

## ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА НАИБОЛЬШЕГО РАБОЧЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В СЕТЯХ 6 ... 35 КВ

*У статті показано, що вибір нелінійного обмежувача перенапруг (ОПН) в мережах 6 ... 35 кВ з найбільшою тривало допустимою робочою напругою, яка на 10 % перевищує найбільшу робочу напругу мережі, забезпечить ОПН від перегріву і подальшого пробоя при ненормованому часі існування однофазних дугових замикань.*

*В статтє показано, что выбор нелинейного ограничителя перенапряжений (ОПН) в сетях 6 ... 35 кВ с наибольшим длительно допустимым рабочим напряжением, на 10 % превышающим наибольшее рабочее напряжение сети, обезопасит ОПН от перегрева и последующего пробоя при ненормируемом времени существования однофазных дуговых замыканий.*

При выборе ограничителей перенапряжений (ОПН) необходимо решать следующие задачи:

1. ОПН должен ограничивать коммутационные и грозовые перенапряжения до значений, при которых будет обеспечена надежная работа защищаемого оборудования в течение всего срока службы ОПН.

2. ОПН должен надежно работать без разрушения и изменения параметров при непрерывном воздействии длительных рабочих и кратковременных повышений в рабочих режимах.

При выборе ОПН для защиты изоляции электрооборудования в сетях 6 ... 35 кВ необходимо учитывать возможность его повреждения при возникновении в сети длительного режима однофазного короткого замыкания (ОДЗ), вызывающего дуговые перенапряжения от переходных процессов при перемежающихся дуговых разрядах. Кратность таких перенапряжений может достигать  $(3 \dots 3,2) \cdot U_{\phi \max}$ , где  $U_{\phi \max}$  – наибольшее значение амплитуды фазного напряжения. В сетях с изолированной нейтралью режим ОДЗ может существовать от нескольких минут до 6 и более часов. Характер перенапряжений при ОДЗ подробно описан в [1]. При ОДЗ величина энергии, рассеиваемой варисторами в ОПН за один цикл "зажигания-гашения" дуги, составляет при незаземленной нейтрали, по разным оценкам, от 0,05 кДж до 4 кДж.

Частота повторений циклов может превышать 50 Гц. Кроме этого, в переходном процессе после погасания дуги на составляющую напряжения 50 Гц накладывается высокочастотная составляющая (около 1200 Гц), практически затухающая к моменту последующего повторного зажигания дуги [2]. Под действием импульсных токов, протекающих через варисторы при ОДЗ, возможен перегрев и пробой ОПН, поэтому ОПН должен быть отстроен от опасных энергетических воздействий.

Амплитуда дуговых перенапряжений носит статистический характер, при этом доля перенапряжений с кратностью  $(2,5 \dots 3,2) \cdot U_{\phi \max}$  составляет не более 10 % и частота их повторения невелика, следовательно, основную опасность, с точки зрения перегрева ОПН, составляют часто повторяющиеся импульсные перенапряжения кратностью менее 2,5. Таким образом, для потока мелких часто повторяю-

щихся импульсных дуговых перенапряжений  $K_{\pi} < 2,5$  ОПН должен быть закрыт. Известно, что заметный рост тока через ОПН (открытие) происходит при достижении на его зажимах напряжения, равного классификационному –  $U_{\text{кл}}$ , т.е. напряжения, когда через ОПН начинает протекать ток от 1 мА до 3 мА (в зависимости от диаметра варисторов).

Из многочисленных данных, приводимых в каталогах на варисторы и ОПН, можно убедиться, что между классификационным напряжением и наибольшим рабочим напряжением сети  $U_{\text{нрo}}$  имеет место соотношение:

$$U_{\text{кл}} = (1,224 \dots 1,37) \cdot U_{\text{нрo}}, \text{ кВ.} \quad (1)$$

Если отсечку потока дуговых импульсов напряжения принять на уровне  $K_{\pi} = 2,5$ , то условие отстройки может быть определено из уравнения второго закона Кирхгофа:

$$U_{\text{дуг}} = K_{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{нрc}}}{\sqrt{3}} = I_{\text{кл}} \cdot Z + U_{\text{нрo}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{нрc}}$  – наибольшее рабочее напряжение сети;  $Z$  – волновое сопротивление подводящих проводов.

