



необходима модернизация аппаратуры АСГ или создание новой специализированной аппаратуры на общих принципах гамма-съемки.

5. Совершенствование летательных аппаратов в направлении повышения их надежности и снижения стоимости полетного времени.

Совместно с другими системными авиационными методами диагностики, например: Корона, Лайнтест, оптический контроль и т.д., которые позволяют опе-

ративно контролировать текущее техническое состояние элементов ВЛ в труднопроходимых условиях, необходимо развивать и методы гамма-съемки, которые позволят дать ответы на состояние долговечности металлических и железобетонных элементов опорных конструкций и оценить уровень грозоупорности ВЛ.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6...35 кВ

Абрамович Б.Н., докт. техн. наук, профессор С-П ГГИ;  
Григорьев Г.Я., генеральный директор ООО "Энергонефть" (г. Нефтеюганск),  
Кабанов С.О., канд. техн. наук, генеральный директор  
завода энергозащитных устройств (С. Петербург),  
Сергеев А.М., канд. техн. наук, директор ООО "Оптима" (С. Петербург)



Абрамович Б.Н.



Григорьев Г.Я.



Сергеев А.М.

Характерной особенностью современного состояния электрооборудования для передачи и распределения электрической энергии напряжением 6...35 кВ на объектах нефтедобычи является обеспечение электромагнитной совместимости уровня изоляции, параметров энергозащитных устройств и устройств релейной защиты и сетевой автоматики в заданном объеме пространства, частотном и временном диапазоне [1]. Актуальность решения данной задачи особенно возрастает в связи со старением действующего оборудования, широким внедрением вакуумной и элегазовой коммутационной аппаратуры, покрытых изоляцией (защищенных) проводов, микропроцессорных устройств, возрастанием доли нелинейных потребителей электроэнергии.

Устройства электрических сетей или подвергаются воздействию или генерируют различные виды пе-

ренапряжений. Величина выдерживаемых  $U_{\text{выд}}$  коммутационных перенапряжений не должна превышать допустимых значений, связанных с уровнем испытательных напряжений [2, 4]

$$U_{\text{выд.1}} = \sqrt{2} k_{\text{и}} k_{\text{к}} U_{\text{1мин}}$$

где  $U_{\text{1мин}}$  - одномоментное испытательное напряжение, кВ;

$k_{\text{и}}$  - коэффициент импульса, учитывающий упрочнение изоляции при более коротком импульсе по сравнению с испытательным;

$k_{\text{к}}$  - коэффициент куммулятивности, учитывающий многократное воздействие перенапряжений и возможное старение изоляции.

Выдерживаемый электрооборудованием уровень грозовых перенапряжений

$$U_{\text{выд.2}} = 1,1(U_{\text{итг}} - U_{\text{н}}),$$



где  $U_{\text{итг}}$  - испытательное напряжение полного грозового импульса, кВ;

$U_{\text{н}}$  - номинальное напряжение.

Выдерживаемые внутренней изоляцией трансформаторов и аппаратов уровни грозовых и коммутационных перенапряжений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вид оборудования	Вид изоляции	Класс напряжения, кВ	$U_{\text{ном}}$ , кВ	$U_{\text{ввл1}}$ , кВ	$U_{\text{итг}}$ , кВ	$U_{\text{ввл2}}$ , кВ
Трансформаторы	Нормальная	6	25	42,7	60	59,4
		10	35	59,8	80	77,0
		35	85	145,5	200	181,5
Аппараты	Нормальная	6	32	49,6	57	56,1
		10	42	65,1	75	71,5
		35	75	116,2	185	165,0
	Облегченная	6	16	27,4	-	-
		6*	20*	34,2	40*	37,4
		10	24	41,0	-	-
		10*	28*	47,9	60*	55,0

\* значения по ГОСТ 1516.3 относятся к изоляции трансформаторов и аппаратов.

Выдерживаемый уровень перенапряжений изоляцией электрических машин при выпуске с завода приведен в табл. 2. В процессе эксплуатации электрическая прочность изоляции снижается в соответствии с ее видом. В диапазоне длин фронтов от 5 до 0,2 мкс значение выдерживаемых линейных напряжений снижается из-за неравномерного распределе-

ния напряжения вдоль обмотки. Фактические перенапряжения на электрооборудовании сетей 6...35 кВ могут значительно превышать допустимые, если не предпринимать мер по их ограничению. Поэтому рассмотрим причины возникновения и виды опасных перенапряжений в сетях 6...35 кВ.

