

**В.М.КУПРИЕНКО**, д-р техн. наук, зав. отд., филиал ЦНИИ, Санкт-Петербург, Россия;

**Г.А.АКОМЕЛКОВ**, канд. техн. наук, зав. лаб., филиал ЦНИИ, Санкт-Петербург, Россия;

**Н.М.ОРЕХОВ**, вед. инж., филиал ЦНИИ, Санкт-Петербург, Россия;

**В.Н.РОМАНЦОВ**, вед. инж., филиал ЦНИИ, Санкт-Петербург, Россия

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ОТ АТМОСФЕРНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ (УЗАП) ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ 6, 10 КВ ПРИ ИМИТАЦИИ РАЗРЯДА МОЛНИИ В ПРОВОД**

У роботі виконані дослідження пристроїв захисту від атмосферних перенапруг типу УЗАП при дії грозових і комутаційних перенапруг. Обґрунтована схема проведення випробувань. Відпрацьована методика реєстрації параметрів розрядної напруги на випробовуваному об'єкті. Приведені результати дослідження пристроїв захисту від атмосферних перенапруг типу УЗАП встановлених на штатній металевій опорі з підвищенням на ізолючій траверсі дротом марки СИП-3. В результаті досліджень отримані дані про фактичну захисну здатність УЗАП-О і УЗАП-К при дії грозових і комутаційних перенапруг.

In the paper, researches are carried out on the atmospheric surges protection devices such as UZAP when exposed to lightning and switching surges. The test scheme is justified. A technique is developed for recording parameters of the discharge voltages on a test object. The results of the study the atmospheric surges protection devices of the UZAP-type mounted on a standard metal pole with the wire CIP-3 hanging on an insulating traverse. The studies provided data on the actual protective ability of UZAP-O and UZAP-K and under the action of lightning and switching surges.

В работе выполнены исследования устройств защиты от атмосферных перенапряжений типа УЗАП при воздействии грозовых и коммутационных перенапряжений. Обоснована схема проведения испытаний. Отработана методика регистрации параметров разрядных напряжений на испытуемом объекте. Приведены результаты исследования устройств защиты от атмосферных перенапряжений типа УЗАП установленных на штатной металлической опоре с подвешенным на изолирующей траверсе проводом марки СИП-3. В результате исследований получены данные о фактической защитной способности УЗАП-О и УЗАП-К при воздействии грозовых и коммутационных перенапряжений.

### **Введение**

Важной проблемой, связанной с повышением надежности систем электроэнергетики при их эксплуатации, является обеспечение защиты электрических сетей классов напряжения 6, 10 кВ и электрооборудования станций и подстанций от грозовых и коммутационных перенапряжений.

Одной из основных причин аварий и нарушений питания на ВЛ-6,10 кВ являются грозовые воздействия. Практически все перенапряжения от прямых ударов молний и значительная часть индуктированных перенапряжений приводят к перекрытиям изоляторов, с большой вероятностью переходящим в

силовую дугу под воздействием напряжения промышленной частоты, что приводит к повреждению изоляторов, опор и проводов.

В ООО «Спецавтоматикасервис» разработаны и внедрены на линиях электропередачи напряжением 6 и 10 кВ устройства защиты от перенапряжений нелинейные типа УЗАП с искровым разрядным промежутком.

На практике используется две модификации УЗАП отличающиеся между собой по конструкции и способу установки на изолирующей траверсе металлической опоры. Устройства защиты от атмосферных перенапряжений типа УЗАП-0 предназначены для установки на опорном изоляторе, а УЗАП-К на подвесном изоляторе ВЛ–6,10 кВ. Конструктивно УЗАП состоит из ограничителя перенапряжений нелинейного (ОПН) и внешнего искрового промежутка (ИП) один из электродов которого крепится на верхнем фланце ОПН, а другой на проводе ВЛ с помощью специального зажима (на ВЛ с изолированными проводами прокалывающий зажим). В качестве ограничителя перенапряжений используется ОПН в полимерном корпусе с характеристиками отвечающими требованиям технических условий и ГОСТ Р 52725.

