

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

---

Кафедра «Электротехника, метрология и электроэнергетика»

**Г.С. КАСАТКИН, В.В. ФЕДОТОВ**

**ВАРИСТОРЫ, ИХ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ**

*Учебное пособие*

МОСКВА - 2010

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

---

Кафедра «Электротехника, метрология  
и электроэнергетика»

Г.С. КАСАТКИН, В.В. ФЕДОТОВ

**ВАРИСТОРЫ, ИХ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ**

Рекомендовано редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия для студентов  
электротехнических специальностей

Москва - 2010

УДК 621.315.5  
К-28

Касаткин Г.С., Федотов В.В. Варисторы их свойства и применение: Учебное пособие.- М.: МИИТ, 2010. – 40 с.

Св. план 2010 г., поз.75

Касаткин Георгий Сергеевич, Федотов Виктор Васильевич

В учебном пособии описываются материалы и технология изготовления нелинейных полупроводниковых резисторов – варисторов; рассматриваются функции варисторов в схемах защиты от перенапряжений; приводятся типы и параметры вентильных разрядников и полупроводниковых ограничителей перенапряжений

## **ВАРИСТОРЫ, ИХ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ**

Учебное пособие

Рецензенты: д.т.н. Ю.Н. Львов (ВНИИЭ)  
д.т.н. С.П. Власов (МИИТ)

© Московский государственный  
университет путей сообщения  
(МИИТ), 2010

---

Подписано к печати:  
усл.-печ.л.  
Заказ:

Формат: 60x84/16  
Тираж 100 экз.

---

127994, Москва, ул.Образцова, д.9, стр.9  
Типография МИИТа

# 1. МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАРИСТОРОВ

Варисторы – это нелинейные полупроводниковые резисторы. Для их изготовления используют полупроводниковые материалы на основе многофазных структур из порошка карбида кремния SiC и изоляционной связки. Связка скрепляет зерна порошка. Варистор с глинистой связкой называют тиритом. Варисторы со связкой в виде керамической массы на основе жидкого стекла называют вилитами и тервитами. Последний материал получают при более высокой температуре термической обработки (свыше 1000°C) по сравнению с вилитом (около 300°C).

В результате термической обработки, вокруг каждого из зерен порошка карбида кремния образуется тонкий слой окиси кремния. При небольшом напряжении удельное сопротивление такого слоя толщиной  $10^{-5}$  см составляет  $10^6 - 10^8$  Ом·см. В то же время удельное сопротивление самих зерен карбида кремния невелико (около 1 Ом·см). Поэтому при низких напряженностях электрического поля пленки окиси кремния являются запорными слоями, изолирующими друг от друга зерна порошка, и все приложенное к материалу напряжение приходится на эти запорные слои.

С ростом напряженности при определенном её значении изолирующие свойства пленок резко падают и зерна карбида кремния электрически соединяются между собой благодаря разряду через поры между ними. При этом зерна SiC собираются в ряд параллельных проводящих цепочек, за счет чего сопротивление варистора резко падает, а угол наклона вольтамперной характеристики (рис. 1) резко уменьшается.

Перегиб вольтамперной характеристики не имеет вид резкого излома, а носит квадратичный характер. Это обусловлено тем, что слои пленки между зёрнами имеют несколько разные толщины и, следовательно, пробиваются не одновременно.

При понижении напряженности слои пленки восстанавливают свои изолирующие свойства.

Таким образом, варисторы - это нелинейные полупроводниковые резисторы, сопротивление которых резко изменяется в зависимости от величины напряженности электрического поля.

Вольтамперная характеристика варистора может быть записана в виде

$$u = ci^\alpha \tag{1}$$

или  $i = ku^\beta$ , (2)

где  $C$  и  $k$  - постоянные, зависящие от геометрических размеров и удельного сопротивления материала;

$\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты нелинейности, причем  $\alpha = \frac{1}{\beta}$ .

Коэффициент нелинейности тирита  $\alpha \approx 0,4$   $\beta \approx 2,5$ , у тервита  $\alpha \approx (0,25 \div 0,3)$   $\beta \approx (3 \div 4)$  и у вилита  $\alpha \approx (0,15 \div 0,2)$   $\beta \approx (5 \div 7)$ .

Вольтамперные характеристики этих варисторов построены в одном масштабе на рис.1.

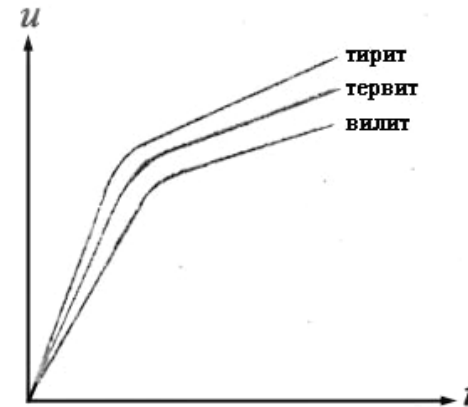


Рис.1 Вольтамперные характеристика варисторов

В последнее время широкое применение получили высоконелинейные варисторы на основе оксида цинка (ZnO) с добавлением окислов некоторых металлов (висмута, свинца, олова и др.). После соответствующей термообработки между зернами порошка ZnO возникают изоляционные прослойки с высоким удельным сопротивлением ( $\rho \approx 10^9$  Ом·см), значительно большим по сравнению с  $\rho$  изоляционной пленки в варисторах на основе SiC. Удельное сопротивление самих зерен ZnO гораздо меньше зерен SiC. При низких напряженностях электрического поля сопротивление варисторов на основе окиси цинка очень высокое и вольтамперная характеристика (рис. 2) имеет крутой подъем (участок 1).

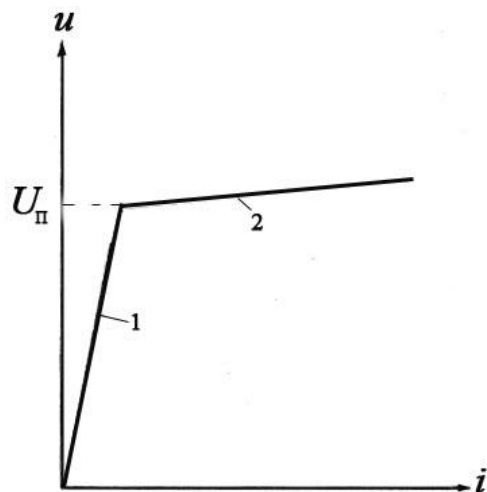


Рис. 2 Вольтамперная характеристика варистора на основе окиси цинка

При достижении определенного уровня напряжения (напряженности) прослойки теряют свои изолирующие свойства, сопротивление варисторов резко и быстро (в течение  $\approx 2$  мкс) падает и вольтамперная характеристика резко изменяет свой угол наклона на минимальный (участок 2). В отличие от варисторов на основе SiC вольтамперная характеристика высоконелинейного варистора имеет "релейный характер" с

вполне определенным напряжением перегиба  $U_{п}$ , называемый пороговым. Коэффициент нелинейности  $\beta$  варисторов на основе ZnO на участке 2 вольтамперной характеристики может достигать - 20-100 ( $\alpha \approx 0,05 - 0,01$ ).

Варисторы из SiC выпускают в форме дисков различной толщины и диаметра. Оксидно-цинковые резисторы выпускают в виде дисков толщиной 8 мм и диаметром 28 мм.

Вилит и тервит наиболее широко используются в качестве рабочих нелинейных сопротивлений в вентильных разрядниках.

## 2. ПРИНЦИП РАБОТЫ ВЕНТИЛЬНЫХ РАЗРЯДНИКОВ И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Разрядник включается вблизи защищаемого объекта (ЗО) и параллельно ему между высоковольтным проводом и землей так, как это показано на рис. 3. На рис.3а вентильный разрядник (РВ) изображен в развернутом виде, состоящим из искрового промежутка (ИП) и варистора (В), а на рис. 3б - в соответствии с ГОСТ 2.727-68.

