном режиме от 2 А до 70 А.

Практика эксплуатации кабельных линий 10 кВ распределительной сети промплощадки комбината "Североникель", по данным службы эксплуатации цеха сетей и подстанций, показывает, что однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в этих сетях являются основной причиной большинства аварий в системе электроснабжения комбината. При этом из-за пробоя изоляции кабелей, подверженной интенсивному старению и разрушению под влиянием агрессивной окружающей среды, однофазные замыкания достаточно быстро переходят в трехфазные, что приводит к неизбежному отключению питающих линий, и, как следствие, снижению общей надежности электроснабжения комбината.

Изменение емкости секционированных участков сети и соответствующих токов ОЗЗ происходит также вследствие аварийных и ремонтных переключений. Расчетные значения токов ОЗЗ для нормального и ремонтного режимов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики изменений токов ОЗЗ в сети головных подстанций

ГПП	Система шин	Значения тока ОЗЗ, А в режимах		Кратность изменения тока ОЗЗ
		нормальный	ремонтный	
ГПП-11А	I с.ш	56.3 (61.9)	56.3 ÷ 78.8 (86.7)	1÷1.4
	II с.ш	72.3 (79.5)	72.3 ÷ 82.5 (90.7)	1÷1.1
	Тр.с.ш.	28.0 (30.8)	68.6 ÷ 100.3 (110.3)	1÷3.6
Всего 156.6 (172.2)				
ГПП-11Б	I с.ш.	8.7 (9.6)	8.7 ÷ 20.1 (22.1)	1÷2.3
	II с.ш.	12.0 (13.2)	12.0 (13.2)	1
	Тр.с.ш.	11.4 (12.5)	20.1 ÷ 23.4 (25.7)	1÷2.1
Всего 32.1 (35.3)				
ГПП-11В	I с.ш.	34.1 (37.5)	34.1 ÷ 46.3 (50.9)	1÷1.4
	II с.ш.	2.1 (2.3)	3.4 (3.7)	1.6
	III с.ш.	4.4 (4.8)	6.5 ÷ 7.6 (8.4)	1÷1.7
	IV с.ш	14.5 (15.9)	14.5 ÷ 22.0 (24.2)	1÷1.5
Всего 51.1 (60.5)				
ГПП-11Г	I с.ш.	10.9 (12.0)	10.9 (12.0)	1
	II с.ш.	8.7 (9.6)	18 (19.8)	2.1
	III с.ш.	3.1 (3.4)	3.1 (3.4)	1
	IV с.ш.	20.3 (22.3)	20.3 (22.3)	1
Всего 43.0 (47.3)				
ГПП-11Д	I и IV с.ш.	17.5 (19.2)	17.5 (19.2)	1
	II и III с.ш.	15.6 (17.2)	15.6 (17.2)	1
Всего 33.1 (36.4)				
ГПП-11Е	I с.ш.	4.5 (4.9)	4.5 ÷ 17.8 (19.6)	1÷4
	II с.ш.	"-"	5.4	1
Всего 4.5 (4.9)				

Основной проблемой является разработка единого подхода к выбору режима нейтрали и мероприятий по ограничению перенапряжений в сети 10 кВ комбината "Североникель" с учетом их большого числа и разнообразия параметров с точки зрения значений токов ОЗЗ и вероятности возбуждения перенапряжений, а также динамики их изменения в рабочих, ремонтных и послеаварийных режимах.

3. Заземление нейтрали через низкоомный резистор

При достаточном резервировании потребителей нейтраль может быть заземлена через низкоомный резистор. В данном технологическом процессе, независимо от величины емкостной составляющей тока ОЗЗ, устройство защиты действует на немедленное отключение любого поврежденного элемента сети, в том числе при однофазном к.з.

При низкоомном заземлении нейтрали длительность существования однофазного замыкания на землю в сети резко снижается, так как ограничена временем действия выключателей, ликвидирующих аварию. Это позволяет снизить длительность переходного процесса и вероятность развития нарушений. При этом облегчаются требования к защитным аппаратам, при выборе которых можно уменьшить остающееся напряжение, улучшив тем самым защиту, например, изоляции высоковольтных электродвигателей.