В данной работе приводятся результаты испытаний по определению фактической защитной способности устройств защиты типа УЗАП электрооборудования сети переменного напряжения 6 и 10 кВ частотой 50 Гц при воздействии грозových и коммутационных перенапряжений.

### **Методика проведения испытаний фактической защитной способности УЗАП**

Определение фактической защитной способности УЗАП при воздействии грозových и коммутационных напряжений проводились на высоковольтном стенде филиала ОАО «26 ЦНИИ». В качестве источника импульсных перенапряжений использовался высоковольтный генератор ГИН 6000/960. Генератор формировал в проводе, моделирующем линию электропередачи, импульсы грозových и коммутационных перенапряжений как положительной, так и отрицательной полярности.

На открытой испытательной площадке был выполнен монтаж стальной опоры 09Г2С с изолирующей траверсой на 6(10) кВ и двумя пролетами изолированного провода типа СИП-3 длиной по 60м, моделирующего линию электропередачи. Противоположные от опоры концы провода крепились на диэлектрических растяжках. На изоляторы траверсы последовательно устанавливались защитные устройства типа УЗАП-0 и УЗАП-К. Высота подвеса УЗАП от земли до точки крепления провода не менее 7 м. Высоковольтный электрод подвешивался на высоте 6-9 м над изолированным проводом на расстоянии 5 м от опоры.

Схема проведения испытаний УЗАП грозovým и коммутационным импульсами напряжения приведена на рис. 1. Монтаж УЗАП-К на опоре и общий вид испытательной площадки показан на рис. 2, 3.

Измерение параметров напряжения грозového и коммутационного импуль-

сов проводилось с помощью встроенного емкостного делителя напряжения ГИН и осциллографа типа Tektronix 2022В. В процессе проведения испытаний осуществлялись измерения и регистрация импульсных напряжений на выходе генератора и воздействующих на испытываемые защитные устройства.

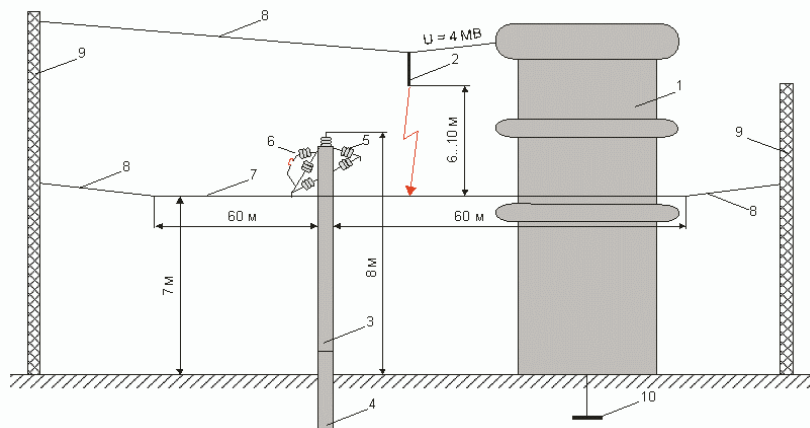


Рисунок 1 – Схема испытания УЗАП грозовым и коммутационным импульсом напряжения, сопротивление заземления опоры 380 Ом:

1 – генератор импульсных напряжений ГИН-6000/960; 2 – высоковольтный электрод; 3 – опора ВЛЭП 6/10 кВ; 4 – основание опоры ВЛЭП; 5 – изоляторы; 6 – УЗАП; 7 – имитатор провода ЛЭП 6/10 кВ; 8 – изолирующий канатик; 9 – опора; 10 – заземление ГИН



Рисунок 2 – Монтаж УЗАП на опоре и общий вид испытательной площадки

Для регистрации срабатывания УЗАП производилось их фотографирование в момент разряда ГИН на изолированный провод фрагмента линии. С помощью фотоснимков фиксировался пробой искрового промежутка (ИП) разрядника УЗАП или перекрытие изоляторов траверсы на опору.



Рисунок 3 – Линия 10 кВ с подвешенным над ней высоковольтным электродом

До и после проведения всех испытаний измерялись контрольные характеристики УЗАП-0 и УЗАП-К: классификационное напряжение ограничителей перенапряжений и среднее разрядное напряжение искрового промежутка. Измерение классификационного напряжения ограничителей при классификационном токе значением 1мА проводились по методике и в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52725-2007. Типовые осциллограммы классификационного напряжения при классификационном токе приведены на рис. 4.