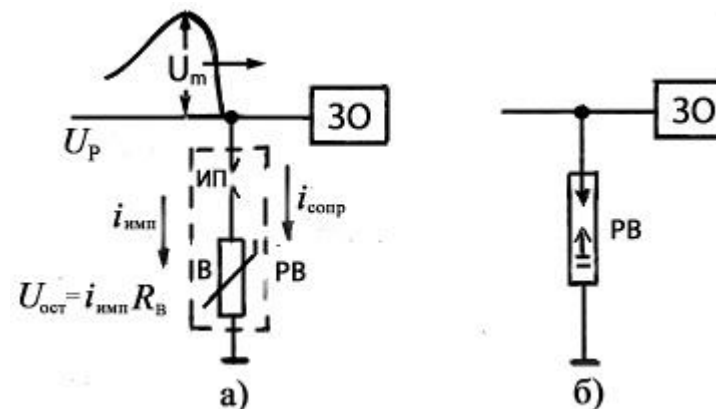


Рис.3 Условное обозначение вентильных разрядников

Пробивное напряжение искровых промежутков разрядников выбирается значительно выше рабочего напряжения ( $U_p$ ) линии, к которой они подключаются. Поэтому

при отсутствии перенапряжения ток через разрядник не протекает. При возникновении в линии, в случае атмосферных разрядов или коммутациях, импульсов перенапряжений и воздействии их на разрядник, его ИП пробиваются и через РВ на землю начинает протекать импульсный ток ( $i_{имп}$ , рис.3а). Так как сопротивление варисторов разрядника в области высоких напряжений резко падает (рис.1), то величина этого тока может достигать единиц и даже десятка килоампер.

На этом уменьшенном сопротивлении варисторов импульсный ток  $i_{имп}$  создает падение напряжения, называемое остающимся напряжением разрядника –  $U_{ост}$  (рис.3а). Максимальная величина этого напряжения ( $U_{ост max}$ ) должна быть на 20 ÷ 30 % меньше уровня импульсной прочности изоляции защищаемого объекта. Значение  $U_{ост max}$  определяет уровень ограничения перенапряжения данным разрядником.

После прекращения действия импульса перенапряжения (время действия импульсов обычно составляет десятки - сотни микросекунд) на линии и разряднике скачком устанавливается прежнее рабочее напряжение  $U_p$ , но искровой промежуток не успевает восстановить свою электрическую прочность и дуга, зажженная импульсом между электродами ИП, продолжает гореть. Поэтому через ИП и варистор разрядника под действием рабочего напряжения  $U_p$  продолжает протекать ток, называемый сопровождающим  $i_{сопр}$ , значительно меньший  $i_{имп}$ . Этот ток, являющийся током короткого замыкания, должен быть прерван разрядником. При снижении напряжения с импульсного до рабочего сопротивление варистора резко возрастает (рис.1), что существенно ограничивает величину  $i_{сопр}$  и способствует гашению его дуги в искровом промежутке ИП. На переменном рабочем напряжении дуга обычно обрывается при переходе тока  $i_{сопр}$  через нулевое значение. На постоянном напряжении условия гашения дуги несколько хуже. Для облегчения гашения дуги  $i_{сопр}$  в разряднике обычно делают не один, а несколько искровых промежутков (что позволяет увеличивать общую

длину дуги) и столько же варисторов. Такими разрядниками можно гасить сопровождающие токи, величиной  $\leq 100$  А.

Для прерывания больших значений сопровождающих токов используется магнитное гашение дуги  $i_{сопр}$ . На рис.4 и 5 показаны два варианта таких систем магнитного гашения.

Изображенный на рис.4 искровой промежуток разрядника представляет собой кольцевую щель между двумя медными концентрически расположенными электродами (1 и 2). Магнитное поле напряженностью  $H$  создается постоянными магнитами. На возникшую при пробое искрового промежутка дугу с током  $I$  начинает действовать отклоняющая сила  $F$ . Направление этой силы, определяемое правилом правой руки, показано на рис. 4 для заданных направлений  $H$  и  $I$ . Под действием силы  $F$  дуга начинает стремительно вращаться по щели. При этом она охлаждается и не успевает вызвать оплавление электродов и возможную а этом случае термоэмиссию электронов с поверхности электродов.

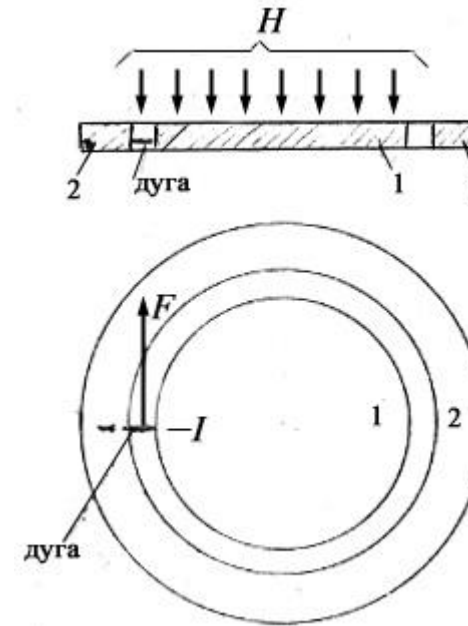


Рис.4 Искровой промежуток с кольцевым вырезом

В варианте, изображенном на рис.5, используются специальные катушки  $L$  магнитного дутья. Эти катушки вместе с искровыми промежутками расположены в дугогасительных камерах. При протекании тока через разрядник вокруг обмоток катушек создаются магнитные поля, которые растягивают дуги в искровых промежутках и способствуют их обрыву. Резисторы  $R_1 - R_4$  выравнивают напряжения на искровых промежутках.

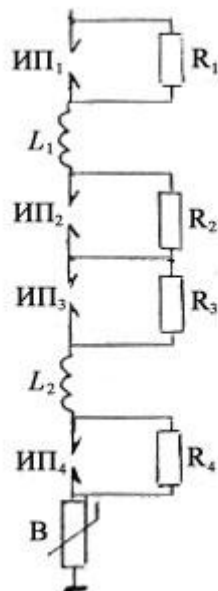


Рис.5 Разрядник с катушками магнитного дутья

К основным характеристикам вентильных разрядников относят:

- класс напряжения разрядника (номинальное рабочее напряжение линии, к которой он подключается) -  $U_{ном}$ ;
- пробивное напряжение при частоте 50 Гц (статическое пробивное напряжение искровых промежутков вентильного разрядника) -  $U_{пр\sim}$ ;
- импульсное пробивное напряжение -  $U_{пр и}$ ;

- остающееся напряжение при протекании через разрядник импульсного тока с данной амплитудой и временем фронта -  $U_{ост}$ ;

- сопровождающий ток при наибольшем рабочем напряжении, который определяет условия гашения дуги на искровых промежутках -  $i_{сопр}$ .

Важными параметрами являются также вольт-секундная и вольтамперные характеристики разрядника.

Вольт-секундная характеристика разрядника (кривая 1 рис.6) строится по итогам обработки результатов испытания разрядника серией стандартных импульсов напряжения (с временем фронта  $t_{\phi} = 1,2$  мкс и длительностью  $t_u = 50$  мкс) различной амплитуды, подаваемых от генератора импульсных напряжений (ГИН). Эта характеристика должна быть правильно скоординирована с вольт-секундной характеристикой изоляции защищаемого объекта  $30$  (рис.6), полученную тем же путем.

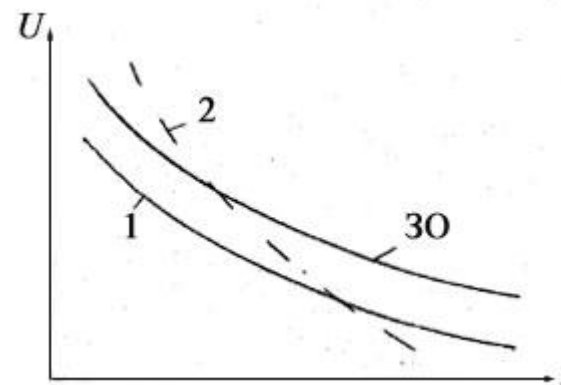


Рис.6 Координация вольт-секундных характеристик разрядника и защищаемого объекта ( $30$ )

Правильно скоординированная характеристика разрядника  $1$  (рис.6) должна располагаться ниже (с запасом примерно в  $20 \div 30\%$ ) вольт-секундной характеристики

изоляции защищаемого объекта - **ЗО**. Разрядник с вольт-секундной характеристикой **2** (рис.6) не сможет защищать объект при крутых импульсах (малых временах разряда  $t$ ), так как в области малых  $t$  - кривая **2** располагается выше кривой **ЗО**.

Защитное действие разрядника оценивают коэффициентом защиты:

$$K_{защ} = \frac{U_{ост\ t}}{\sqrt{2}K_c U_\phi}, \quad (3)$$

где  $U_{ост\ t}$  - максимальное остающееся на разряднике напряжение при протекании через него определенного импульсного тока  $i_{имп}$ ;

$K_c$  - коэффициент сети, для установок с заземленными нейтралью, равный 1,4, а с - изолированными, равный 1,9;

$U_\phi$  - фазовое напряжение линии, к которой подключается разрядник.