Таблица 2

Мощность электрической машины, кВт	Номинальное напряжение, кВ	Испытательное напряжение, кВ	Допустимое напряжение, кВ
до 1000	6,0	13,0	18,4
	6,3	13,6	19,2
	10	21,0	29,7
	10,5	22,0	31,0
свыше 1000	6,0	15,0	21,2
	6,3*	15,8	22,2
	10	23,0	32,5
	10,5	24,0	33,8

Рис. 1.

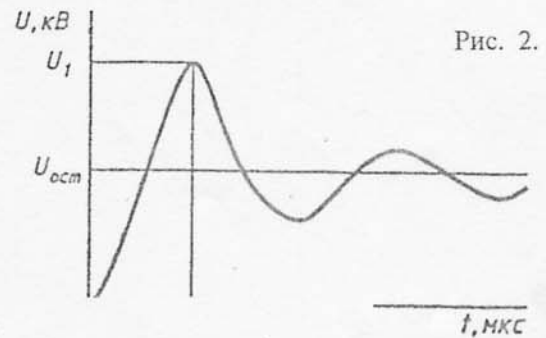
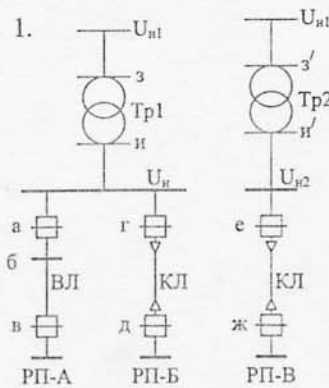


Рис. 2.

Рис. 3.

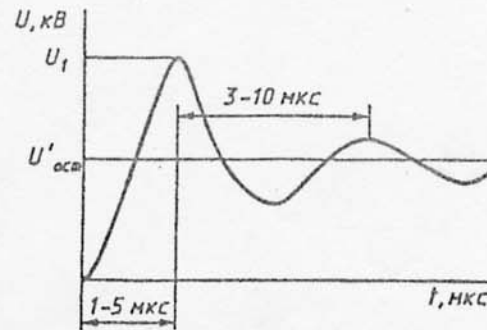
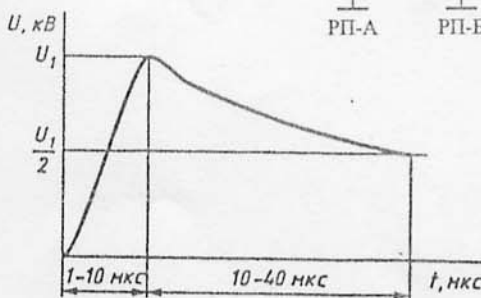


Рис. 4.



**Грозовые перенапряжения**

Опасные грозовые воздействия на воздушных (ВЛ) и кабельных (КЛ) линиях, подстанционном и двигателем электрооборудовании возникают при ударах молнии непосредственно в провода и опоры линий, подстанции, распределительные устройства (РУ), а также при проходе по линиям электропередачи (ЛЭП) грозовых волн. Для РУ 6...35 кВ опасны перенапряжения, индуктированные на токоведущих частях при ударах молнии в землю или другие объекты вблизи ЛЭП и подстанций.

При ударе молнии в опору ВЛ без троса импульсное напряжение на изоляции состоит из суммы составляющих:

$$U_{инп}(t) = U_r(t) + U_{ин.м}(t) + U_{ин.э}(t)$$

где  $U_r(t)$  - составляющая, вызванная потерей напряжения на сопротивлении заземления опоры;

$U_{ин.м}(t)$  - магнитная составляющая индуктированного напряжения, возникающая при протекании тока по опоре и каналу молнии;

$U_{ин.э}$  - электрическая составляющая напряжения.

Импульсное напряжение при ударе молнии в опору определяется параметрами молнии, геометрическими параметрами опоры и величиной сопротивления заземления. Параметры импульса тока при грозовом разряде являются случайной величиной и зависят от скорости главного разряда и эквивалентного сопротивления канала молнии.

Формы грозовых импульсов напряжения в точках присоединения электрической сети общего назначения (рис.1) приведены на рисунках 2, 3 и 4. На рис. 2 приведена форма грозовых импульсов, характерная для точек присоединения а, б, в, г, д (см. рис. 1). На рис. 3 приведена форма грозовых импульсов, характерная для точек присоединения, проходящих через выводы силового трансформатора (точки присоединения з, з', и). На рис. 4 приведена форма грозовых импульсов, характерная для точек присоединения б, е, ж (см. рис. 1). Величины грозовых импульсных напряжений даны в табл. 3 [3].

