

**Голованов Игорь Григорьевич,**

к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: golovanov\_ig@mail.ru

**Левин Николай Максимович,**

обучающийся, Ангарский государственный технический университет,

e-mail:baikal138rus@ gmail.com

**Сахаровская Кристина Сергеевна,**

обучающийся, Ангарский государственный технический университет,

e-mail:Kristina. saharovskaya@ mail.ru

**Тихонова Ангелина Евгеньевна,**

обучающийся, Ангарский государственный технический университет,

e-mail:lina\_tikhonova@ icloud.com

## **ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И КОНТРОЛЯ МОЛНИЕЗАЩИТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

**Golovanov I.G., Levin N.M., Sakharovskaya K.S., Tikhonova A.E.**

### **WORK AND CONTROL LIGHTNING SYSTEM ELECTRODATION**

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос эксплуатации и контроля работоспособности вентильных разрядников и варисторов в молниезащите системы электроснабжения.

**Ключевые слова.** Вентильные разрядники, варисторы, молниезащита, система электроснабжения.

**Abstract.** The issue of the operation and control of the performance of valve dischargers and varistors in the electricity system zipper protection system is considered.

**Keywords:** valve dischargers, varistors, lightning protection, electricity supply.

Основным возмущающим воздействием на систему электроснабжения при грозовой активности является молния [1]. Молнии возникают в результате образования грозовых облаков в восходящих потоках тёплого влажного воздуха. В грозовом облаке происходит накопление зарядов до тех пор, пока напряжённость электрического поля в облаке не достигнет значения, достаточного для развития ионизационных процессов. Разряд начинается в лавинной форме, переходящей при дальнейшем повышении напряжённости электрического поля в стримерную форму, представляющую собой последовательный ряд большого числа электронных лавин, сдвинутых одна по отношению к другой в пространстве и во времени. Такое движение стримеров вызывает появление фотонов высокой энергии (фотоионизацию газа). Последовательное развитие стримеров с окончания разогретой части канала приводит к её удлинению и постепенному движению к области противоположного заряда в облаке или по направлению к Земле, вызывая либо внутриоблачные разряды молнии (большинство), либо разряды молнии на Землю (меньшая часть разрядов). Такое образование – плазменный канал со стимерами на конце – получило название лидер (от английского ведущий) [2]. Распределение гроз по поверхности Земли неравномерно. Наиболее частые грозы происходят в экваториальных районах Земли: в Центральной Африке – 150, на острове Ямайка до 220 грозовых дней в году. В

среднем каждую секунду по поверхности Земли бьёт 50 молний. Продолжительность одной грозы составляет от 1 до 2 часов. При ударе молнии по поверхности Земли по искровому каналу протекает ток в несколько десятков килоампер, максимальная температура газа в канале достигает 30000 К, это приводит к быстрому расширению канала молнии (в течение 20 мкс), которое вызывает распространение в окружающее пространство мощной звуковой волны (гром молнии).

На рисунке 1 представлена карта распределения грозовой интенсивности на территории Российской Федерации.