Чем меньше  $K_{защ}$  ( чем меньше  $U_{ост}$ ), тем выше защитное действие разрядника. По величине  $K_{защ}$  вентильные разрядники переменного тока делятся на 4 группы. К первой группе с наилучшим защитным действием относятся разрядники  $K_{защ} \leq 1,7$ , к четвертой группе с наихудшим защитным действием - разрядники с  $K_{защ} > 2,6$ . Разрядники последней группы используется на наиболее низкое рабочее напряжение и рассчитаны на наименьший импульсный ток по сравнению с разрядниками других групп.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫМ РАЗРЯДНИКОМ

По снятой экспериментально или заданной вольтамперной характеристике варистора разрядника можно определить уровень ограничения им перенапряжения ( $U_{ост\ max}$ ) Для этого используется расчетная схема замещения, изображенная на рис.7.

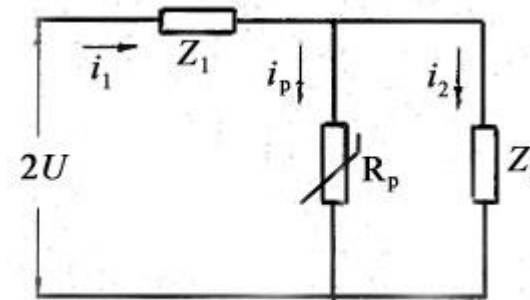


Рис.7 Расчетная схема замещения

Она составлена на основании рис.3а с учетом правила построения эквивалентных схем замещения. Согласно этому правилу все волновые сопротивления линий ( $Z$ ) заменяются равными им активными сопротивлениями. Индуктивности и емкости остаются без изменения и к составленной таким образом схеме прикладывается удвоенное напряжение импульса (падающей волны напряжения). Схема рис.7 составлена в соответствии с этим правилом для момента времени, когда искровой промежуток **ИП** разрядника уже пробит и через варистор  $R_p$  начал протекать под действием импульса напряжения импульсный ток  $i_p$ .  $Z_1$  и  $Z_2$  - волновые сопротивления линий до и после точки подключения разрядника (в общем случае они могут отличаться по величине).

Как следует из схемы рис.7

$$2U = i_1 Z_1 + i_p R_p, \quad (4)$$

$$i_p R_p = U_p, \quad (5)$$

обозначим 
$$i_2 = U_p / Z_2, \quad (6)$$

тогда ток 
$$i_1 = i_p + i_2 = i_p + U_p / Z_2. \quad (7)$$

После подстановки равенства (7) в (4) получим:

$$2U = (i_p + U_p / Z_2) Z_1 + U_p \quad (8)$$

После преобразований равенство (8) приобретает вид

$$U \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = i_p \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} + U_p. \quad (9)$$

При известных форме и амплитуде импульса напряжения, значениях  $Z_1$  и  $Z_2$  и вольтамперной характеристике варисторов  $U_p = f(i_p)$  путем графического построения можно определить  $U_{ocm}$ , т.е. уровень ограничения напряжения импульса данным разрядником. Построение кривой  $U_{ocm}$ , проведенное на основании равенства (9), показано на рис.8. В правом квадранте построен импульс напряжения заданной формы и амплитуды, ординаты которого изменены в  $\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$  раза (левая часть равенства (9)). В левом квадранте построена вольтамперная характеристика варистора  $U_p = f(i_p)$ , а также наклонная прямая  $i_p \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$ . Верхняя кривая в этом квадранте

представляет собой сумму ординат двух предыдущих кривых, т.е. правую часть равенства (9). Если предположить, что искровой промежуток разрядника пробивается в момент времени  $1$ , то остающееся при этом значение напряжения на разряднике (точка  $1'$ ) можно найти путем следующего построения. На основании равенства (9) проводится линия на уровне точки  $1$  до пересечения с кривой  $i_p \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} + U_p$ .

Точка пересечения переносится вертикально вниз до пересечения с кривой  $U_p = f(i_p)$  и далее, как показано на рис.8, до пересечения с вертикалью, соответствующей моменту времени  $1$ . Полученная точка  $1'$  и будет мгновенным значением остающегося на разряднике напряжения ( $U_{ocm}$ ) в момент пробоя его искрового промежутка. Аналогично определяются другие мгновенные значения  $U_{ocm}$  (точки  $2$  и  $3$ ).

После построения кривой  $U_{ocm} = f(t)$  определяется её пик  $U_{ocm m}$ , т.е. уровень ограничения перенапряжения.

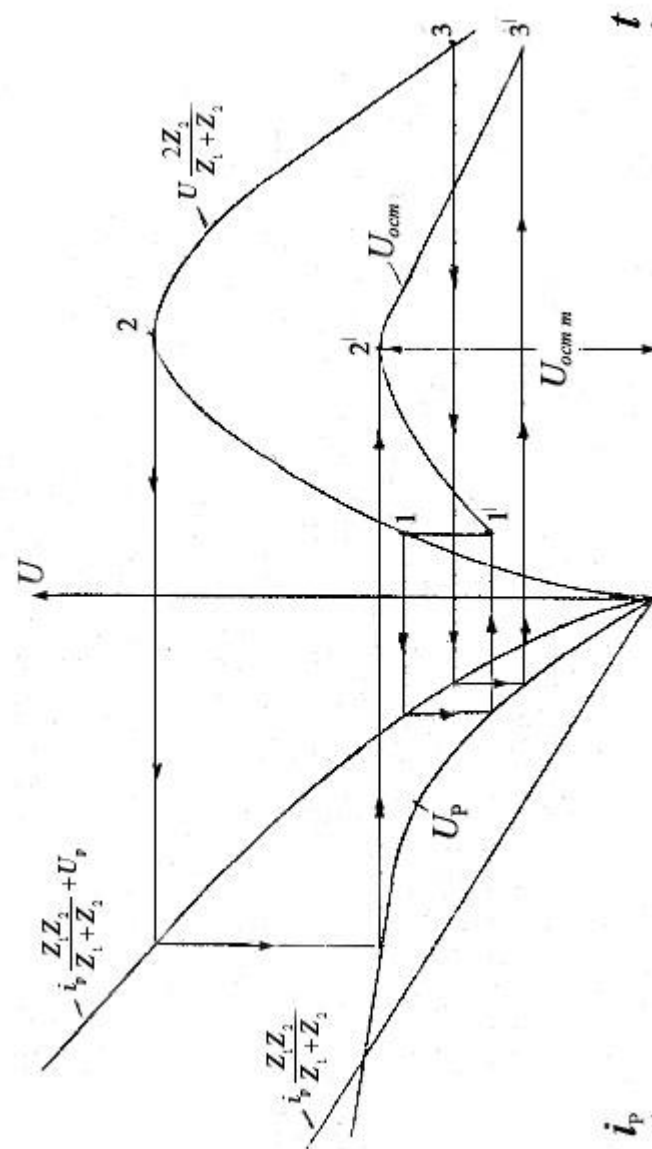


Рис. 8 Построение кривой остающегося напряжения на разряднике



#### 4. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ВЕНТИЛЬНЫХ РАЗРЯДНИКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

**Вентильные разрядники переменного тока** применяются для защиты от перенапряжений оборудования электростанций и подстанций, а также электроподвижного состава (ЭПС) электрических ж.д. переменного тока.

Буквы в условных обозначениях вентильных разрядников переменного тока, согласно ГОСТ 16357 – 83, означают:

Р - разрядник;

В – вентильный;

П – подстанционный;

С – станционный;

М -магнитный (с магнитным гашением дуги);

О – облегченный;

Г – грозовой.

Цифры означают класс напряжения разрядника в киловольтах. В табл.1 приведены наиболее распространенные в устройствах электрической тяги типы вентильных разрядников переменного тока и их основные характеристики. Разрядник типа РВМ-35 широко применяется для защиты оборудования тяговых подстанций и ЭПС переменного тока от перенапряжений, возникавших в контактной сети. Остальные приведенные в табл.1 типы разрядников используются для защиты от волн перенапряжений, набегающих на подстанции постоянного и переменного токов со стороны питающих ЛЭП. Для защиты ЭПС применяется также специальный модернизированный разрядник РВЭ-25М.