Таблица 3

Тип оборудования	Точки на рис. 1	Номинальное напряжение сети, кВ		
		6	10	35
ВЛ	а, в	100	125	325
	б	160 2000	190 2000	575 2000
КЛ	г	100	125	325
	е	34	48	140
	д, ж	-	-	-
Трансформатор	з, з', и	60	80	200
	и	34	48	140

В числителе указано импульсное напряжение для ВЛ на металлических и железобетонных опорах, в знаменателе - на деревянных опорах.

Грозовые импульсные напряжения в электрических сетях потребителя могут превышать указанные в табл. 3 значения за счет грозовых поражений самой сети потребителя, а также за счет отражения и преломления в ней грозовых импульсов.

В сетях 6...35 кВ в среднем за год возможны около 30 временных перенапряжений с параметрами, указанными в табл. 4.

Таблица 4

Длительность временного перенапряжения, с	до 1	до 20	до 60
Коэффициент временного перенапряжения, $K_{врп}, о.е.$	1,47	1,31	1,15

Сети 6...35 кВ традиционно работают с изолированной нейтралью либо с компенсацией емкостного тока замыкания на землю. Дугогасящие аппараты для компенсации емкостного тока замыкания на землю устанавливаются, если его величина превышает определенные нормированные значения: 30 А для сети 6 кВ, 20 А для сети 10 кВ и 10 А для сети 35 кВ. Сети с изолированной или компенсированной нейтралью предприятий нефтедобычи могут длительно работать с однофазным замыканием на землю (ОЗЗ).

В результате старения оборудования происходит существенное снижение уровня изоляции. В этих условиях наличие ОЗЗ в сети увеличивает риск возникновения многофазных повреждений. Как показывают статистические исследования ВНИИЭ, в сети 6(10) кВ Московских кабельных сетей значительная часть ОЗЗ через некоторое время самоликвидируется (примерно через 1 с) или переходит в междуфазные или двойные замыкания на землю (в течение первой минуты). Поэтому целесообразно применять в указанных сетях защиту от ОЗЗ, действующую не мгновенно, а с определенной выдержкой времени, которая позволит, с одной стороны, обеспечить условия для самоликвидации повреждений и, с другой стороны, уменьшить вероятность перехода ОЗЗ в многофазные повреждения [5].



К тому же в настоящее время все большее распространение получает заземление нейтрали через высокоомный резистор, сопротивление которого имеет величину порядка емкостного сопротивления сети. Широко применяемое резервирование питания потребителей, внедрение устройств автоматики, совершенствование технологических процессов потребителей снизили остроту требования сохранения на длительное время в работе сети при наличии «земли». В связи с этим существенно расширяется область применения в сетях 6...35 кВ защиты от однофазных замыканий с действием на отключение и применения резисторного заземления нейтрали.

В сетях с изолированной или компенсированной нейтралью возможны перенапряжения как тех же видов, что и в сетях с эффективно заземленной нейтралью (при включениях, при отключении емкостных токов, при отключении малых индуктивных токов и т.п.), так и специфических видов (при дуговых замыканиях на землю, при возникновении целого ряда резонансных и феррорезонансных схем и др.) [6].

#### Виды и максимальные значения внутренних перенапряжений в сетях 6...35 кВ

В сетях 6...35 кВ внутренние перенапряжения возникают при:

- включении и отключении воздушных и кабельных линий;
- отключении ненагруженных трансформаторов;
- отключении двойного к.з. на землю;
- отключении двухфазных к.з.;
- одновременном включении фаз при пуске электродвигателей;
- включении электродвигателей при АВР или АПВ;
- отключении электродвигателей;
- коммутации нагрузки вакуумными выключателями;
- дуговых замыканиях на землю;
- резонансных повышениях напряжения.

Результаты оценки максимальных уровней внутренних перенапряжений в сетях 6...35 кВ даны в табл. 5. Как следует из табл. 5, максимальные уровни внутренних перенапряжений имеют место при коммутации нагрузки вакуумными выключателями (до  $7,0 U_{\phi}$ ), а также при отключении электродвигателей и ненагруженных трансформаторов (до  $6,0 U_{\phi}$ ).