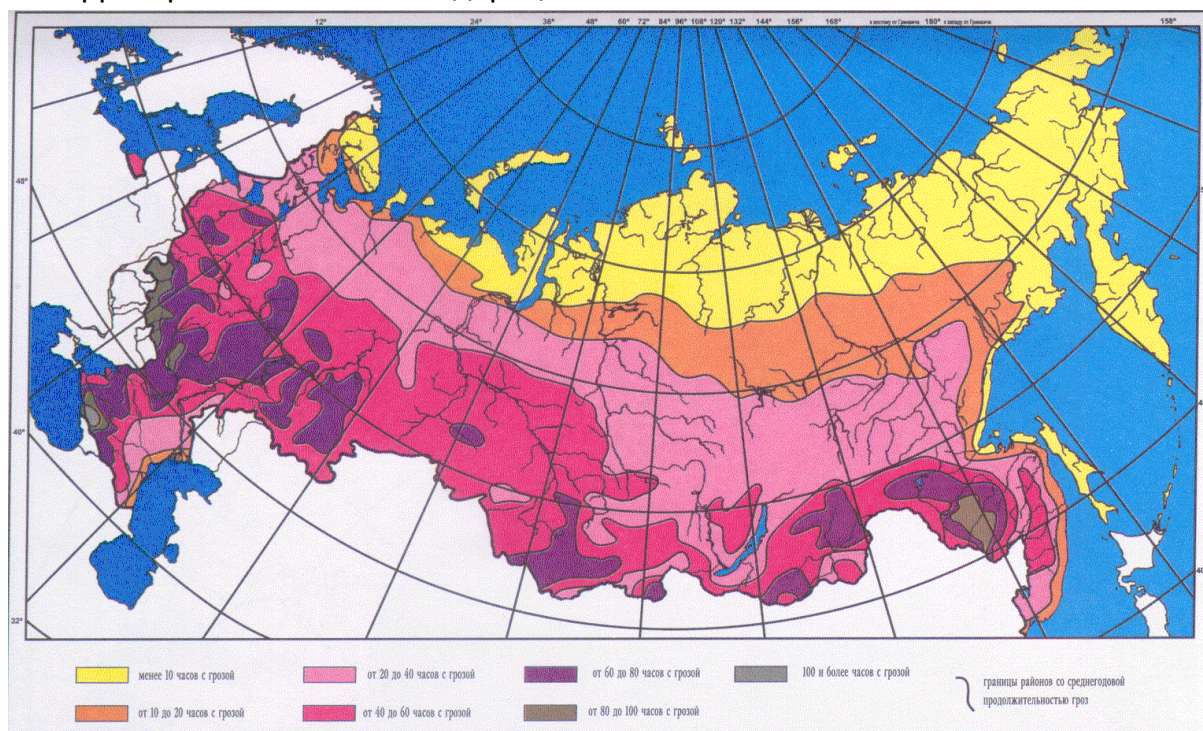


Рисунок 1 – Распределение грозовой активности на территории Российской Федерации

На большей части территории России число грозовых дней в году не превышает 40, и только в южных районах число грозовых дней составляет от 40 до 60 в год. В северных районах число грозовых дней в год не превышает 20. Наиболее повреждаемыми объектами системы электроснабжения являются воздушные линии электропередачи (ЛЭП). В конструкции высоковольтных ЛЭП входят грозозащитные провода и разрядники различной конструкции. В результате прямого удара молнии в грозозащитный провод ЛЭП распространение волн грозовых перенапряжений происходит со скоростью света. Величина тока молнии достигает 100 кА и более, что при попадании в оборудование системы электроснабжения приводит к тяжёлым последствиям. Поэтому вопрос защиты оборудования и обслуживающего персонала от поражения током молнии является актуальной задачей при проектировании и эксплуатации системы электро-

снабжения. Форма импульса тока молнии, в месте её удара имеет вид, который представлен на рисунке 2.

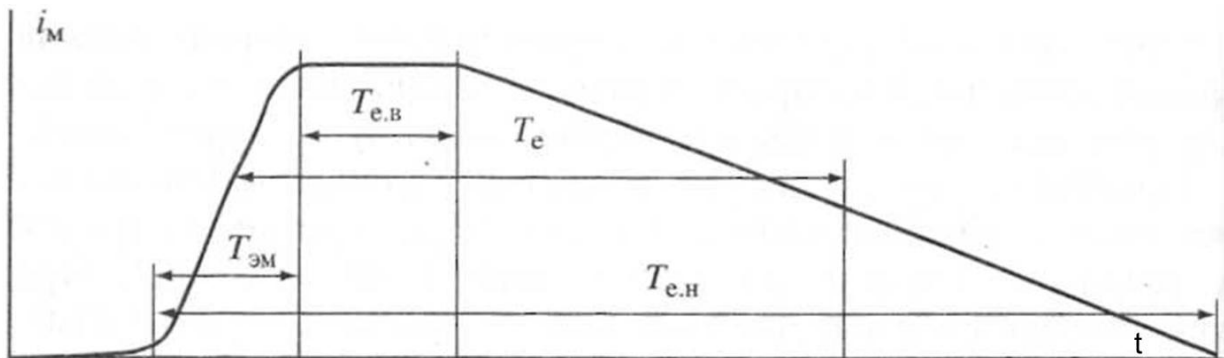


Рисунок 2 – Форма импульса тока молнии в месте её удара:  $T_{e.в}$  – время перемещения электронов верхних стримеров,  $T_e$  – время перемещения электронов вдоль средних стримеров,  $T_{e.н}$  – время перемещения электронов нижних стримеров,  $T_{эм}$  – время распространения электромагнитной волны, составляет около 300 мкс.