В качестве примера на рис.9 приведена конструкция вентильного разрядника РВЭ-25М (разрядник вентильный для электроподвижного состава с номинальным напряжением 25 кВ). Он состоит из фарфорового корпуса 10 с двумя фланцами. К фланцам болтами 1 и 7 с уплотнительными резиновыми прокладками 3 и 9 крепятся верхняя крышка 2 и нижняя крышка 8. Внутри корпуса размещены 28 единичных искровых тарельчатых промежутков, сгруппированных в семь

Таблица 1  
Характеристики вентильных разрядников переменного  
тока

ТИП	$U_{но}$ м, кВ	$U_{пр-},$ кВ	$U_{пр и},$ кВ	$U_{ост}$ , кВ не более, при импульсе тока с длиной фронта волны 8 мкс и амплитудой		
				3 кА	5 кА	10 кА
РВП-10	10	26-30	50	47	50	-
РВО-10	10	26-30,5	48	43	45	-
РВМ-10	10	25-30	25,5	28	30	33
РВЭ-25М	25	58-66	100	88	-	-
РВС-35	35	78-98	125	122	130	143
РВМ-35	35	75-90	116	97	105	116
РВС-110	110	200-250	285	315	335	367
РВМГ-110	110	170-195	260	245	265	295
РВМГ-220	220	340-390	515	475	515	570

блоков 5, каждый из которых зашунтирован высокоомными нелинейными резисторами. Последовательно с промежутками включены вилитовые диски 6 (7—8 шт.), образующие рабочее сопротивление разрядника. Диски и искровые промежутки сжаты пружиной 4. Центральное отверстие в верхней крышке служит для проверки герметичности разрядника после сборки.

Мгновенное значение напряжения, при котором происходит пробой искрового промежутка, зависит от скорости нарастания волны перенапряжения. Однако, как показала практика, пробивное напряжение импульса с фронтом волны более 50 мкс равно пробивному напряжению, определенному при синусоидальном напряжении с частотой 50 Гц.

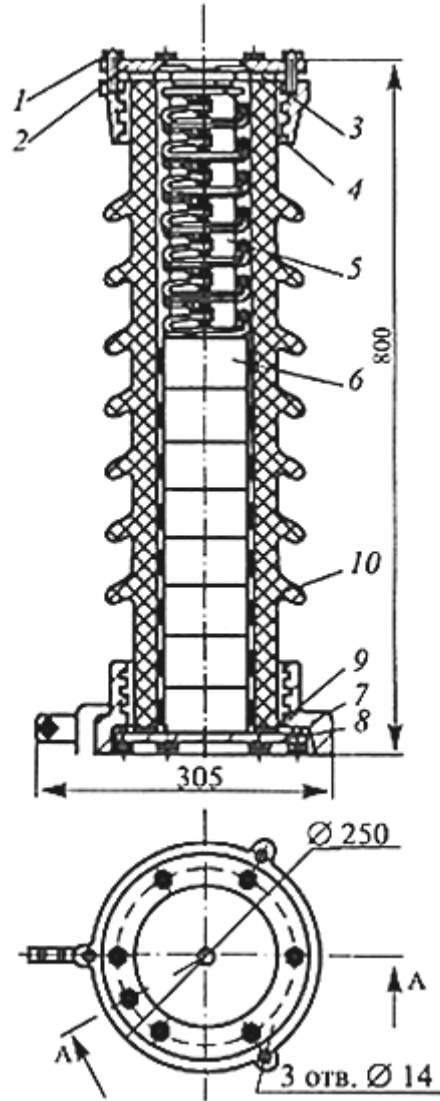


Рис.9. Конструкция вентильного разрядника РВЭ-25М

**Вентильные разрядники постоянного тока** предназначены для защиты от перенапряжений оборудования постоянного тока тяговых подстанций и ЭПС. В условных обозначениях разрядников буквы означают :

- Р – разрядник;
- Б – вентильный;
- М - магнитный (с магнитным гашением дуги);
- П – поляризованный;
- У – униполярный;
- Б - биполярный;
- К -для ограничения коммутационных перенапряжений.

Цифры означают класс напряжения разрядника в киловольтах.

На каждом фидере тяговых подстанций постоянного тока и постов секционирования для защиты их оборудования от волн перенапряжений, набегающих со стороны контактной сети, устанавливаются вентильные разрядники постоянного тока типа РМБВ-3,3 или РМВУ-3,3. Эти разрядники состоят из двух искровых промежутков и двух вилитовых дисков. Для магнитного гашения применяются постоянные магниты. Разрядники РМВУ-3,3 применяются также для защиты оборудования ЭПС постоянного тока от волн атмосферных перенапряжений. Эти разрядники разбиты на 2 группы: А - для применения на ЭПС (окрашены в коричневый цвет), Б - на тяговых подстанциях (окрашены в серый цвет). Искровые промежутки разрядников типа РВМУ находятся в их нижней части и дуга выдувается только вверх.

Для защиты от близких атмосферных разрядов и мощных коммутационных перенапряжений на шинах постоянного тока тяговых подстанций устанавливаются вентильные разрядники типа РВПК-3,3 или РВБК-3,3, различающиеся системами дугогашения. В разряднике РВПК-3,3 используются для дугогашения постоянные магниты, а в разряднике РВБК- 3,3 - катушка магнитного дутья. Эти разрядники состоят из четырех искровых промежутков и четырех тервитовых дисков. Разрядник РВПК-3,3, модернизированный для наружной установки - РВПКН-3,3 устанавливается на крыше ЭПС для защиты его оборудования от коммутационных перенапряжений.

Для защиты от перенапряжений полупроводниковых преобразователей агрегатов тяговых подстанций применяют разрядники РВБК-3,3. Для защиты оборудования ЭПС, а также анодных цепей выпрямительных и инверторных преобразовательных агрегатов тяговых подстанций применяют также разрядники типа РВКУ-3,3 (со схемой гашения дуги рис.5). Характеристики вентильных разрядников постоянного тока приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Характеристики вентильных разрядников постоянного тока

ТИП	$U_{ном}$ , кВ	$U_{пр-}$ , кВ	$U_{пр и}$ , кВ	$U_{ост}$ , кВ не более, при импульсном токе	
				1 кА	3 кА
РМБВ-3,3	3,3	7,5-10,5	12,5-14,5	10,5	12
РВМУ-3,3	3,3	9,5-13	12,5-14,5	10,5	12
РВПК-3,3	3,3	7,5-8,5	-	-	8-9
РВПКН-3,3	3,3	7,5-8,5	9	8-9	-
РВБК-3,3	3,3	7,5-8,5	9	-	9
РВКУ-3,3	3,3	5,7-6	7,5-8	8,5	10
РВБК-3,3	3,3	8-9	-	-	7,5

На рис 10 изображена конструкция вентильного разрядника РМВУ-3,3, применяемого на ЭПС постоянного тока

Разрядник РМВУ-3,3 (рис.10) состоит из фарфорового корпуса 1, двух искровых промежутков 6, двух дисков нелинейного сопротивления 4, сжатых совместно с искровыми промежутками и магнитами 7 пружиной 3. Герметичность разрядника обеспечивается кольцевыми прокладками 2, изготовленными из озоностойкой и морозоустойчивой резины. Фетровые прокладки 5 на дисках нелинейного резистора предохраняют от горизонтального их перемещения. Клапан 8 служит для предохранения от взрыва фарфорового корпуса при повреждении разрядника. Предохранительный клапан срабатывает при превышении давления внутри корпуса 5 кг/см<sup>2</sup>.

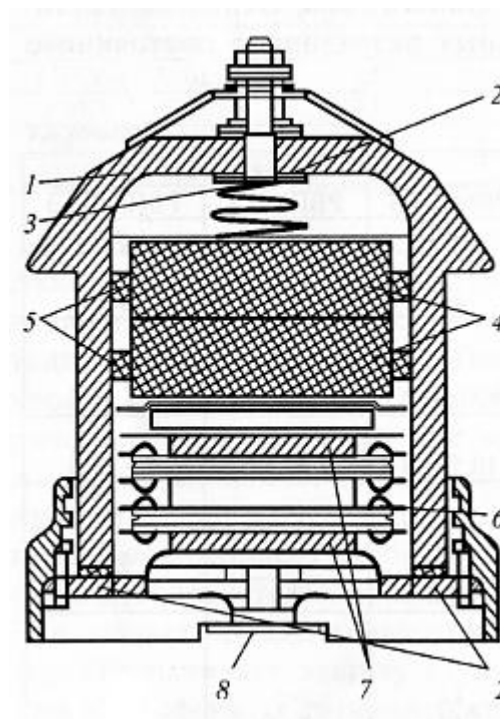


Рис. 4.10. Конструкция разрядника РМВУ-3.3

Основные недостатки вентильных разрядников связаны с наличием в них искровых промежутков. На пробивное напряжение ( $U_{пр}$ ) этих промежутков оказывают влияние многие факторы: температура, влажность, давление, скорость нарастания напряжения и др., т.е.  $U_{пр}$  нестабильно. Искровые промежутки пробиваются не мгновенно, для формирования в них каналов пробоя (разряда) необходимо время ( $\approx 10$  мкс). Следовательно, они обладают определенной инерционностью, поэтому в условиях воздействия импульсов с малым временем фронта (1-3 мкс) это может привести к тому, что искровые промежутки не успеют пробиться и импульс перенапряжения пройдет на защищаемый разрядником объект. Кроме того, при пробоях искровых промежутков в них возникает дуга, которую

необходимо надежно и быстро погасить после отвода на землю импульсов перенапряжений. Это является сложной задачей.