Изменение режима заземления нейтрали на низкоомное заземление вызывает принципиальные изменения релейной защиты. В первую очередь, увеличение скорости срабатывания и, соответственно, замены АВР на АПВ, работа которого основана на повторном включении поврежденного участка через малый интервал времени после его отключения. При восстановлении электрической прочности изоляции в месте перекрытия сеть после АПВ продолжает работу в нормальном режиме. В случае недостаточной прочности изоляции и повторном зажигании дуги этот участок отключается повторно уже на длительное время поиска и устранения повреждения.

Низкоомное заземление нейтрали связано также с существенной реконструкцией сети, включая изменение систем резервирования, защиты и замены коммутационного оборудования. Введение такого режима нейтрали предполагает охват всей сети, что вызвано возможностью режимных и аварийных переключений в схеме. В противном случае требуется жесткое разделение сетей по типу заземления нейтрали с исключением возможности взаимных подключений участков сети.

Вследствие существенного увеличения объемов работ при переводе на низкоомное заземление, а также учитывая наличие участков с малыми токами ОЗЗ менее 5 А (ГПП-11В II с.ш. и III с.ш., ГПП-11Г III с.ш., ГПП-11Е II с.ш.), в которых не обеспечивается ток ОЗЗ, необходимый для селективной защиты, перевод сети 10 кВ комбината "Североникель" на низкоомное заземление нейтрали не очевиден. А если учесть необходимость полной и единовременной реконструкции всей сети 10 кВ, это решение не представляется возможным.

4. Компенсация емкостных токов замыкания на землю с помощью дугогасящих реакторов

В сетях с большими токами ОЗЗ, согласно ПТЭЭ (*Правила технической...*, 1996; 2003) необходимо применять режим с резонансно-компенсированной нейтралью, то есть компенсировать емкостную составляющую тока ОЗЗ с помощью дугогасящего реактора (ДГР), имеющего индуктивное сопротивление. В результате компенсации емкостного тока ОЗЗ дуговые перенапряжения снижаются. Причем определяющую роль в этом снижении играет резонансная настройка ДГР при $X_{ДГР} = X_{C0}/3$, где $X_{ДГР}$ – индуктивное сопротивление ДГР, X_{C0} – емкостное сопротивление фазы сети на землю. Напряжение на поврежденной фазе при гашении дуги в момент перехода тока ОЗЗ через ноль в первый момент остается близким к нулю, что способствует быстрому восстановлению электрической прочности изоляции в точке замыкания. В результате повреждение либо самоликвидируется, либо возникает режим с повторными однофазными пробоями изоляции через 0.1÷0.3 с. В таком режиме кратности перенапряжений относительно невелики.

Компенсация токов ОЗЗ с помощью дугогасящих реакторов (ДГР) с фиксированной настройкой имеет основной недостаток – увеличение тока в месте замыкания при изменении конфигурации сети или режимов ее работы и необходимость периодической настройки ДГР. Например, при ремонтном режиме возможно уменьшение емкости C_0 вследствие изменения нагрузки (Тр. с.ш. ГПП-11А; I с.ш., Тр.с.ш. ГПП-11Б и т.д.) При этом величина остаточного (раскомпенсированного) тока ОЗЗ увеличивается, и, соответственно, увеличивается вероятность повторных зажиганий дуги. Особую опасность в данной ситуации (при раскомпенсации) создают аварийные режимы со скачкообразными изменениями C_0 .

В настоящее время разработаны способы и устройства автоматической настройки индуктивного сопротивления ДГР. Наиболее распространены устройства, использующие реакторы плунжерного типа с асинхронным двигателем, имеющие инерционную настройку. Новое поколение ДГР использует магнитно-вентильный реактор, который регулирует рабочий ток за счет подмагничивания участков магнитопровода постоянным током. Быстродействие у последних моделей не превышает 0.01 сек.

Еще одним важным эффектом компенсации емкостных токов считается снижение тока первой гармоники в месте замыкания, теоретически, до нуля при строгой настройке и отсутствии активных потерь вследствие протекания токов нулевой последовательности и высших гармоник в точке замыкания.

