

УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ОТ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВАКУУМНОГО УПРАВЛЯЕМОГО РАЗРЯДНИКА

© 2011 г. Д. Ф. Алферов, Д. В. Евсин, В. П. Иванов, В. А. Сидоров

*Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина
Россия, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12*

Поступила в редакцию 02.07.2010 г.
После доработки 26.08.2010 г.

Предложена схема автоматического устройства защиты на основе вакуумного управляемого разрядника с временем срабатывания < 1 мкс. Приводятся результаты исследования пусковых и коммутационных характеристик такого устройства. Высокая коммутационная способность устройства обеспечивается способностью разрядника многократно пропускать импульсные токи амплитудой до сотен килоампер, длительностью до сотен микросекунд и ток промышленной частоты до десятков килоампер в течение нескольких периодов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Надежная работа электротехнического оборудования обеспечивается при условии ограничения электрических воздействий на это оборудование до допустимых значений. В значительной степени эти ограничения обеспечиваются за счет специальных защитных аппаратов. Одним из опасных видов электрического воздействия являются импульсные перенапряжения, возникающие при воздействии грозового импульса или мощного электромагнитного излучения.

Для защиты от перенапряжений обычно применяются шунтирующие быстродействующие устройства. В качестве таких устройств используются газонаполненные защитные разрядники [1]. Однако искровые промежутки имеют значительное время деионизации и большие потери при пропускании разрядного тока. Кроме того, они не способны длительно (>100 мкс) пропускать аварийный ток. Данное обстоятельство ограничивает срок службы разрядников и затягивает время подключения объекта к источнику после завершения аварийного режима. Недостатком таких устройств также является значительный разброс пробивных напряжений искровых промежутков и сравнительно большие значения остающегося напряжения.

В последнее время наряду с защитными разрядниками все более широкое применение находят ограничители перенапряжений (о.п.н.) без искровых промежутков. В качестве активного элемента в них используются новые материалы на основе окиси цинка, имеющие нелинейную вольт-амперную характеристику. Сильно нелинейной вольт-амперной характеристикой обладают также стабилитроны, стабилосторы и ограничительные диоды, которые применяются для ограничения

напряжения в длительном и импульсном режимах.

Однако для ограничения перенапряжения с большими амплитудами сопровождающего тока большой длительности приходится набирать большое количество параллельно-последовательно соединенных отдельных элементов, что приводит к увеличению тока утечки, к усложнению конструкции, большим габаритам и, соответственно, к высокой стоимости защитного устройства на основе о.п.н.

Альтернативным и более дешевым способом решения проблемы защиты от перенапряжений и токовой перегрузки электротехнического оборудования является использование быстродействующего защитного устройства на основе управляемых вакуумных разрядников.

Управляемый вакуумный разрядник (р.в.у.) представляет собой безнакальный трехэлектродный герметизированный прибор с давлением остаточных газов, не превышающим 10^{-4} Па. Электродная система р.в.у. содержит два основных и один управляющий электроды. Управляющий электрод устанавливается на одном из основных электродов и отделяется от него с помощью диэлектрической вставки, образуя тем самым поджигающий промежуток. Расстояние между основными электродами всегда фиксировано и определяется требуемой электрической прочностью вакуумного промежутка. Разрядник содержит также экранную систему, которая защищает внутренние стенки корпуса от металлизации продуктами эрозии основных электродов.

Включение р.в.у. осуществляется подачей пускового импульса напряжения на управляющий электрод. Импульс напряжения вызывает пробой по поверхности диэлектрической вставки между

управляющим и основным электродами и генерацию инициирующего искрового разряда. Плазма искрового разряда быстро заполняет основной вакуумный промежуток, разряд переходит из искровой стадии в дуговую стадию, и разрядник включается. Время и надежность включения р.в.у. в значительной степени определяется амплитудой тока импульса запуска и его длительностью.

Плазма вакуумной дуги с металлическими электродами способна пропускать большие токи между основными электродами без их существенного разрушения. Вакуумный дуговой разряд сам себя поддерживает и гаснет, когда ток в основной цепи падает до нуля. Вследствие быстрой деионизации плазмы и конденсации металлического пара на электродах вакуумный промежуток характеризуется высокой скоростью восстановления электрической прочности.

В настоящее время освоено производство разработанных в ВЭИ р.в.у. нескольких типов, предназначенных для коммутации мощных емкостных накопителей энергии в электрофизических установках, а также для электроразрядных и магнитно-импульсных технологий [2, 3]. Многолетний опыт эксплуатации р.в.у. показал, что они способны работать в широком диапазоне импульсных напряжений (1–50 кВ) и токов (0.1–300 кА). Во включенном состоянии падение напряжения на р.в.у. составляет 50–100 В, что позволяет существенно снизить уровень рассеиваемой энергии в разряднике при коммутации больших токов.