Применяемые в вентильных разрядниках варисторы: вилит и тервит, обладают сравнительно малой нелинейностью ( $\beta = 3-6$ ). Поэтому при протекания импульсных токов на них создается достаточно большая величина остающегося напряжения ( $U_{ост}$ ), что осложняет защиту объектов (см. разделы 2 и 3).

## 5. ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫЕ (ОПН)

Чтобы значительно улучшить защитные характеристики разрядников и отказаться от искровых промежутков, необходимы резисторы из материалов с высоконелинейной вольтамперной характеристикой и достаточной пропускной способностью. Такие материалы позволяют, отказавшись от искровых промежутков, обеспечить глубокое ограничение перенапряжений, улучшить массогабаритные показатели защитных аппаратов, существенно сэкономить фарфор, алюминиевое литье, прокат черных и цветных металлов. Кроме того, такие ограничители перенапряжений позволяют значительно удешевить изоляцию защищаемого электрооборудования. В этом случае изоляцию рассчитывают на то напряжение, которое будет возможно с учетом его ограничения. Такой принцип выбора изоляции называют координацией изоляции.

По перечисленным выше причинам в ряде стран (США, Япония, Россия) были проведены работы по созданию принципиально новых аппаратов с применением высоконелинейных материалов на основе окиси цинка с примесью окислов других металлов ( $\beta = 20 - 100$ ). Такие резисторы получили название оксидно-цинковых резисторов (ОЦР). Аппараты глубокого ограничения перенапряжений с высоконелинейными оксидноцинковыми резисторами получили название ОПН — ограничители перенапряжений нелинейные. Они широко применяются для защиты контактной сети и оборудования ЭПС. Уровень ограничения грозовых

перенапряжений составляет  $(2,2—2,4)U_{\phi}$  в сетях 110 кВ и снижается до  $2U_{\phi}$  для линий электропередачи 750 кВ.

Вольтамперная характеристика нелинейного резистора на основе ZnO изображена на рис.2 (см. раздел 1).

Значительное сопротивление оксидно-цинковых резисторов (варисторов) при рабочих напряжениях ( $U_{раб}$ ) (участок 1 вольтамперной характеристики – рис.2) и стабильная величина  $U_n$  позволяет подключать эти варисторы непосредственно к линии без искровых промежутков.

ОЦР в виде дисков соединяют последовательно и собирают в колонки на нужные напряжения. Колонки в ОПН могут соединяться и параллельно. Число последовательно-параллельных цепей ОЦР выбирают таким, чтобы ток утечки, протекающий под действием  $U_{раб}$  через каждый варистор не превышал 1,5 мА. При превышении этой величины нарушается тепловой режим, что приведет в конечном итоге к тепловому пробоему варистора. Число параллельных колонок варисторов в ОПН варьируется от 4 в ограничителях на 110 кВ до 30 в ограничителях на 750 кВ.

При превышении импульсом перенапряжения величины порогового напряжения ОПН сопротивления его варисторов почти мгновенно (в среднем за 2 мкс) резко уменьшаются (участок 2 рис.2) и через них на землю под действием импульса протекает импульсный ток, создающий на малом остающемся сопротивлении варисторов остающееся напряжение  $U_{ост}$ . Максимальные величины этих напряжений  $U_{ост}$  у ОПН меньше чем у вентильных разрядников, т.е. уровень ограничения у ОПН более глубокий по сравнению с вентильными разрядниками.

После прохождения импульса напряжения напряжение на ОПН уменьшается до  $U_{раб}$ , сопротивления его варисторов также быстро (примерно за 2 мкс) резко увеличиваются и это возросшее сопротивление прерывает сопровождающий ток.

В связи с отсутствием искровых промежутков разряда и дуги в ОПН в отличие от вентильных разрядников не возникает. Из-за отсутствия разряда ОПН и назвали ограничителями.

В качестве примера конструкции ОПН на рис.11 показан ограничитель перенапряжений ОПН-25, выпускаемый заводом

«Пролетарий», применяемый для защиты ЭПС взамен вентильных разрядников РВЭ-25М.

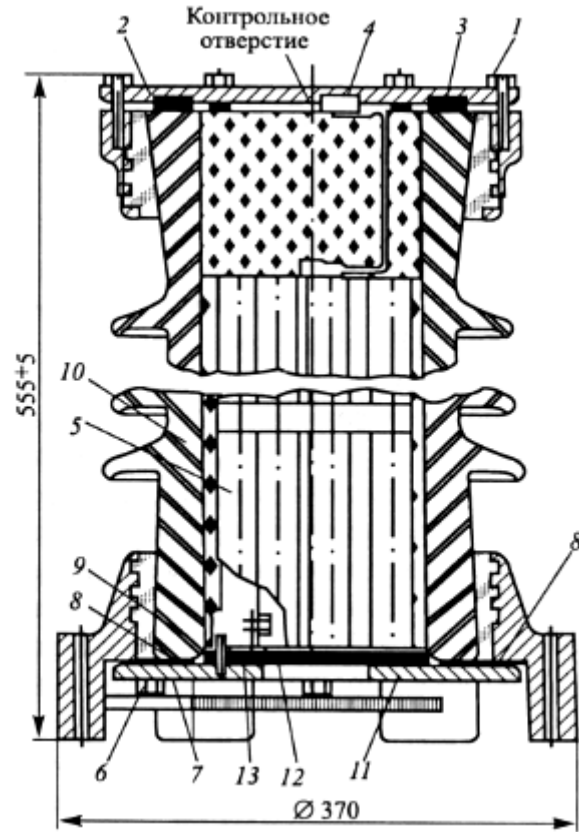


Рис.11. Ограничитель перенапряжений нелинейный ОПН-25: 1, 6, 9 - болты; 2- верхняя крышка; 3, 8, 13 - резиновая уплотнительная прокладка; 4 - гайка; 5 - блок нелинейных резисторов; 7 - днище; 10 - фарфоровый кожух; 11 – кольцо; 12 - мембрана

Пропускная способность ОЦР определяется амплитудой волны тока заданной формы, которую резисторы многократно выдерживают без пробоя, перекрытия по боковой поверхности или резкого изменения вольтамперной характеристики.

Таблица 3

Основные технические данные ограничителей перенапряжения

Тип ограничителя	Тип заменяемого разрядника	Вид электроподвижного состава	Назначение ограничителя	Технические параметры ограничителя		
				Номинальное рабочее напряжение, кВ	Максимальное рабочее напряжение, кВ	Остающееся напряжение при импульсном токе 8/20 мкс амплитудой 1000 А, кВ
ОПН-25М	РВЭ-25М	Электропоезда переменного тока	Защита от атмосферных и коммутационных перенапряжений	25	29	76
ОПН-25ЭП	РВЭ-25М	Электропоезда переменного тока			30	95 (при токе 5 кА)
					29 ±3	

Количество воздействий, которые резистор должен выдерживать без повреждений, гарантируется заводом-

изготовителем и устанавливает ресурс пропускной способности. Например, при коротких импульсах 8/20 мкс (длительность фронта 8 мкс, длительность импульса 20 мкс), характерных для атмосферных перенапряжений, резисторы выдерживают не менее 20 раз ток с амплитудой не менее 3 кА.