Одним из наиболее опасных аварийных режимов в электрических сетях является импульсный скачок напряжения при атмосферных разрядах. Эта величина значительно опережает нарастание импульсного тока и воздействует на изоляцию электрооборудования и других устройств, поэтому классические автоматы и другие защиты, реагирующие на изменение номинального тока, против нее не эффективны.

Значение перенапряжения может в разы превышать номинальную рабочую величину, поэтому такое явление подвергает опасности все оборудование и элементы сети.

Для предотвращения значительных убытков и последующих затрат на восстановление в электроустановках используются вентильные разрядники и ограничители перенапряжения (ОПН).

Вентильные разрядники, как и другие типы разрядников, предназначены для ограничения возникающих в электрических сетях коммутационных и атмосферных перенапряжений, с целью предотвращения возможных пробоев изоляции, повреждения оборудования и прочих негативных последствий.

Первый в мире вентильный разрядник был разработан в 1908 г. и представлял собой комбинацию из многократного искрового промежутка и уравнивающих конденсаторов. В СССР (1935 г.) были разработаны вентильные разрядники с применением тирита, называвшиеся тиритовыми наружными (РТН). В 1960 г. был освоен выпуск комбинированных вентильных разрядников - как от грозовых, так и от коммутационных перенапряжений [3]. Вентильный разрядник состоит из двух основных компонентов: многократного искрового промежутка (состоящего из нескольких однократных) и рабочего резистора (состоящего из последовательного набора вилитовых или тиритовых дисков). Многократный

искровой промежуток последовательно соединен с рабочим резистором. В связи с тем, что материал вилит, из которого выполнены кольца, между которыми организуются искровые промежутки, меняет характеристики при увлажнении, рабочий резистор герметично закрывается от внешней среды. Во время перенапряжения многократный искровой промежуток пробивается, задача рабочего резистора состоит в том, чтобы снизить значение сопровождающего тока до величины, которая сможет быть успешно погашена искровыми промежутками. Вентиль обладает особым свойством: его вольт-амперная характеристика нелинейна, падает с увеличением значения силы тока.

ОПН впервые были созданы в Санкт-Петербурге (Россия). Первая информация о создании ОПН была представлена на международной конференции по большим электрическим сетям (CIGRE) и принадлежит группе российских авторов [4].

ОПН включает в себя полупроводниковый элемент с нелинейной величиной сопротивления. В роли таких элементов выступают вилитовые диски, изготовленные на основе оксидов цинка с включением в их состав тех или иных примесей. Работа ОПН схожа с обычным варистором, отличительной особенностью ограничителя являются некоторые различия с характеристикой варистора в части проводимости и скорости нарастания. Принцип действия ограничителя перенапряжения заключается в его нелинейной вольт-амперной характеристике (ВАХ). При номинальном напряжении сопротивление варисторов достаточно большое и ток через них не протекает – его сопротивление изоляции соизмеримо с изоляцией кабелей, изоляторов и электрических приборов.

В рабочем режиме при возникновении грозовых разрядов или других высоковольтных импульсов сопротивление нелинейных резисторов внутри ограничителя резко снижается. Как правило, эта величина приближается к нулю или несоизмеримо меньше сопротивления сети и всех подключенных к ней приборов. Поэтому при коммутационных или грозовых перенапряжениях ток разряда протекает только через ограничитель перенапряжения на землю, чем и обеспечивается защита электрооборудования.