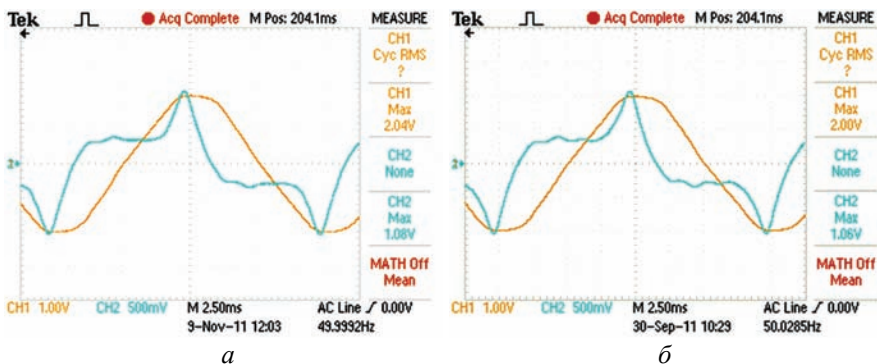


Рисунок 4 – Типовые осциллограммы напряжения и тока через ОПН: *а* – Осциллограмма напряжения промышленной частоты и тока через УЗАП-К ( $U_{КЛАСС} = U_{MAX} \sqrt{2} = 14,5$  кВ;  $I_{КЛАСС} = 1,08$  мА); *б* – Осциллограмма напряжения промышленной частоты и тока через УЗАП-О ( $U_{КЛАСС} = U_{MAX} \sqrt{2} = 14,2$  кВ;  $I_{КЛАСС} = 1,06$  мА)

Измерение среднего разрядного напряжения искрового промежутка проводились методом 100 % разрядного напряжения по ГОСТ 1516.2-97 в сухом состоянии на промышленной частоте. Типовые осциллограммы напряжения

промышленной частоты при пробое разрядного промежутка УЗАП представлены на рис. 5.

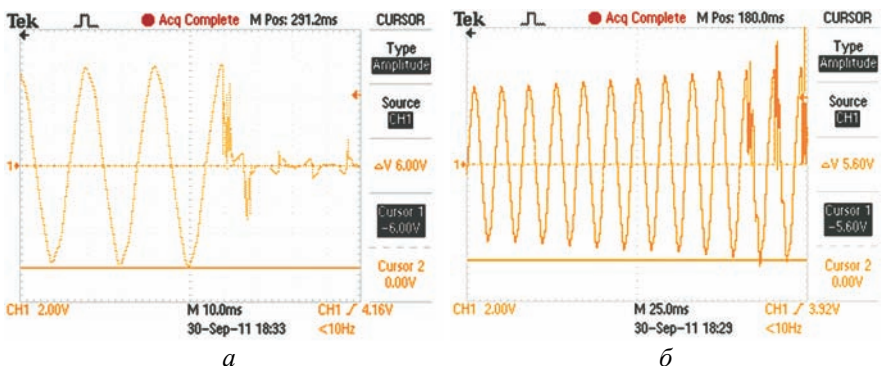


Рисунок 5 – Осциллограммы напряжения промышленной частоты при пробое разрядного промежутка УЗАП: *a* –  $U_{\text{ДЕЙСТВ}} = 60 \text{ кВ}$ ; *б* –  $U_{\text{ДЕЙСТВ}} = 60 \text{ кВ}$

### Результаты испытаний УЗАП при воздействии грозовых и коммутационных импульсов напряжения

Испытания проводились по схеме, приведенной на рисунке 1, путем воздействия на УЗАП грозовым импульсом напряжения со временем подъема 2,5 мкс и длительностью импульса 50мкс и коммутационным импульсом напряжения со временем подъема 2500мкс и длительностью импульса 2500 мкс. Величина испытательного напряжения изменялась в пределах 1,6-3,0 МВ.

Типовые осциллограммы импульса напряжения при разряде генератора импульсов (ГИН) в изолированный провод линии 10 кВ представлены на рис. 6, 7.