В уравнении (2) можно сделать подстановку  $U_{\text{нрo}} = U_{\text{кл}}$ , поскольку ОПН открывается при  $U_{\text{опн}} = U_{\text{кл}}$ . Учитывая, что  $Z \approx 400$  Ом и приняв  $I_{\text{кл}} = 10^{-3}$  А, получим, что  $I_{\text{кл}} \cdot Z \approx 0,4$  В. Следовательно, этим падением напряжения можно пренебречь. Тогда получаем условие отстройки:

$$2,5 \cdot \frac{U_{\text{нрc}}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \leq (1,224 \dots 1,37) \cdot U_{\text{нрo}} \cdot \sqrt{2}. \quad (3)$$

После простых действий получим:

$$U_{\text{нрo}} \sim 1,1 \cdot U_{\text{нрc}}, \quad (4)$$

т.е. для обеспечения отстройки наибольшее рабочее напряжение ограничителя должно быть примерно на 10 % больше наибольшего рабочего напряжения сети.

Эффект повышения надежности ОПН в случае  $U_{\text{нрo}} > U_{\text{нрc}}$  виден из графика, приведенного для двух ОПН напряжением 10 кВ (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что повышение  $U_{\text{нрo}}$  (поднятие вольт-амперной характеристики) в пределах 10% приводит к снижению более чем на 3 порядка (с 17,8 А до 6,3 кА) амплитуды импульсных токов, протекающих через ОПН при  $K_{\pi} < 2,5$ , и следовательно,

к уменьшению опасного энергетического воздействия на варисторы. Таким образом, в сетях 6 ... 35 кВ с ненормируемым временем существования ОДЗ увеличение  $U_{\text{нрo}}$  до  $1,1 \cdot U_{\text{нрс}}$  обезопасит ОПН от перегрева и пробоя.

Нужно отметить, что если в сети длительность существования ОДЗ регламентирована на уровне 2-6 час., и этот регламент реально выполняется, то может быть выбран ОПН с  $U_{\text{нрo}}$ , равным наибольшему рабочему напряжению сети.

В табл. 1, 2 приведены рекомендуемые значения  $U_{\text{нрo}}$  ограничителей перенапряжений для сетей с ненормируемой и ограниченной до 2-6 часов длительностью существования ОДЗ. В табл. 1 и 2 первое число –  $U_{\text{нрo}}$  ОПН для сетей с ограниченным временем существования ОДЗ, второе число –  $U_{\text{нрo}}$  ОПН в сетях с ненормируемым временем существования ОДЗ.

Остается выяснить, не приведет ли выбор ограничителей перенапряжений с  $U_{\text{нрo}} \approx 1,1 \cdot U_{\text{нрс}}$  к опасному повышению остающихся напряжений на ОПН,

что снизит защиту изоляции до недопустимого уровня. Приведем расчет остающихся напряжений для ОПН с  $U_{\text{нрo}} = U_{\text{нрс}}$ .

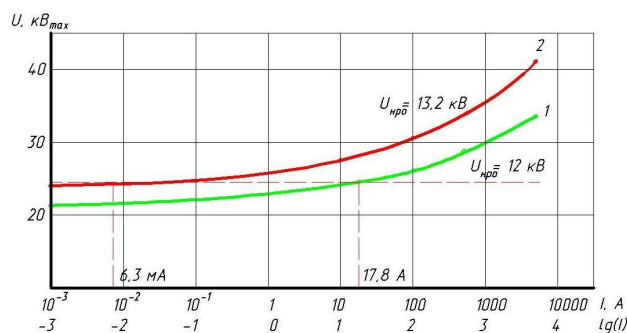


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики ОПН с  $U_{\text{нрo}} = 12$  кВ, номинальным разрядным током  $I_{\text{н}} = 5$  кА, током пропускной способности 500 А (кривая 1) и ОПН с  $U_{\text{нрo}} = 13,2$  кВ, номинальным разрядным током  $I_{\text{н}} = 5$  кА, током пропускной способности 500 А (кривая 2)

Таблица 1

Рекомендуемые значения  $U_{\text{нрo}}$  для защиты силовых трансформаторов и реакторов (для уровня изоляции "а" и облегченной изоляции согласно ГОСТ 1516.3)

Нейтраль	Рекомендуемые значения $U_{\text{нрo}}$ , кВ, для нормальной изоляции с уровнем изоляции "а"				
	6 кВ	10 кВ	15 кВ	20 кВ	35 кВ
Изолированная или заземленная через ДГР	6,9 ... 8,0	11,5 ... 13,0	17,5 ... 20,0	23,0 ... 26,5	40,5 ... 43,0
Заземленная через высокоомный резистор (частично заземленная нейтраль)*	6,3 ... 7,3	10,5 ... 11,8	15,9 ... 18,2	20,9 ... 24,1	38,0 ... 40,5
Рекомендуемые значения $U_{\text{нрo}}$ , кВ, для облегченной изоляции					
Изолированная или заземленная через ДГР	6,9 ... 7,8	11,5 ... 13,0	17,5 ... 18,8	23,0 ... 26,0	–
Заземленная через высокоомный резистор (частично заземленная нейтраль)	6,3 ... 7,1	10,5 ... 11,8	15,9 ... 17,1	20,9 ... 23,6	–

\*для сетей с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор,  $U_{\text{нрo}}$  снижено на 10 %.