Реально существует относительно малый остаточный ток ОЗЗ первой гармоники, имеющий активный характер, а в сетях со значительными гармоническими искажениями токов и напряжений в токе замыкания обязательно присутствуют высшие гармоники относительно большой величины (*Кучумов и др.*, 2003).

Высшие гармоники в токе ОЗЗ могут появиться даже в сети с относительно малым уровнем высших гармоник, так как неизбежно возникают резонансные условия в контуре замыкания на землю на присутствующих в электрической сети высших гармониках. Резонансные частоты в контуре тока ОЗЗ сильно зависят от параметров сети и от места возникновения замыкания, а степень развития резонансных явлений зависит от величины активного сопротивления в месте замыкания. Поэтому проявление высших гармоник и их величина оказываются весьма нестабильными. Этот фактор ставит под сомнение достаточность, с точки зрения надежности и селективности, применения защит, реагирующих только на

высшие гармоники (Кучумов и др., 2003). Кроме того, возможны резонансное смещение нейтрали и перенапряжения на отдельных фазах на первой гармонике.

Для оценки возможности применения систем автоматической настройки реакторов был выполнен контроль спектрального состава напряжения в участках сети, подключенных к ГПП, который показал повышение величины 3-ей гармоники до 4 % (I с.ш. ГПП-11А), а также наличие высших гармонических составляющих (более 40-й гармоники) с величиной до 1 %, а в отдельных случаях и выше. Кроме того, зарегистрированы высшие гармоники, находящиеся в частотных интервалах от 1.9 до 2.7 кГц, от 4.1 до 4.7 кГц, от 5 до 6.2 кГц, составляющие до 0.7 % (III с.ш. ГПП-11Г), 0.7 % (I с.ш. ГПП-11Г), 0.78 % (I с.ш. ГПП-11Г), соответственно. Это определяет дополнительные требования к параметрам систем управления подмагничиванием реакторов ДГР и их чувствительности к гармоническому составу напряжения в сети.

При определении границы значений токов ОЗЗ, определяющей необходимость их компенсации, целесообразно учесть зарубежный опыт эксплуатации аналогичных сетей и мнения специалистов (*Правила технической...*, 1996; Халилов и др., 2002; *IEEE Recommended Practice ...*, 1992), а также данные об аварийности и значительном износе элементов сети 10 кВ комбината "Североникель". В этой связи введем понятие "опасной зоны" (по величине токов ОЗЗ), подразумевая значение расчетного значения тока менее 20 А, но более 10 А. Отметим также, что реальная величина тока ОЗЗ может быть повышена вследствие влияния емкости подключенного оборудования и гальванически связанной сети сторонних потребителей. Поэтому в следующую группу (по степени необходимости применения устройств компенсации) включены секции, на которых токи ОЗЗ по величине находятся в "опасной зоне", а в ремонтных или послеаварийных режимах превышают границу 20 А (в том числе с учетом возможного влияния оборудования и связанной сторонней сети). К ней относятся следующие четыре секционированных участка (см. табл. 2): Тр. с.ш. ГПП-11Б, IV с.ш. ГПП-11В и ГПП-11Д I + IV с.ш. и II + III с.ш.

По результатам расчетов можно определить группу участков, где компенсация однозначно не требуется. К ней относятся четыре участка с токами ОЗЗ менее 10 А во всех возможных режимах: ГПП-11В (II и III с.ш.), ГПП-11Г (III с.ш.), ГПП-11Е (II с.ш.).

Оставшиеся участки сети 10 кВ можно разделить на две подгруппы.