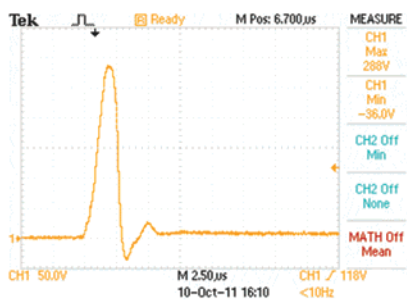


Рисунок 6 – Типовая осциллограмма грозового импульса напряжения при разряде ГИН в изолированный провод линии 10 кВ ( $U_{\text{max}} = 2,3 \text{ МВ}$ )

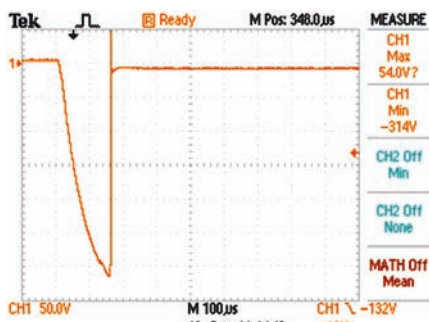


Рисунок 7 – Типовая осциллограмма коммутационного импульса напряжения при разряде ГИН в изолированный провод линии 10 кВ ( $U_{\text{max}} = 2,51 \text{ МВ}$ )

## Результаты испытаний УЗАП-О на воздействие грозовых импульсов напряжения

На фрагмент линии с последовательно установленным на опорном изоляторе траверсы УЗАП-0 напряжением 6 кВ и 10 кВ подавалось по 15 грозовых импульсов напряжения амплитудой 1,6-2,4 МВ. Результаты испытаний УЗАП-0 на напряжение 6 кВ и 10 кВ приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний УЗАП-0 на 6 и 10 кВ грозовым импульсом напряжения

№ п/п	Форма импульса напряжения $T_{фр}/T_{сп}$ , мкс	Полярность	Количество импульсов, шт.	Сопротивление опоземления опоры, Ом	Импульсное напряжение разряда в линии, МВ	Ток через УЗАП-0, кА	Кол-во срабатываний разрядника	Перекрытые изоляторов траверсы
УЗАП-0 на 6кВ								
1	1,2/50	-	15	380	1,6-2,2	2-3	15	нет
2	1,2/50	-	15	4	1,6-2,2	3-4	15	нет
3	1,2/50	+	15	4	1,6-2,2	3-4	15	нет
4	1,2/50	+	15	380	1,6-2,2	2-3	15	нет
УЗАП-0 на 10кВ								
5	1,2/50	-	15	380	1,8-2,4	2-3	15	нет
6	1,2/50	-	15	4	1,8-2,4	3-4	15	нет
7	1,2/50	+	15	4	1,8-2,4	3-4	15	нет
8	1,2/50	+	15	380	1,8-2,4	2-3	15	нет



Рисунок 7 – Разряд грозового импульса в изолированный провод линии 10кВ с УЗАП-0 на траверсе

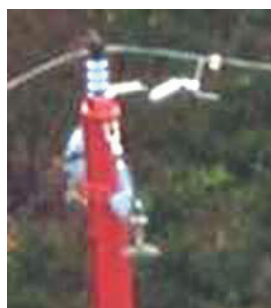


Рисунок 8 – Пробой искровой промежутка УЗАП-0

В результате фото и визуального контроля перекрытий изоляции траверсы не наблюдалось. Происходил устойчивый пробой искрового проме-

жутка и ограничение грозового перенапряжения. Типовая форма разряда грозового импульса в изолированный провод линии приведена на рис. 7. Типовая форма пробоя искрового промежутка УЗАП-0 при воздействии грозового импульса напряжения приведена на рис. 8.