В работе [4] предложено устройство на основе комбинации р.в.у. и о.п.н. Устройство содержит р.в.у., соединенный последовательно с демпфирующим сопротивлением. Демпфирующее сопротивление состоит из параллельно соединенных нелинейного сопротивления (о.п.н.) и линейного сопротивления. Включение р.в.у. осуществляется с помощью блока запуска, который после подачи управляющего импульса выдает на управляющий электрод импульс поджига с заданными параметрами напряжения и тока. Такое устройство способно ограничивать перенапряжения с большими амплитудами сопровождающего тока большой длительности. Защитный уровень о.п.н. можно выбрать близким к номинальному напряжению сети. В результате рассеиваемая в о.п.н. энергия при протекании разрядного тока будет существенно меньше, чем в схеме его подключения без р.в.у. Параллельное соединение с нелинейным сопротивлением линейного также позволяет уменьшить выделяемую в нелинейном сопротивлении энергию. Однако наличие блока запуска в таком устройстве ограничивает минимальное время его срабатывания на уровне 10–15 мкс. Кроме того, требуется время на регистрацию возникновения перенапряжения и формирование импульса управления на блок запуска.

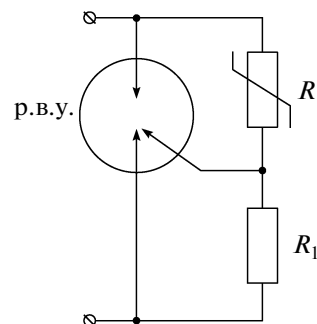


Рис. 1. Схема защитного устройства.

В данной работе предложена схема автоматического устройства защиты на основе р.в.у. с временем срабатывания < 1 мкс. Приводятся результаты исследования пусковых и коммутационных характеристик такого устройства.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Обеспечить малое время включения устройства (< 1 мкс), необходимое при крутых фронте и спаде импульсов напряжения, позволит автоматическое устройство защиты от импульсных перенапряжений. В таком устройстве параллельно р.в.у. подсоединена цепь в виде последовательно соединенных нелинейного сопротивления R и линейного сопротивления R_1 , а точка их соединения подсоединена к управляющему электроду разрядника (рис. 1). В качестве нелинейного сопротивления можно использовать о.п.н. или стабилитрон с $U_{огр} = U_{защ} \geq U_m$ ($U_{огр}$ – остающееся напряжение ограничения, $U_{защ}$ – напряжение защитного режима стабилитрона, U_m – амплитуда максимального рабочего напряжения сети).

При возникновении перенапряжения выше защитного уровня в первый момент времени цепь из нелинейного R и линейного R_1 сопротивлений ограничивает уровень напряжения на устройстве до величины $U_{огр}$ напряжения ограничения или напряжения стабилизации. В этом случае на управляющем электроде р.в.у. формируется импульс напряжения $U_y = R_1 i_R$, где i_R – ток в нелинейном сопротивлении.

Надежное включение р.в.у. осуществляется при выполнении неравенства $R_1 > U_{у\min} / i_{R\min}$, где $U_{у\min}$ – минимальное напряжение на управляющем электроде, при котором происходит включение р.в.у.; $i_{R\min}$ – значение тока в нелинейном сопротивлении ($i_{R\min} = I_{\min\text{ пер}}$) при минимальном переходном сопротивлении вольт-амперной характеристики о.п.н. (переход из области проводимости 2 (рис. 2) в область сопровождающего тока I). Ток в цепи управляющего электрода будет определяться вольт-секундной характеристикой нелинейно-

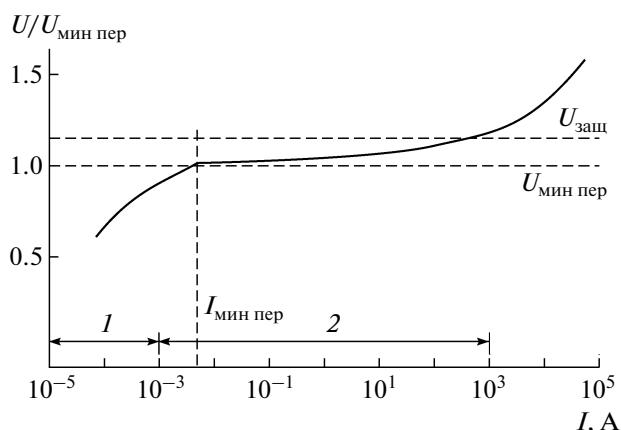


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики о.п.н.