На электрических железных дорогах происходит замена вентильных разрядников на ОПН. В табл.3 приведены параметры ОПН, заменяющих вентильные разрядники на ЭПС переменного тока

Высоконелинейные ОЦР подобно другим полупроводниковым и изоляционным материалам подвержены старению. Скорость старения таких материалов определяется приложенным напряжением, температурой материала и его внутренней структурой. Опыт показал, что ток через ОЦР в течение времени, равного 80 % и более от срока жизни аппарата, изменяется очень мало, а в конце срока жизни рост тока заметно ускоряется. Отсюда можно сделать вывод, что периодический контроль тока через резистор ограничителя при рабочем напряжении является эффективным средством контроля срока жизни защитного аппарата. Расчетный срок службы оксидно-цинкового ограничителя перенапряжений составляет 10 лет.

При измерениях тока проводимости за его величиной наблюдают в течение 5 мин, фиксируя начальное и конечное значение тока утечки. Периодичность контроля 1 раз в 3—6 месяцев. Если при очередном измерении при рабочем напряжении ток через одну колонку оказывается значительно меньше, чем 0,3 мА, то можно с уверенностью продолжить эксплуатацию аппарата, по меньшей мере, еще в течение полугода. Если же значение измеренного тока приблизилось к 0,3 мА на одну колонку, то необходимо заменить данную фазу аппарата. Для ОПН-25 ток проводимости, измеренный при напряжении 29 кВ, не должен превышать 2,1 мА.

Подробнее об испытаниях вентильных разрядников и ограничителей перенапряжений изложено в приложении к данному учебному пособию.

## 6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ВАРИСТОРОВ»

### 6.1. Цель работы

Определение коэффициентов нелинейности варисторов.

### 6.2. Краткие теоретические сведения

Сведения о материалах и технологии изготовления варисторов различных типов приведены в разделе 1 данного учебного пособия, а в разделах 2-4 даны сведения об особенностях их применения в качестве рабочих нелинейных сопротивлений в вентильных разрядниках и ОПН.

### 6.3. Экспериментальная часть работы

Схема лабораторной установки для определения коэффициентов нелинейности варисторов приведена на рис.12

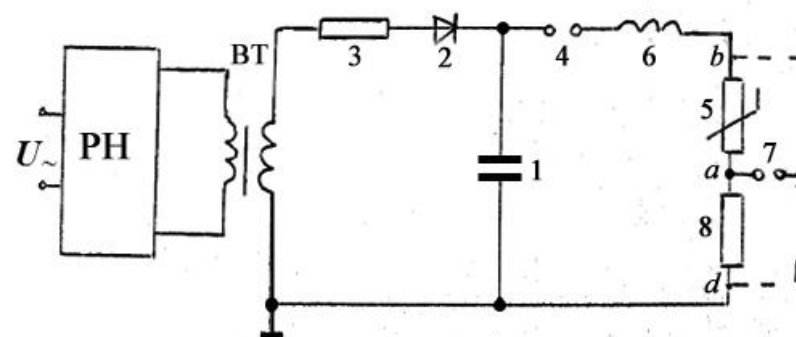


Рис.12. Схема лабораторной установки

Батарея конденсаторов (1) через высоковольтный диод (2) и резистор (3), ограничивающий зарядный ток, заряжается выпрямленным током от высоковольтного трансформатора (ВТ) с регулятором напряжения (РН). В момент времени, когда напряжение батареи конденсаторов становится равным пробивному напряжению искомого промежутка (4), последний пробивается, и батарея конденсаторов разряжается через варистор (5) и образцовый резистор (8) с известной величиной сопротивления  $R_0$ .

На рис.13 показано как происходит формирование импульса тока  $i$  на элементах (5) и (8) при разряде батареи конденсаторов (1).

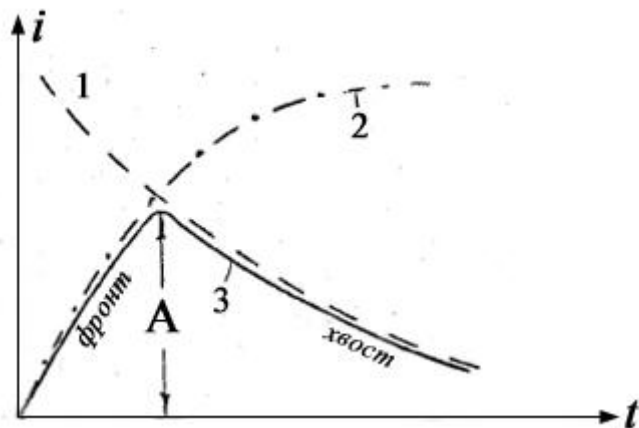


Рис. 13. Формирование выходного импульса

На этом рисунке:

кривая 1 - разрядный ток конденсаторов, который имел бы место при полном отсутствии индуктивности в схеме установки;

кривая 2 - кривая нарастания тока через индуктивность (6);

кривая 3 - огибающая кривых 1 и 2 - генерируемый импульс.

Амплитуда ( $A$ ) генерируемого импульса может быть изменена путем регулирования величины зазора искрового промежутка (4 на рис.12). Фронт импульса формируется с помощью катушки индуктивности (6), а хвост импульса - за счет разряда батареи конденсаторов (1).

Определение амплитудного значения напряжения и тока, протекающего через варистор (5) при импульсе, производится с помощью измерительного шарового разрядника (7), снабженного микрометром. Искровой промежуток этого разрядника при измерении искомого напряжения следует отрегулировать так, чтобы его пробой производился примерно

половиной (50 %) измеряемых импульсов (за пробивное импульсное напряжение при испытаниях высоковольтного оборудования принимают амплитуду таких импульсов, каждый второй из которых приводит к пробое). При синхронном пробое искровых промежутков (4) и (7) измеряемое разрядником (7) напряжение может оказаться как равным, так и меньшим амплитудного значения измеряемого напряжения.

После измерения микрометром зазора искрового промежутка шарового разрядника (7) по известной кривой зависимости его амплитудного пробивного напряжения, от величины зазора  $U_p = f(a)$  определяется амплитудное значение искомого напряжения.

Один из зажимов измерительного шарового разрядника прикреплен к изоляционной штанге, с помощью которой его можно подключить сначала к варистору (точка  $a$  и  $b$ ), а затем и к образцовому резистору (точки  $a$  и  $d$ )

Амплитудное значение импульса тока  $i$ , протекающего через варистор (5) и образцовый резистор (8), определяется по формуле:

$$i = \frac{U_0}{R_0}. \quad (10)$$

Амплитудное значение напряжения ( $U_0$ ) на образцовом резисторе и на варисторе определяется с помощью шарового измерительного разрядника при различных амплитудах ( $A$ ) генерируемых импульсов. Амплитуда  $A$  импульсов изменяется путем регулирования величины зазора искомого промежутка (4). Для повышения точности измерений рекомендуется освещать ультрафиолетовыми лучами искровой промежуток измерительного шарового разрядника (7).

### 6.3.2. Порядок выполнения работы

6.3.2.1. Ознакомиться со схемой установки и её монтажным исполнением.

6.3.2.2. Включить кварцевую лампу.

6.3.2.3. Установить по указанию преподавателя величину зазора искрового промежутка (4).

6.3.2.4. Нажать кнопку "ПУСК" автоматического

пускателя и с помощью автотрансформатора плавно повышать напряжение до первого пробоя зазора искрового промежутка (4).

6.3.2.5 Изменяя величину напряжения с помощью автотрансформатора, установить частоту следования разрядов - один в 1 - 2 с.

6.3.2.6. Подключая шаровой измерительный разрядник (7) к точкам "a" и "b", а затем "a" и "d" устанавливать величину зазора его искрового промежутка такой, чтобы при 100 % пробое искрового промежутка (4) происходило примерно 50 % пробоев промежутка (7).

6.3.2.7. Изменяя величину искрового промежутка (7) при подключении к образцовому резистору  $a_0$  и варистору  $a_B$ , по кривой  $U_p = f(a)$  определить значения напряжения  $U_0$  и  $U_B$ .

6.3.2.8. Повторить измерения для 3-4 значений амплитуды (A) импульсов. Амплитуды (A) устанавливать по указанию преподавателя.

6.3.2.9. Результаты измерений и подсчетов свести в табл.4.

Таблица 4

Результаты эксперимента и расчета

Тип варистора	$a_B$ , мм	$a_0$ , мм	$U_B$ , кВ	$U_0$ , кВ	$i$ , кА

6.3.2.10. На основании полученных данных построить вольтамперную характеристику испытуемого варистора.