В процессе эксплуатации электрических подстанций при воздействии импульсного напряжения от удара молнии, выявлено появление перенапряжений с крутыми фронтами на входе в систему электроснабжения подстанции, а при таких воздействиях не всегда можно обеспечить надёжную защиту. Защита подходов к подстанциям с помощью ОПН полностью исключает возможность появления на подстанции волн грозовых перенапряжений с крутыми фронтами, поскольку напряжение на них нарастает плавно по мере увеличения тока молнии. Как показывают расчёты, которые приведены в таблице 1, допустимые расстояния между опорами ЛЭП с применением ОПН имеют значения, представленные в этой же таблице.

Таблица 1

## Допустимые расстояния между опорами ЛЭП при применении ОПН

Эквивалентное сопротивление заземления опор $R_3$ , Ом			5	10	15	20	25	30
Допустимое расстояние между опорами с ОПН, км	Для линий 110 кВ	-	7,2	3,6	2,4	1,81	1,45	1,2
		+	2,8	1,4	0,92	0,7	0,56	0,46
	Для линий 220 кВ	-	12	6	4	3	2,4	2
		+	4,8	2,4	1,6	1,2	1,0	0,8
	Для линий 500 кВ	-	18,2	9,1	6,1	4,6	3,6	3,0
		+	7,2	3,6	2,4	1,8	1,5	1,2

Как видно из таблицы 1, установка ОПН на каждой опоре не требуется для предотвращения обратных перекрытий на линии. При этом увеличение сопротивления заземления опор приводит к значительному уменьшению допустимых расстояний между двумя опорами с ОПН, а при повышении класса напряжения допустимое расстояние между опорами с ОПН существенно увеличивается.

Поэтому замены традиционных (вентильных разрядников) на ОПН создаёт принципиально новые условия грозозащиты подстанций и электрооборудования системы электроснабжения, полностью исключая возможность появления на высоковольтном оборудовании подстанций волн грозových перенапряжений с крутыми фронтами. При этом схемы грозозащиты подстанций могут быть существенно упрощены, а испытательные напряжения изоляции существенно снижены. Это определит существенный экономический эффект от применения ОПН в электрических сетях. При этом большое различие разрядных напряжений изоляции линий на опорах и остающегося напряжения на ОПН при грозových перенапряжениях исключает необходимость установки ОПН на каждой опоре.

В последние годы в системах электроснабжения вентильные разрядники активно заменяются более совершенными ОПН. Однако до настоящего времени в энергосистемах количество эксплуатируемых вентильных разрядников значительно превышает количество ОПН. Следует отметить, что предприятия, эксплуатирующие вентильные разрядники, заинтересованы в продлении их срока службы, так как они зарекомендовали себя высоконадёжными устройствами. Обновление и замена вентильных разрядников на новые ОПН будет происходить в течение длительного времени, определяемого экономическими возможностями, интенсивностью повреждений и результатами отбраковки. Следовательно, своевременное выявление неисправностей средств защиты от перенапряжений (СЗОП), качество работы которых гарантирует надёжную работу дорогостоящего электрооборудования, является актуальной проблемой элек-

троэнергетики. К методам диагностики, позволяющим своевременно выявить неисправности в СЗОП относятся [5]:

- тепловизионное обследование (с помощью приборов инфракрасной техники с высокой разрешающей способностью по температуре не ниже 0,5 °С);
- измерение сопротивления изоляции ( $R_{\text{изол}}$ );
- измерение пробивного напряжения ( $U_{\text{пр}}$ ) промышленной частоты 50 Гц;
- измерение токов проводимости ( $I_{\text{пр}}$ ) у разрядников с шунтирующими сопротивлениями, которые должны соответствовать нормативным значениям.

Методика тепловизионного контроля высоковольтных вентильных разрядников в рабочем состоянии достаточно хорошо разработана, и по ней опубликовано много работ [5,6]. Благодаря её применению выявляются следующие виды неисправностей в элементах вентильных разрядников, приводящие их к аномальным нагревам [7]:

- нарушение герметичности;
- обрыв или увлажнение шунтирующих резисторов;
- замыкание искровых промежутков;
- нарушение заводской комплектации элементов.