го сопротивления, а его длительность – временем включения р.в.у.

Для исследования пусковых и коммутационных характеристик защитного устройства был изготовлен макетный образец, содержащий вакуумный разрядник РВУ-47 [3] и цепь из последовательно соединенных нелинейного сопротивления R (ОПН-КС 6/7.2) и линейного сопротивления R_1 (эта цепь подсоединена к р.в.у., как на рис. 1).

Исследования проводились на экспериментальном стенде, состоящем из высоковольтной и силовых частей (рис. 3). Высоковольтная часть стенда содержит накопительный конденсатор емкостью $C_1 = 0,4$ мкФ на максимальное напряжение 100 кВ, который заряжался до напряжения U_0 от высоковольтного трансформатора Tr через диод D и зарядное сопротивление $R_2 = 256$ кОм. Параллельно нелинейному сопротивлению в ряде опытов подсоединялся конденсатор емкостью $C_2 = 2,5$ –200 нФ. Высоковольтный импульс напряжения формировался на входе защитного устройства (R_1, R) после включения управляемого вакуумного разрядника P_1 при разряде емкости C_1 через сопротивление $R_3 = 500$ Ом. Максимальная амплитуда импульса напряжения

ограничивалась рабочим напряжением разрядника P_1 и составляла $U_0 = 30$ кВ.

Силовоточная часть стенда содержит зарядное устройство G , конденсаторную батарею C_0 емкостью 12.4 мФ на максимальное напряжение 3 кВ и реактор с регулируемой индуктивностью L_0 до 600 мкФ. Параллельно конденсаторам подсоединены диодные блоки D_1 для формирования униполярного импульса тока.

В течение эксперимента измерялись напряжения U на защитном устройстве и U_y на управляющем электроде р.в.у. с помощью омического делителя с коэффициентом деления 2990. Токи в цепи управляющего электрода (I_y) и через р.в.у. (I) измерялись с помощью поясов Роговского T_1 и T_2 с чувствительностью 115 А/В и 78 кА/В соответственно. Электрические сигналы регистрировались с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS3000В.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования характеристик защитного устройства проводились в два этапа. На первом этапе изучались уровень ограничения и пусковые характеристики устройства в зависимости от параметров цепи R_1 – R без подключения силовоточного стенда. На втором этапе измерялась коммутационная способность устройства при подключении силовоточного стенда. Все измерения проводились при $U_0 = 30$ кВ.

3.1. Пусковые характеристики защитного устройства

Уровень ограничения защитного устройства определяется типом о.п.н. и его частотными характеристиками. На рис. 4 показано изменение во времени напряжения на о.п.н. при приложении к нему импульса напряжения с амплитудой $U_0 = 30$ кВ и скоростью нарастания напряжения $dU/dt \approx 135$ кВ/мкс. Измерения выполнены при $R_1 = 0$ и отсутствии соединения с управляющим электродом р.в.у. Видно, что на фронте импульса

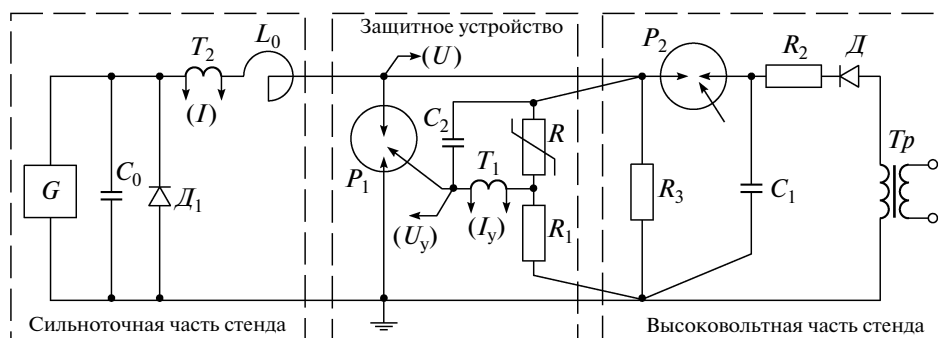


Рис. 3. Схема экспериментального стенда.