Таблица 2

Рекомендуемые значения  $U_{\text{нрo}}$  для защиты изоляции аппаратов (для уровня изоляции "а" и облегченной изоляции по ГОСТ 1516.3)

Нейтраль	Рекомендуемые значения $U_{\text{нрo}}$ , кВ				
	для нормальной изоляции с уровнем изоляции "а" и облегченной изоляции				для нормальной изоляции с уровнем изоляции "а"
	6 кВ	10 кВ	15 кВ	20 кВ	35 кВ
Изолированная или заземленная через ДГР	6,9 ... 8,0	11,5 ... 13,0	17,5 ... 19,0	23,0 ... 25,2	40,5 ... 42,0
Заземленная через высокоомный резистор (частично заземленная нейтраль)*	6,3 ... 7,3	10,5 ... 11,8	15,9 ... 17,3	20,9 ... 22,9	38,0 ... 40,5

\*для сетей с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор,  $U_{\text{нрo}}$  снижено на 10 %.

Выбрав  $U_{\text{нрo}}$  из табл. 1, 2, можно найти расчетные остающиеся напряжения для коммутационных и грозовых перенапряжений  $U_{\text{ост.к}}$  и  $U_{\text{ост.г}}$  при нормируемых импульсных токах. Для грозовых перенапряжений нормируемым является номинальный разрядный ток  $I_{\text{н}} = 5000$  А с формой волны 8 / 20 мкс. При коммутационных перенапряжениях для ОПН 6 ... 35 кВ остающееся напряжение  $U_{\text{ост.к}}$  принято определять при нормированном токе  $I_{\text{норм.к}} = 500$  А с формой волны 30 / 60 мкс.

Расчетные значения остающихся перенапряжений на ОПН можно определять через коэффициенты "типовых кратностей" [3]. Коэффициенты типовых кратностей определяются отношением остающихся напряжений на ОПН к наибольшему длительно допустимому рабочему напряжению  $U_{\text{нрo}}$  (амплитудное значение):

$$K_{30/60} = \frac{U_{\text{ост.30/60}}}{U_{\text{нрo}}}, \quad (5)$$

$$K_{8/20} = \frac{U_{\text{ост.8/20}}}{U_{\text{нрo}}}. \quad (6)$$

Коэффициенты типовых кратностей для ОПН и варисторов различных номиналов и различных производителей с некоторым приближением могут быть приняты равными:

$$K_{30/60} = 1,75; \quad K_{8/20} = 2,1.$$

Поэтому, расчетные значения остающихся перенапряжений на ОПН определим как:

$$U_{\text{ост.к}} = U_{\text{ост.30/60}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{нрo}} \cdot K_{30/60}, \quad (7)$$

$$U_{\text{ост.г}} = U_{\text{ост.8/20}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{нрo}} \cdot K_{8/20}. \quad (8)$$

В табл. 3 приведены расчетные значения  $U_{\text{ост.к}}$  и  $U_{\text{ост.г}}$  для ОПН с наибольшим рабочим напряжением  $U_{\text{про}} = 1,1 \cdot U_{\text{нрс}}$  (числитель) и нормируемые уровни защи-

ты изоляции от перенапряжений  $U_{\text{защ.к}}$ ,  $U_{\text{защ.г}}$  (знаменатель) для силовых трансформаторов и реакторов.

Таблица 3  
Расчетные значения  $U_{\text{ост.к}}$  и  $U_{\text{ост.г}}$  для силовых трансформаторов и реакторов наименьшим уровнем изоляции (для уровня изоляции "а")

Виды импульсных воздействий	Расчетные значения остающихся напряжений ОПН и нормируемые уровни защиты изоляции от перенапряжений, кВ <sub>max</sub>				
	6	10	15	20	35
Наибольшее рабочее напряжение $U_{\text{про}}$ , кВ <sub>д</sub>					
При воздействии грозового импульса, $I_{\text{н}}=5$ кА, 8/20 мкс	$\frac{23,7}{27}$	$\frac{38,6}{45}$	$\frac{59,4}{61}$	$\frac{78,6}{80}$	$\frac{127,7}{130}$
При воздействии коммутационного импульса, $I_{\text{норм.к}}=500$ А, 30/60 мкс	$\frac{19,7}{31,2}$	$\frac{32,1}{43,7}$	$\frac{49,5}{59,3}$	$\frac{65,6}{78,1}$	$\frac{106,4}{125}$

Уровень защиты изоляции от коммутационных перенапряжений  $U_{\text{защ.к}}$  определялся по известному выражению [1]:

$$U_{\text{защ.к}} = K_{\text{износа}} \cdot K_{\text{имп.}} \cdot U_{\text{исп.1 мин.}} \cdot \sqrt{2},$$

где  $K_{\text{износа}} = 0,85$ ;  $K_{\text{имп.}} = 1,3$ ;  $U_{\text{исп.1 мин.}} \cdot \sqrt{2}$  – по ГОСТ 1516.3.