6.3.2.11. Выбрав на нелинейном участке вольтамперной характеристики две соседние точки "k" и "i", определить коэффициент нелинейности ( $\alpha$ ) варистора и его постоянную "C", согласно выражениям:

$$\alpha = \frac{\lg \frac{U_k}{U_i}}{\lg \frac{i_k}{i_i}}, \quad (11)$$

$$C = \frac{U_k}{i_k^\alpha}, \quad (12)$$

где  $U_k, U_i, i_k, i_i$ , - значения напряжения и токов, соответствующие выбранным точкам "k" и "i", вольтамперной характеристики.

6.3.2.12. На основании равенства (9) (подраздел 2.2) для заданных преподавателем величин  $Z_1, Z_2$ , форме и амплитуде импульса перенапряжения на вентильном разряднике построить согласно рис.8 с использованием снятой вольтамперной характеристики варистора кривую остающегося на нем напряжения  $U_{ост}$ . По построенной кривой определить  $U_{ост m}$  /- уровень ограничения перенапряжения разрядником с испытанным типом варистора.

6.3.2.13. Определить по формуле (3) коэффициент защиты разрядника  $K_{защ}$  с испытанным типом варистора. Величины  $U_\phi$  и  $K_c$  задаются преподавателем.

## 6.4. Контрольные вопросы

6.4.1. Что означает термин варистор?

6.4.2. На базе каких материалов изготавливают основные типы варисторов?

6.4.3. Какие процессы происходят в структуре варисторов при изменении величины приложенного к ним напряжения?

6.4.4. Изобразите в одних координатных осях примерный вид вольтамперных характеристик варисторов различных типов.

6.4.5. Какие функции выполняют варисторы в вентильных разрядниках и ОПН?

6.4.6. Как формируются импульсы в лабораторной установке для исследования свойств варисторов?

6.4.7. Как определяются ток и напряжение на испытуемых варисторах при различных амплитудах генерируемых импульсов?



## ПРИЛОЖЕНИЕ ИСПЫТАНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ РАЗРЯДНИКОВ И ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

В процессе эксплуатации разрядники, ограничители перенапряжений и нелинейные резисторы периодически осматривают и подвергают профилактическим испытаниям. Такие испытания устройств проводят перед монтажом, при проведении технического ремонта и ежегодно перед началом грозового сезона. Испытания выполняют с использованием высоковольтного оборудования испытательной станции (проект ПКБ ЦТ МПС А.297), которое содержит три испытательные цепи: 0... 12,5 кВ переменного тока; 0... 100 кВ переменного тока; 0... 30 кВ постоянного тока. Контролируемый объект подключают к источнику высокого напряжения на испытательном поле. В депо Горький-Московский Горьковской дороги вентиляльные разрядники испытывают групповым методом, располагая их по кругу до 10 штук. В центре испытательной площадки установлен полый опорный изолятор, внутри которого расположен маломощный двигатель переменного тока СД-1,2 с редуктором. Вал редуктора соединен изолированной штангой с контактным устройством, к которому присоединен гибкий провод от зажима высоковольтной шины испытательной станции. Приводной двигатель запитывается от разделительного трансформатора напряжением 220/127 В. Включение и реверсирование двигателя выполняют с пульта управления станции.

В ходе проверки разрядников измеряют сопротивление вентильного разрядника, ток проводимости (ток утечки) и пробивное напряжение при промышленной частоте 50 Гц. Сопротивление вентильного разрядника измеряют мегаомметром на напряжение 2500 В. Оно не должно отличаться более чем на 30... 50 % от паспортной величины.

Ток проводимости проверяют при выпрямленном напряжении 28 кВ и температуре 20°C по схеме, приведенной на рис.П1. Величина пульсаций выпрямленного напряжения должна быть не более 10 %. Выпрямленное напряжение грубо устанавливают киловольтметром, измеряют точно с помощью

микроамперметра и добавочного резистора с нелинейным сопротивлением. Разрядник годен к эксплуатации, если ток проводимости составляет не менее 300 и не более 600 мкА при выпрямленном напряжении 28 кВ.

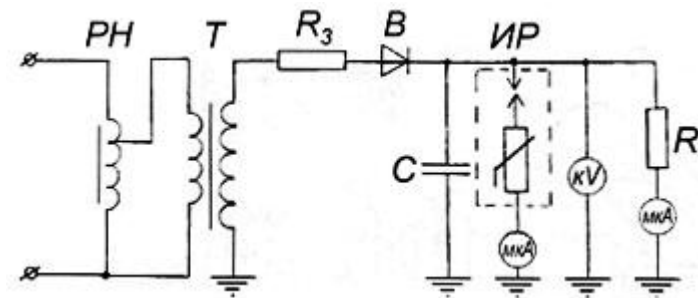


Рис.П1. Схема измерения тока проводимости разрядника РВЭ-25М

Снижение тока проводимости может быть вызвано поломкой шунтирующих резисторов. Повышение тока проводимости является признаком потери герметичности разрядника и увлажнения его внутренних элементов.

Пробивное напряжение вентильных разрядников на переменном токе частотой 50 Гц определяют, плавно повышая напряжение на нем до пробоя. Время подъема напряжения не должно превышать 0,5 с во избежание недопустимого перегрева шунтирующих резисторов внутри разрядника.

Пробивное напряжение является одним из основных параметров, обеспечивающих надежную и продолжительную работу разрядников. Его определяют делением величины максимального напряжения пробоя на  $\sqrt{2}$ . Аппарат годен к эксплуатации, если пробивное напряжение составляет не менее 58 и не более 70 кВ.

На существующих испытательных станциях пробивное напряжение разрядников измеряют по схеме, приведенной на рис.П2. Схема содержит регулятор напряжения РНО-250-10, токоограничивающий резистор  $R_{огр}$ , высоковольтный

трансформатор НОМ-100/25, шаровой разрядник ШР и реле максимального тока РМТ.

Сначала шаровой разрядник ШР устанавливают на низший допустимый предел пробивного напряжения и, повышая напряжение, убеждаются, что срабатывает ШР, а не ИР. Затем переводят ШР на высший предел пробивного напряжения и убеждаются в том, что срабатывает ИР и не срабатывает ШР. Таким образом определяют, находится ли пробивное напряжение в заданных пределах.

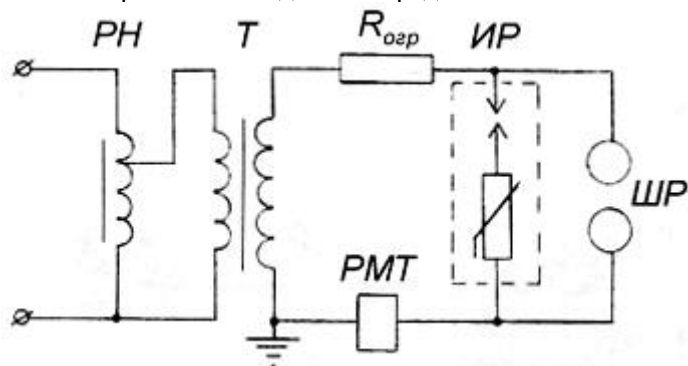


Рис.П2. Типовая схема для измерения пробивного напряжения с использованием шаровых разрядников

Недостатком данной схемы является низкая точность измерения пробивного напряжения из-за отклонения расстояний между шарами (погрешность при установке на 1 мм приводит к погрешности измерения более 3 кВ). Кроме того, приходится корректировать величину пробивного напряжения в зависимости от давления, температуры и влажности окружающей среды, поскольку пробивное напряжение ШР зависит от этих факторов.

В данной схеме необходимо дважды проводить проверки. Кроме того, неизвестно истинное значение пробивного напряжения. Ручное управление регулятором напряжения не дает стабильности результатов испытаний.

Чтобы автоматизировать испытания разрядников и получать истинную величину пробивного напряжения разрядников, в депо Горький-Московский используют

электронную установку, разработанную учеными и специалистами Нижегородского филиала РГОТУПС. Она выполнена на бесконтактных полупроводниковых элементах, позволяет автоматически повышать напряжение не более чем за 0,5 с и отключать ток пробоя разрядника за 0,02 с. Блок-схема установки представлена на рис.П3.