- Два участка имеют токи ОЗЗ немногим более 10 А практически во всех возможных режимах работы: II с.ш. ГПП-11Б с током ОЗЗ 12-13 А и I с.ш. ГПП-11Г с током около 11-12 А. Для этих участков необходимость компенсации емкостных токов по ПТЭЭП не требуется, и превышение границы 10 А незначительно. Поэтому при успешном применении других мероприятий ограничения перенапряжений необходимость компенсации токов ОЗЗ с помощью реакторов отпадает.
- Три участка с токами ОЗЗ в рабочих режимах менее 10 А, а в ремонтных режимах более 10 А, но менее 20 А: I с.ш. ГПП-11Б, II с.ш. ГПП-11Г и I с.ш. ГПП-11Д. Для этих участков характерно отсутствие необходимости компенсации емкостных токов в рабочих режимах. Однако в ремонтных режимах значение токов ОЗЗ практически достигает и превышает границу 20 А. При принятии решения можно учесть относительно кратковременный характер послеаварийного или ремонтного режимов и соответствующее снижение вероятности совпадения случаев замыканий или повреждений кабелей и неблагоприятных режимов.

Для участков сети, подключенных к шинам ГПП-11В (II и III с.ш.), ГПП-11Г (III с.ш.), ГПП-11Е, система компенсации токов нецелесообразна. Однако это не указывает на низкую вероятность возникновения опасных дуговых перенапряжений.

5. Высокоомное заземление выделенной нейтрали

Снижение уровня дуговых перенапряжений возможно с помощью высокоомного заземления выделенной нейтрали, которая обеспечивает стекание заряда емкости сети и напряжения смещения нейтрали после гашения дуги за интервал времени до следующего повторного зажигания дуги (T), составляющее примерно полупериод промышленной частоты ($T = 0.01$ сек). Величина резистора выбирается по (Халилов и др., 2002) из условия практически полного стекания заряда за время $t = 3T = 0.01$ сек, т.е. $T = R_N \cdot 3C_0$ (где C_0 – фазная емкость участка сети).

Резистор такой величины приведет к снижению кратностей дуговых перенапряжений (до 2.3...2.4 о.е.), а также будет способствовать снижению вероятности повторных зажигания дуги, если электрическая прочность ослабленного места (после погасания дуги) не ниже фазного напряжения сети.

Кроме благоприятного влияния на процесс дуговых замыканий, высокоомный резистор за счет поглощения энергии эффективно подавляет феррорезонансные перенапряжения (Евдокунин, Титенков, 2003).

Такую защиту целесообразно установить на шинах ГПП-11Б (I с.ш.) и ГПП-11Г (II с.ш.). Учитывая положительный эффект, оказываемый высокоомными резисторами, возможно их применение

также в нейтральных с компенсирующими устройствами. Дополнительный эффект от включения резисторов заключается в предотвращении возбуждения резонансов в высокодобротном контуре: ДГР – емкость сети.

Перевод нейтрали секционированных участков сети в режим высокоомного заземления согласуется с режимом компенсации токов ОЗЗ. Поэтому использование обоих режимов нейтрали не требует кардинального изменения релейной защиты и коммутационного оборудования.

6. Заключение

На рассмотренном примере видно, что выбор режима заземления нейтрали сети электроснабжения крупного предприятия с разнообразной структурой секционированных участков является сложной проблемой, требующей детального изучения не только режимов работы, но и состояния электрооборудования. Необходим комплексный подход, заключающийся в компенсации токов ОЗЗ по участкам, а также использования высокоомного заземления выделенной нейтрали для уменьшения дугowych перенапряжений.

Литература

- IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE std 142-1991).
Published by the IEEE inc., NJ, 1992.
- Аношин О.А.** Повышение надежности эксплуатации ограничителей перенапряжений в сетях 6-10 кВ. Международная научно-техническая конференция "Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования". СПб., ПЭИПК, вып.1, 261 с., 2003.
- Евдокунин Г.А., Титенков С.С.** Системы заземления нейтралей сетей средних классов напряжений (6-10 кВ). Международная научно-техническая конференция "Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования", СПб., ПЭИПК, вып.1, с.13-16, 2003.
- Кучумов Л.А., Кузнецов А.А., Стефановский В.А.** О технической выполнимости требований минимизации токов при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6-35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью. Международная научно-техническая конференция "Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования", СПб., ПЭИПК, вып.1, с.293-303, 2003.
- Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Издание 15-е, М., 1996.
- Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Госэнергонадзор Минэнерго России. М., ЗАО "Энергосервис", 392 с., 2003.
- Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Поляков В.С.** Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений. СПб., Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 272 с., 2002.