Уровень защиты изоляции электрооборудования 6 ... 35 кВ от грозовых перенапряжений  $U_{\text{защ.г}}$  координируется с остающимися напряжениями вентильных разрядников группы IV и группы III при токе координации 5 кА. По этой причине значения  $U_{\text{защ.г}}$ , указанные в табл. 3, были приняты в соответствии с нормативными документами [4].

Сравнивая расчетные значения  $U_{\text{ост.к}}$  и  $U_{\text{ост.г}}$  с нормируемыми уровнями защиты изоляции, можно убедиться, что повышение  $U_{\text{про}}$  до  $1,1 \cdot U_{\text{нрс}}$  не приводит к нарушению принятого уровня координации как по коммутационным, так и по грозовым перенапряжениям.

Таким образом, при выборе ОПН для защиты электрооборудования от перенапряжений в сетях с изолированной нейтралью 6 ... 35 кВ и ненормируемым временем существования ОДЗ выбор ОПН с наибольшим длительно допустимым рабочим напряжением на 10 % выше наибольшего рабочего напряжения сети ( $U_{\text{про}} = 1,1 \cdot U_{\text{нрс}}$ ) обезопасит ОПН от перегрева и последующего пробоя варисторов.

Вопросы выбора других параметров ОПН для сетей 6 ... 35 кВ подробно изложены в нормативном документе СОУ-Н МЕВ 40.1-21677681-67:2012 [5].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ограничители перенапряжений в электроустановках 6-750 кВ. Методическое и справочное пособие. Под ред. М.А. Арагова. – М.: "Знак", 2001. – 240 с.
2. Екимук С.С., Кадомская К.П. Обеспечение надежности эксплуатации кабельных распределительных сетей 6-10 кВ, оснащенных современным электрооборудованием // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Научный журнал. Специальный выпуск. №1. – С. 5-9.

3. Дмитриев М.В. Применение ОПН в электрических сетях 6-750 кВ. – СПб.: "Нива", 2007.
4. ГКД 34.35.512-2002 Средства защиты от перенапряжений в электроустановках 6-750 кВ. Инструкция по монтажу и эксплуатации. Отраслевой руководящий документ: ГРИФРЭ, Киев. – 2004.
5. СОУ-Н МЕВ 40.1-21677681-67:2012 Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35 кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках.

**Bibliography (transliterated):** 1. Ogranichiteli perenapryazhenij v `elektroustanovkah 6-750 kV. Metodicheskoe i spravocnoe posobie. Pod red. M.A. Aragova. - M.: "Znak", 2001. - 240 s. 2. Ekimukov S.S., Kadomskaya K.P. Obespechenie nadezhnosti `ekspluatacii kabel'nyh raspredelitel'nyh setej 6-10 kV, osnaschennyh sovremennym `elektrooborudovaniem // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. Nauchnyj zhurnal. Special'nyj vypusk. №1. - S. 5-9. 3. Dmitriev M.V. Primenenie OPN v `elektricheskikh setyah 6-750 kV. - SPb.: "Niva", 2007. 4. GKD 34.35.512-2002 Sredstva zaschity ot perenapryazhenij v `elektroustanovkah 6-750 kV. Instrukciya po montazhu i `ekspluatacii. Otrasl'evoj rukovodyaschij dokument: GRIFR'E, Kiev. - 2004. 5. SOU-N MEV 40.1-21677681-67:2012 Obmezhuвачi perenaprug nelinejnyj naprugoyu 6-35 kV. Nastanova schodo viboru ta zastosuvannya u rozpodil'chih ustanovkah.

Поступила 01.04.2013

Шумилов Ю.Н., д.т.н., проф.,

Государственное предприятие "Научно-исследовательский институт высоких напряжений"  
84100, Славянск, Донецкая обл.,  
ул. Генерала Батюка, 22  
тел. (0626) 650653, факс (0626) 65-09-18  
e-mail: science@niivn.dn.ua

Shumilov Yu. N.

#### Aspects of surge arresters' maximum operating voltage choice for electrical equipment insulation protection in 6 ... 35 kV mains.

The paper shows that, in 6 ... 35 kV mains, application of a non-linear surge arrester (SA) with the maximum continuous admissible operating voltage which is 10% higher than the mains' maximum operating voltage results in the SA protection from overheating and subsequent breakdown at nonnormable lifetime of single-phase arc faults.

Key words – non-linear surge arrester, insulation, arc fault.