Таблица 5

Режимы	Величина перенапряжения
1. Включение воздушных и кабельных линий	$3,5 U_{\phi}$
2. Отключение воздушных и кабельных линий	$4,0 \div 4,3 U_{\phi}$
3. Отключение ненагруженных трансформаторов	$5,0 \div 6,0 U_{\phi}$
4. Отключение двойного к.з. на землю	$3,3 U_{\phi}$
5. Отключение двухфазных к.з.	$2,0 \div 3,0 U_{\phi}$
6. Одновременное включение фаз при пуске электродвигателей	$3,0 \div 3,4 U_{\phi}$
7. Включение электродвигателей при АВР или АПВ	$4,2 U_{\phi}$
8. Отключение электродвигателей	$4,0 \div 6,0 U_{\phi}$
9. Коммутация нагрузки вакуумными выключателями	$2,6 \div 7,0 U_{\phi}$
10. Дуговые замыкания на землю	$2,3 \div 3,20 U_{\phi}$
11. Резонансные повышения напряжения	$2,0 U_{\phi}$

Усредненные значения коммутационных импульсных напряжений при их длительности 1000...5000 мкс приведены в табл. 6 [3].

Номинальное напряжение сети, кВ	6	10	35
Коммутационное импульсное напряжение, кВ	27	43	148

Сопоставление фактического и выдерживаемого уровня перенапряжений, воздействующих на изоляцию электрооборудования электрических сетей 6...35 кВ, позволяет сделать вывод о необходимости ограничения величины грозовых и коммутационных перенапряжений с применением защитных аппаратов, устройств релейной защиты и сетевой автоматики.

Необходимый уровень электромагнитной совместимости электрооборудования сетей 6...35 кВ может быть достигнут путем:

- применения нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН), обеспечивающих защиту от грозовых и коммутационных перенапряжений;
- увеличения электрической прочности изоляции воздушных линий путем замены неизолированных проводов на защищенные, применения полимерных изоляторов из кремнийорганической резины или увеличения числа изоляторов в гирлянде;
- уменьшения сопротивления заземления;
- повышения надежности и селективности действия защиты от ОЗЗ;
- повышения успешности действия АПВ.

ОПН целесообразно подключать на вводах, сборных шинах, отходящих присоединениях и непосредственно у электроприемников; схема соединения - звезда с выведенным на землю нулем. В случае если не ограничивается длительность ОЗЗ, для обеспечения термической стойкости ОПН величину наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения следует принимать равной 7,2 кВ для класса напряжения 6 кВ, 12 кВ для класса напряжения 10 кВ и 40,5 кВ для класса напряжения 35 кВ. Пропускная способность ОПН должна быть не менее 20 импульсов на волне 1,2/2,5 мс с амплитудой тока 300...500 А, должна быть исключена возможность возникновения длительных резонансных и феррорезонансных перенапряжений в точке установки ОПН [7].

Для эффективной работы молниезащиты необходимо заземление, обладающее низким сопротивлением ра-



стеканию высокочастотного грозового импульса. В качестве таких устройств могут быть рекомендованы глубинные заземлители и заземлители типа Chem-rod с короткими стержнями большого диаметра с применением специального наполнителя, обеспечивающего более равномерное распределение металлических солей через контактную зону «электрод-полушарие интерфейса».

Опыт эксплуатации ВЛ 6(10) кВ на объектах нефте- и газодобычи показал, что коэффициент успешности АПВ ( $K_u$ ) в грозовой период составляет 30...40%. Низкое значение коэффициента  $K_u$  обусловлено малым временем бестоковой паузы (0,5...1,0 с). Поэтому с учетом времени деионизации пути междуфазного перекрытия целесообразно увеличить время бестоковой паузы до 5...7 с, а также увеличить кратность АПВ до 2 с паузой второго цикла 10...20 с, что легко реализуется при внедрении цифровых устройств защиты и сетевой автоматики в сетях 6...35 кВ.

#### Литература.

1. ГОСТ Р 50397-92. Совместимость технических средств электромагнитная.
2. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений/ Под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. 2-е издание. -СПб: ПЭИпк Минтопэнерго РФ, 1999.
3. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
4. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования/ Под общей редакцией Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. 6-е изд. -М.: НИЦ ЭНАС, 1998.
5. Нудельман Г.С., Шевелев В.С. Избирательная защита от замыканий на землю для распределительных сетей 6...35 кВ. // Энергетик, №10, 2000.
6. Лысков Ю.Н., Демина О.Ю., Кузьмичева К.И. и др. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 6...35 кВ. -М.: 2001.
7. Евдокунин Г.А., Тилер Г. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики). -СПб.: Изд. Сизова М.П., 2000.