### **Результаты испытаний УЗАП-0 на воздействие коммутационных импульсов напряжения**

На фрагмент линии с последовательно установленным на опорном изоляторе траверсы УЗАП-0 напряжением 6кВ и 10кВ подавалось по 15 коммутационных импульсов напряжения амплитудой 1,6-2,9 МВ. Результаты испытаний УЗАП-0 на напряжение 6кВ и 10кВ приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний УЗАП-0 на 6 и 10кВ коммутационным импульсом напряжения

№ п/п	Форма импульса на-пряжения T <sub>фр</sub> /T <sub>сп</sub> , мкс	Полярность	Кол-во им-пульсов, шт.	Сопро-тивле-ние заземле-ния опоры, Ом	Импульсное напряжение разряда в ли-нии, МВ	Ток через УЗАП-0, кА	Кол-во сра-батываний разрядника	Перекрытые изоляторов траверсы
<b>УЗАП-0 на 6кВ</b>								
1	250/2500	+	15	380	1,6-2	0,1-0,15	15	нет
2	250/2500	+	15	4	1,6-1,8	0,1-0,15	15	нет
3	250/2500	-	15	4	2,0-2,6	0,1-0,15	15	нет
4	250/2500	-	15	380	2,0-2,6	0,1-0,15	15	нет
<b>УЗАП-0 на 10кВ</b>								
5	250/2500	+	15	380	1,7-2	0,1-0,15	15	нет
6	250/2500	+	15	4	1,8-2	0,1-0,15	15	нет
7	250/2500	-	15	4	2,4-2,9	0,1-0,15	15	нет
8	250/2500	-	15	380	2,4-2,9	0,1-0,15	15	нет

В результате фото и визуального контроля перекрытий изоляции траверсы не наблюдалось. Происходил устойчивый пробой искрового промежутка и ограничение коммутационного перенапряжения. Типовая форма разряда коммутационного импульса в изолированный провод линии приведена на рис. 9. Типовая форма пробоя искрового промежутка УЗАП-0 при воздействии коммутационного импульса напряжения приведена на рис. 10.

### **Испытание УЗАП-К на воздействие грозовых импульсов напряжения**

На фрагмент линии с последовательно установленным на подвесном изоляторе траверсы УЗАП-К напряжением 6кВ и 10кВ подавалось по 15 грозовых импульсов напряжения амплитудой 1,8-2,4 МВ. Результаты испытаний УЗАП-К на напряжение 6 кВ и 10кВ приведены в табл. 3.



Рисунок 9 – Разряд коммутационного импульса в изолированный провод линии 10 кВ с УЗАП-0



Рисунок 10 – Пробой искрового промежутка УЗАП-0

Таблица 3 – Результаты испытаний УЗАП-К на 6 и 10 кВ при воздействии грозового импульса напряжения

№ п/п	Форма импульса напряжения $T_{фр}/T_{сп}$ , мкс	Полярность	Кол-во импульсов, шт.	Сопротивление заземления опоры, Ом	Импульсное напряжение разряда в линии, МВ	Ток через УЗАП-К, кА	Кол-во срабатываний разрядника	Перекрытие изоляторов траверсы
<b>УЗАП-К на 6кВ</b>								
1	1,2/50	-	15	380	1,8-2,4	2-3	15	нет
2	1,2/50	-	15	4	1,8-2,4	3-4	15	нет
3	1,2/50	+	15	4	1,8-2,4	3-4	15	нет
4	1,2/50	+	15	380	1,8-2,4	2-3	15	нет
<b>УЗАП-К на 10кВ</b>								
5	1,2/50	-	15	380	1,8-2,4	2-3	15	нет
6	1,2/50	-	15	4	1,8-2,4	3-4	15	нет
7	1,2/50	+	15	4	1,8-2,4	3-4	15	нет
8	1,2/50	+	15	380	1,8-2,4	2-3	15	нет

В результате фото и визуального контроля перекрытий изоляции траверсы не наблюдалось. Происходил устойчивый пробой искрового промежутка и ограничение грозового перенапряжения. Типовая форма разряда грозового импульса в изолированный провод линии приведена на рис. 11. Типовая форма пробоя искрового промежутка УЗАП-К при воздействии грозового импульса напряжения приведена на рис. 12.