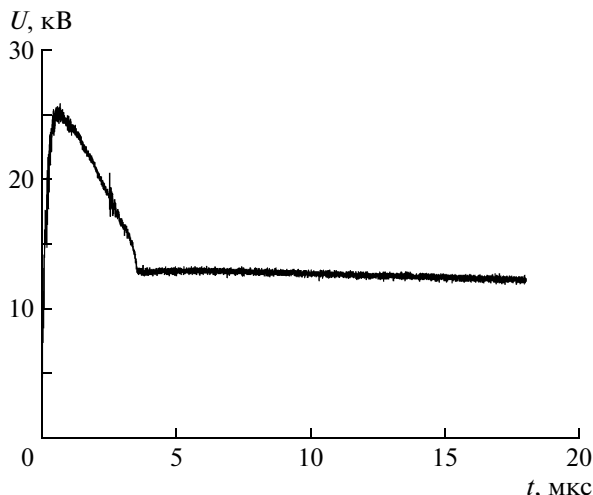


Рис. 4. Напряжение ограничения о.п.н. при $R_1 = 0$.

в течение 3.8 мкс наблюдается всплеск напряжения, ограниченный на уровне 25 кВ. Затем напряжение устанавливается на статическом уровне ограничения, определяемом типом о.п.н. Таким образом, напряжение $U_{огр}$ ограничения о.п.н. (и соответственно защитного устройства) при крутых фронте и спаде импульса воздействующего напряжения $dU/dt > 10$ кВ/мкс может значительно превышать статический уровень ограничения.

В случае, когда цепь R_1-R не присоединена к р.в.у., было измерено падение напряжения U_{R_1} на сопротивлении R_1 при различных его значениях: 7, 20, 40 и 76 Ом. Полученная зависимость U_{R_1} от R_1 представлена на рис. 5. Там же показана зависимость падения напряжения на о.п.н. U_R от R_1 . Согласно рис. 5 падение напряжения на сопротивлении R_1 для всех $R_1 > 7$ Ом превышает 5 кВ, что достаточно для пробоя узла поджига р.в.у. Падение напряжения на о.п.н. уменьшается с увеличением R_1 до уровня $U_{огр} \approx 17$ кВ.

В дальнейшем исследовались пусковые характеристики защитного устройства с подсоединенным управляющим электродом р.в.у. при $R_1 = 20$ Ом. Типичные осциллограммы воздействующего I и ограниченного U импульсов напряжения представлены на рис. 6.

Время включения $t_{вкл} = 180-210$ нс защитного устройства относительно начала импульса напряжения определялось моментом пробоя узла поджига р.в.у. Пробой узла поджига происходил при достижении напряжения $U_{R_1} \geq U_{y, мин} = 5$ кВ. После пробоя узла поджига в межэлектродном промежутке р.в.у. генерировался инициирующий разряд, ток I_y которого с амплитудой порядка 1 кА практически не зависел от сопротивления R_1 . Длительность протекания тока инициирующего

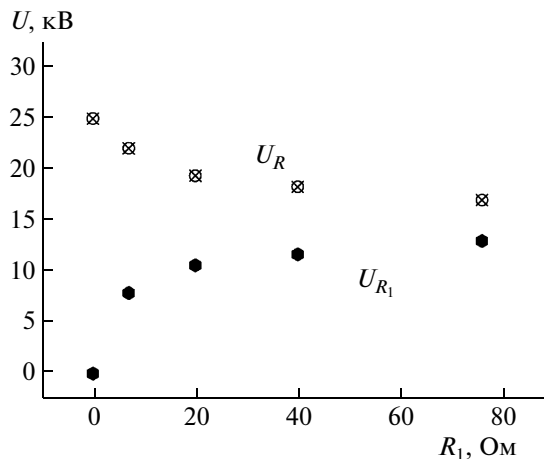


Рис. 5. Зависимости падения напряжения на сопротивлениях R и R_1 от величины сопротивления R_1 .

разряда $\Delta t \approx 0.5$ мкс ограничивалась временем включения р.в.у. (время заполнения межэлектродного промежутка плазмой инициирующего разряда), который шунтировал о.п.н.

3.2. Коммутационные характеристики защитного устройства

Коммутационные характеристики защитного устройства измерялись при подключении силовой части стенда (рис. 3) в двух режимах: в первом $L_0 \approx 2$ мкГн (индуктивность разрядного контура при закороченном реакторе) и во втором $L_0 = 178$ мкГн.