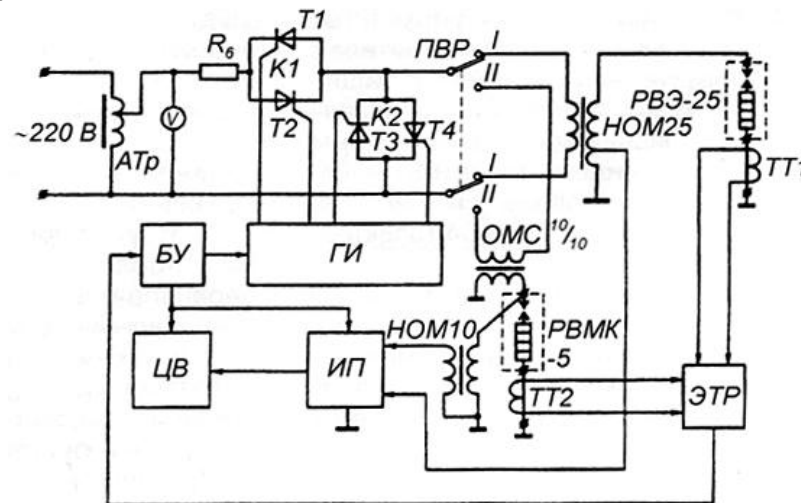


Рис.П3. Блок-схема установки для испытания на пробой вентильных разрядников с двумя тиристорными ключами

В нее входят последовательный К1 и параллельный К2 тиристорные ключи, генератор импульсов ГИ и блок управления тиристорами, переключатель вентильных разрядников ПВР, электронное токовое реле ЭТР, импульсный преобразователь и цифровой вольтметр ЦВ. Регулятор напряжения состоит из встречно-параллельно включенных тиристоров Т1, Т2 (последовательный ключ) и Т3, Т4 (параллельный ключ). Через балластный резистор R<sub>6</sub> 2,2 Ом они подсоединены к автотрансформатору АТР.

Выходное напряжение через переключатель ПВР поступает на обмотки высоковольтных трансформаторов НОМ 100/25 или ОМС 10/10, которые входят в комплект испытательной станции. Блок управления БУ служит для подачи управляющих сигналов на отдельные узлы устройства.

После запуска БУ подает разрешающий сигнал на вход генератора импульсов ГИ. Последний вырабатывает сигналы управления тиристорами Т1 и Т2 последовательного ключа в начале каждого полупериода питающего напряжения.

Тиристоры Т3 и Т4 параллельного ключа открываются с некоторым запаздыванием относительно момента открытия ключей Т1 и Т2. Это отставание плавно увеличивается от полупериода к полупериоду. Такой алгоритм управления тиристорами приводит к плавному увеличению напряжения на обмотках НН высоковольтных трансформаторов и сохранению синусоидальной формы кривой напряжения, прикладываемого к разряднику.

При пробое разрядника РВЭ-25 ток в первичной обмотке измерительного трансформатора тока резко возрастает. Блок управления воспринимает сигнал «пробой» с выхода электронного токового реле ЭТР и отключает генератор импульсов. Ключи К1 и К2 закрываются, и напряжение с обмотки НН высоковольтного трансформатора снимается. Одновременно БУ подает команду измерительному преобразователю ИП и цифровому вольтметру ЦВ измерить напряжение пробоя. Установка подключается к оборудованию испытательной станции с помощью пакетных переключателей и штепсельных разъемов.

В депо Горький-Сортировочный внедрено устройство для испытания разрядников (рис.П4). В качестве регулятора напряжения на обмотке НН высоковольтного трансформатора используется тиристорный регулятор из двух встречно-параллельно включенных тиристоров Т1 и Т2. Выходное напряжение изменяется за счет изменения угла регулирования, которое осуществляется БУ.

Блок БУ управляет работой генератора импульсов ГИ. Для улучшения формы кривой напряжения на обмотке НН высоковольтного трансформатора ВТ используется фильтр L-C. Устройство работает аналогично описанному ранее.

Данная установка позволяет плавно повышать напряжение на разряднике от нуля до максимального за 0,5 с с высокой стабильностью. Время отключения установки в случае пробоя составляет 0,02 с. Ток пробоя разрядника ограничива-

ется до 1 А. Коэффициент несинусоидальности напряжения регулятора составляет не более 10 %.

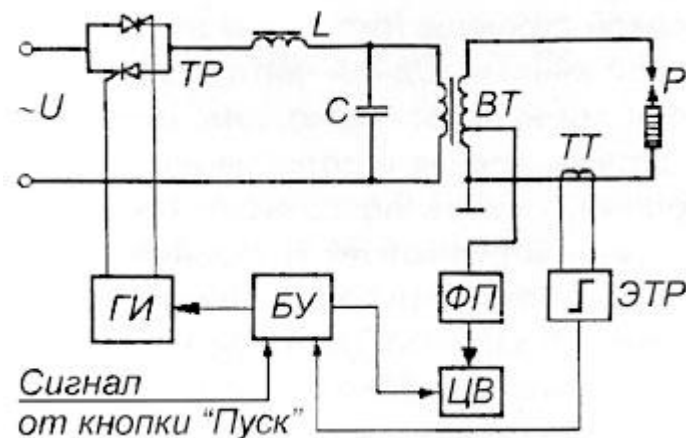


Рис.П4. Схема устройства для испытания разрядников с одним тиристорным ключом

При проведении профилактических испытаний проверяют электрические параметры варисторов ВНКС-25М, подключая их к источнику постоянного напряжения. Контакты в электрической цепи проверяют пропусканием тока через нелинейные элементы при постоянном напряжении 500 В. В данном случае ток должен быть не менее 1,5 мкА. Допускается ток утечки 20... 30 мА при температуре  $25 \pm 5$  °С и напряжении постоянного тока 15 кВ.

При постоянных напряжениях 12 и 15 кВ контролируют токи утечки, на основе которых рассчитывают коэффициент нелинейности. Токи утечки имеют разброс и нелинейно зависят от величины приложенного напряжения (рис.П5). Значение тока утечки при напряжении 15 кВ допускается в пределах 18... 33 мА, напряжении 12 кВ - 1... 12 мА. Коэффициент нелинейности при этом должен быть в пределах 0,18... 0,275.

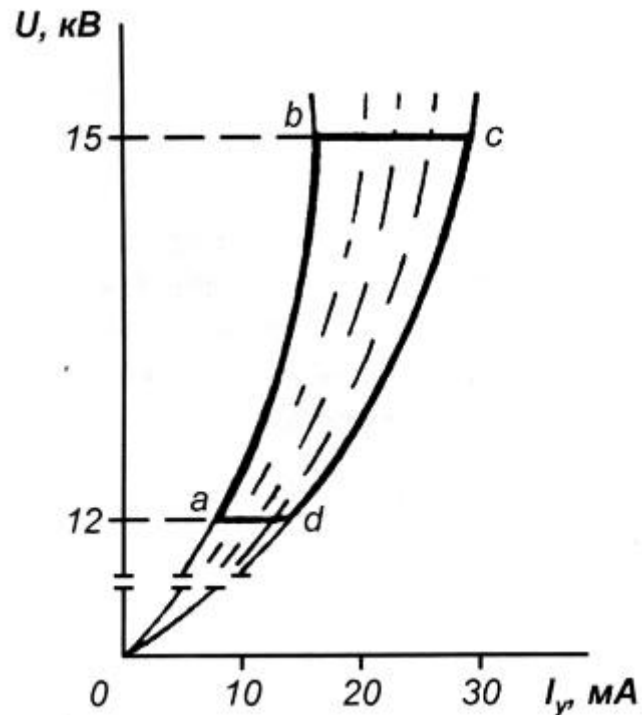


Рис.П5. Токи утечки нелинейного резистора

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Проводниковые, полупроводниковые и магнитные материалы: Учебное пособие для вузов ж.д. транспорта. – М.: ГОУ, 2008. - 372 с.
2. Егоров В.В. Техника высоких напряжений. Перенапряжения в устройствах электрической тяги, профилактические испытания изоляции: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. - М.: Маршрут, 2004. – 188с.
3. Касаткин Г.С. Исследование характеристик вентильного разрядника: Методические указания к лабораторной работе. - М.: МИИТ, 1993. – 28с.
4. Серебряков А.С., Гут В.А. Больше внимания защите от перенапряжений // Локомотив. - 2004. - № 6. - с. 31-35.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Материалы и технология изготовления варисторов .....	3
2. Принцип работы вентильных разрядников и их основные характеристики .....	6
3. Определение уровня ограничения перенапряжения вентильным разрядником .....	11
4. Основные типы вентильных разрядников, используемых для защиты устройств электрической тяги .....	15
5. Ограничители перенапряжения нелинейные (опн) .....	21
6. лабораторная работа «исследование свойств различных типов варисторов .....	26
Приложение. Испытания вентильных разрядников и ограничителей перенапряжений.....	31
Список литературы .....	38