Рисунок 11 – Разряд грозового импульса в изолированный провод линии 10кВ с УЗАП-К на траверсе



Рисунок 12 – Пробой искрового промежутка УЗАП-К

### Испытание УЗАП-К на воздействие коммутационных импульсов напряжения

На фрагмент линии с последовательно установленным на подвесном изоляторе траверсы УЗАП-К напряжением 6 и 10 кВ подавалось по 15 коммутационных импульсов напряжения амплитудой 1,7-2,9 МВ. Результаты испытаний УЗАП-К на напряжение 6 кВ и 10 кВ приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний УЗАП-К на 6 и 10 кВ при воздействии коммутационного импульса напряжения

№ п/п	Форма импульса напряжения $T_{фр}/T_{сп}$ , мкс	Полярность	Кол-во импульсов, шт.	Сопротивление заземления опоры, Ом	Импульсное напряжение разряда в линии, МВ	Ток через УЗАП-К, кА	Кол-во срабатываний разрядника	Перекрытие изоляторов траверсы
<b>УЗАП-К на 6кВ</b>								
1	250/2500	+	15	380	1,7-2	0,1-0,15	15	нет
2	250/2500	+	15	4	1,8-2	0,1-0,15	15	нет
3	250/2500	-	15	4	2,4-2,9	0,1-0,15	15	нет
4	250/2500	-	15	380	2,4-2,9	0,1-0,15	15	нет
<b>УЗАП-К на 10кВ</b>								
5	250/2500	+	15	380	1,7-2	0,1-0,15	15	нет
6	250/2500	+	15	4	1,8-2	0,1-0,15	15	нет
7	250/2500	-	15	4	2,4-2,9	0,1-0,15	15	нет
8	250/2500	-	15	380	2,4-2,9	0,1-0,15	15	нет

В результате фото и визуального контроля перекрытий изоляции тра-

версы не наблюдалось. Происходил устойчивый пробой искрового промежутка и ограничение коммутационного перенапряжения. Типовая форма разряда коммутационного импульса в изолированный провод линии приведена на рис. 13. Типовая форма пробоя искрового промежутка УЗАП-К при воздействии грозового импульса напряжения приведена на рис. 14.

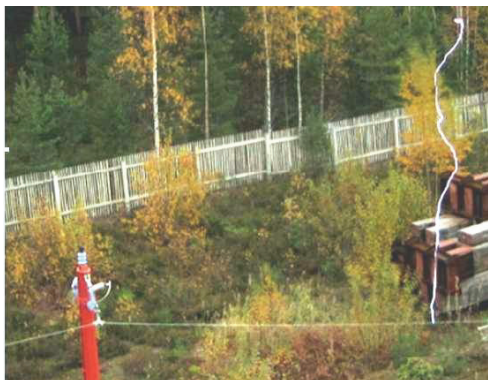


Рисунок 13 – Разряд коммутационного импульса в изолированный провод линии 10кВ с установленным на опоре УЗАП-К



Рисунок 14 – Пробой искрового промежутка УЗАП-К

### **Испытание изоляции траверсы без защиты при воздействии грозовых и коммутационных импульсов напряжения**

На фрагмент линии без установленного на траверсе УЗАП-К последовательно подавалось 15 грозовых импульсов напряжения амплитудой 1,6-2,5 МВ. Типовая форма разряда грозового импульса в изолированный провод линии 10кВ приведена на рис. 15. В результате фото и визуального контроля наблюдалось устойчивое перекрытие изолятора траверсы. Типовая форма пробоя изолятора траверсы при воздействии грозового импульса напряжения приведена на рис. 16.

На фрагмент линии без установленного на траверсе УЗАП-К последовательно подавалось 15 коммутационных импульсов напряжения амплитудой 2-2,5 МВ. Типовая форма разряда коммутационного импульса в изолированный провод линии 10 кВ приведена на рис. 17. В результате фото и визуального контроля наблюдалось устойчивое перекрытие изолятора траверсы. Типовая форма пробоя изолятора траверсы при воздействии грозового импульса напряжения приведена на рис. 18.

Таким образом, при отсутствии устройств защиты наблюдалась 100 % вероятность перекрытия изоляции траверсы с последующим переходом в силовую дугу напряжения промышленной частоты, что приводит к повреждению изоляторов, опор и проводов.