Осциллограммы тока I и напряжения U на защитном устройстве при зарядном напряжении $U_{C_0} = 2.8$ кВ на емкости C_0 для первого и второго

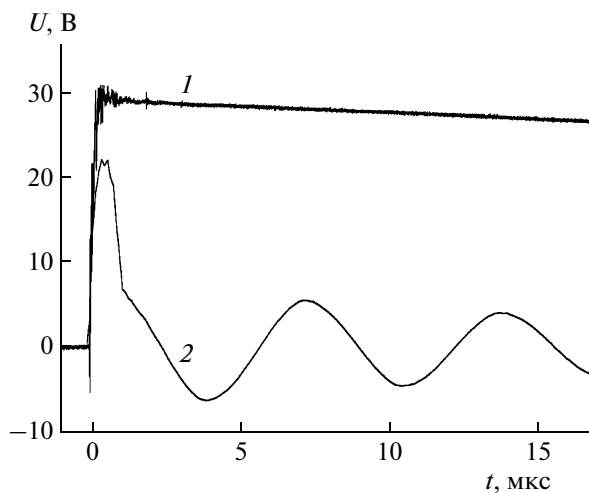


Рис. 6. Осциллограммы воздействующего (I) и ограниченного (U) импульсов напряжения.

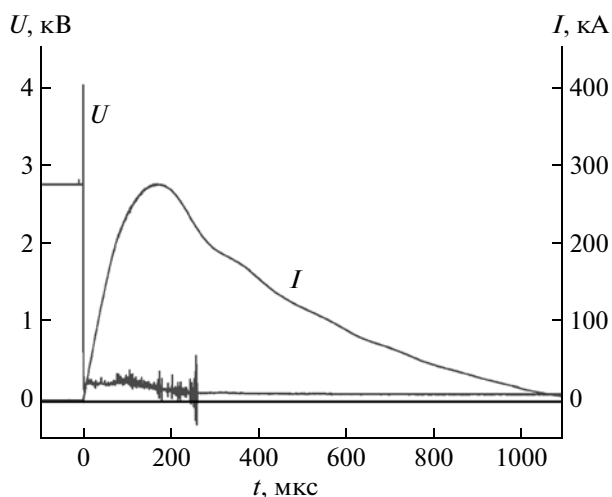


Рис. 7. Осциллограммы тока и напряжения на защитном устройстве при зарядном напряжении $U_{C_0} = 2.8$ кВ и $L_0 \approx 2$ мкГн (первый режим).

режимов представлены на рис. 7 и рис. 8 соответственно. Из осциллограмм следует, что защитное устройство способно пропускать токи с амплитудой порядка 300 кА и длительностью 1 мс и токи с амплитудой десятки килоампер и длительностью Δt более 10 мс на полувысоте импульса тока. При коммутации короткого импульса тока падение напряжения на устройстве не превышало 300 В, при коммутации длинного импульса тока падение напряжения не превышало 60 В.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования экспериментально подтвердили правильность принятых технических решений и работоспособность быстродействующего устройства защиты от импульсных перенапряжений на основе р.в.у. Такое устройство

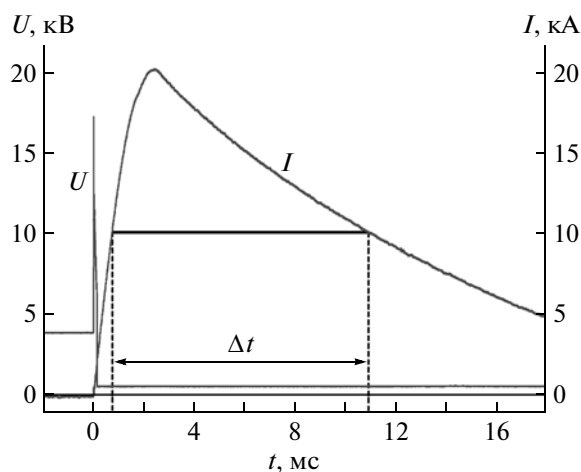


Рис. 8. Осциллограммы тока и напряжения на защитном устройстве при зарядном напряжении $U_{C_0} = 2.8$ кВ и $L_0 = 178$ мкГн (второй режим).

целесообразно использовать в сетях с большим по амплитуде и по длительности током сопровождения. Уровень ограничения такого устройства определяется напряжением ограничения применяемого нелинейного сопротивления.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 09-08-00368-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чунихин А.А., Жаворонков М.А. Аппараты высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Алферов Д.Ф., Иванов В.П., Сидоров В.А. // Электро. 2002. № 2. С. 31.
3. Алферов Д.Ф., Матвеев Н.В., Сидоров В.А., Хабаров Д.А. // ПТЭ. 2004. № 3. С. 94.
4. Алферов Д.Ф., Белкин Г.С., Ивакин В.Н. и др. // Электротехника. 2006. № 9. С. 21.