Руководящий документ [8] предлагает считать исправным разрядник, «верхние элементы которого в месте расположения шунтирующих резисторов нагреты одинаково». Однако, опыт эксплуатации показывает, что температуры на всех верхних элементах фаз разрядника одного присоединения практически никогда не бывают одинаковыми (несимметрия фазных напряжений, неидентичное расположение разных фаз разрядников относительно точки съёмки, разная степень загрязнённости элементов разрядников и др.) и всегда отличается (даже при исправных элементах) на доли, а иногда и на целые градусы. Практический опыт показывает, что при разнице перепада температуры верхних элементов разрядника относительно соседних в 2 или 3 °С можно с уверенностью утверждать, что элемент разрядника неисправен и его рекомендуется вывести в ремонт. Если различие температур аналогичных элементов разных фаз разрядника в пределах от 2 до 5 °С, то целесообразно провести дополнительные испытания. После анализа всех результатов диагностики окончательное решение о ремонте остаётся за персоналом, в чьём введении находится СЗОП. Важным параметром и надёжным показателем, характеризующим работоспособность разрядников, является величина его пробивного напряжения. Это измерение на практике часто применяется в тех случаях, когда исправность того или иного элемента разрядника вызывает определённые сомнения по полученным термограммам тепловизионного контроля и данных токов проводимости. Как известно, измерение пробивного напряжения вентильных разрядников производится с целью определения состояния искровых промежутков и соответствия защитных характеристик требуемым нормам [9]. Испытания на пробой позволяют эффективно выявить дефекты разрядников, появившиеся в ре-

зультате неправильной транспортировки, разгерметизации в процессе эксплуатации или в результате снижения ими пропускной способности. Оценка состояния вентильных разрядников производится путём сопоставления измеренных значений пробивного напряжения с предельно допустимыми значениями, приведёнными в паспорте разрядника или в действующих нормах испытания электрооборудования [10]. После окончания измерения пробивных напряжений дополнительно должны быть измерены токи проводимости разрядников при выпрямленном напряжении для контроля целостности шунтирующих резисторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Г.Н. Молния и молниезащита: Ин-т электрофизики и электроэнергетики РАН. – М.: Наука 2008. – 274 с. Алгоритмы успешного маркетинга. М., 2007. С. 256-300.
2. Александров Г.Н. О механизме перехода коронного разряда в искровой в длинных воздушных промежутках // ЖТФ. Т. XXXV. 1965 №7. С. 1225-1229.
3. Вентильные разрядники: назначение, принцип действия, конструкция. URL: [https://vuzlit.ru/726539/ventilnyy\\_razryadnik](https://vuzlit.ru/726539/ventilnyy_razryadnik) (дата обращения 13.05.2021).
4. Александров Г.Н. Серия нелинейных ограничителей перенапряжений в полимерных корпусах // Энергетик, 2002. №5. С 14-17.
5. Власов, А.Б. Результаты многолетнего использования тепловизора для контроля состояния электрооборудования Колэнерго / А.Б. Власов, Н.С. Афанасьев, А.В. Джура // Электрические станции. – 1996. – № 8. – С. 61-63.
6. Баталыгин, С.Н. Комплексное обследование силовых трансформаторов / С.Н. Баталыгин, Г.М. Михеев, В.М. Шевцов // XXVI сессия семинара «Кибернетика электрических систем по тематике «Диагностика электрооборудования» – Новочеркасск. – 2004. – С. 14-16.
7. Лапанов, С.Н. Тепловизионный контроль и диагностика электрооборудования / С.Н. Лапанов, В.В. Шишминцев // Промышленная энергетика. – 2000. – №11. – С. 15-17.
8. Объём и нормы испытаний электрооборудования / Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. РД 34.45-51. 300-97. 6-е изд. с изм. и доп. Изд-во НЦ ЭНАС. – 2002. – 256 с.
9. ГОСТ 16357-83. Разрядники вентильные переменного тока на номинальное напряжение от 3,8 до 600 кВ. – М.: ИПК Изд-во стандартов. – 1999. – 31 с.
10. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования. Раздел 7. Методы контроля состояния вентильных разрядников, ограничителей перенапряжений, трубчатых разрядников. – М.: СПО ОРГРЭС. – 1997. – 26 с.