Рисунок 15 – Типовая форма разряда грозового импульса в изолированный провод линии 10кВ без защиты

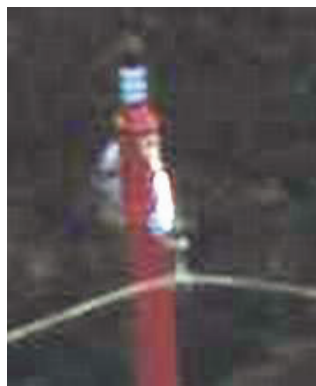


Рисунок 16 – Типовая форма перекрытия изолятора траверсы при воздействии грозового импульса напряжения

### **Испытание УЗАП-0 и УЗАП-К на воздействие грозовых и коммутационных импульсов напряжения под дождем**

Так как работы проводились на открытой площадке, то для испытания под дождем был приурочен день с дождливой погодой. При этом на фрагмент линии с установленными на траверсе УЗАП-0 и УЗАП-К последовательно подавалось по 10 грозовых импульсов и 10 коммутационных импульсов напряжения амплитудой 1,4-1,8 МВ в период интенсивной дождевой обстановки.



Рисунок 17 – Типовая форма разряда коммутационного импульса в изолированный провод линии 10 кВ без защиты

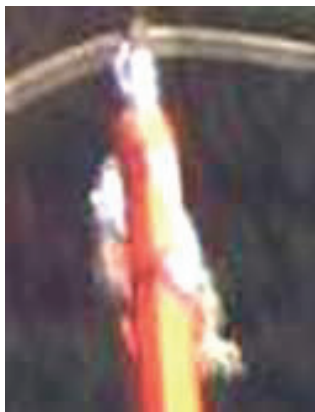


Рисунок 18 – Типовая форма перекрытия изолятора траверсы при воздействии коммутационного импульса напряжения

В результате фото и визуального контроля перекрытий изоляции траверсы под дождем не наблюдалось. Регистрировался стабильный пробой искрового промежутка УЗАП при воздействии грозового и коммутационного импульсов напряжения аналогично данным, приведенным выше при испытании устройств защиты в сухом состоянии.

Результаты испытаний подтвердили надежность устройств защиты типа УЗАП-0 и УЗАП-К при воздействии грозового и коммутационного импульсов напряжения, как в сухом состоянии, так и под дождем.

### **Испытание УЗАП-0 и УЗАП-К на воздействие грозовых и коммутационных импульсов напряжения при различной величине сопротивления заземления опоры**

На фрагмент линии с установленными на траверсе УЗАП-0 и УЗАП-К последовательно подавалось по 10 грозовых импульсов и 10 коммутационных импульсов напряжения амплитудой 1,6-2,4 МВ при последовательном изменении величины сопротивления заземления опоры. Величина сопротивления заземления опоры составляла в первом случае 4 Ом, во втором – 380 Ом. При величине сопротивления заземления, равной 380 Ом, испытания проводились по схеме, приведенной на рис. 1.

В результате фото и визуального контроля перекрытий изоляции траверсы не наблюдалось. Видимой разницы в работе УЗАП-0 и УЗАП-К по ограничению грозовых и коммутационных перенапряжений при существенном (в 95 раз) изменении величины сопротивления заземления опоры не наблюдалось.

### **Выводы**

1. Разработана методика натурных испытаний устройств защиты типа УЗАП установленных на изолирующей траверсе металлической опоры СПс 80/8 высотой 8 м с подключенным фрагментом линии электропередачи при воздействии грозового и коммутационного импульсов напряжения.

2. В результате испытаний не наблюдалось сквозного или частичного перекрытия изолирующей траверсы, минуя устройство защиты. Испытания показали, что устройства защиты от атмосферных перенапряжений типа УЗАП обеспечили защиту высоковольтной линии напряжением 6 и 10 кВ от грозовых и коммутационных перенапряжений, как положительной, так и отрицательной полярности.

3. После воздействия на защитные устройства грозовыми и коммутационными импульсами напряжения в количестве не менее 100 и амплитудой до 3 МВ контролируемые параметры испытываемых ОПН не изменились.

4. При изменении величины сопротивления заземления опоры с 4 Ом до 380 Ом (в 95 раз) разницы в срабатывании УЗАП по ограничению грозовых и коммутационных перенапряжений не наблюдалось.

*Поступила в редколлегию 12.04.2012.*