

ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ОТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

АВТОРЫ:

САЕНКО И.В.,
К.Ф.-М.Н.,
ЗАО НПФ «МАГНЕТОН
ВАРИСТОР»,

КУЗНЕЦОВ В.В.,
Д.Ф.-М.Н.,
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»
ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА
(ЛЕНИНА) (СПбГЭТУ),

ПИНСКАЯ Д.Б.,
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»
ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА
(ЛЕНИНА) (СПбГЭТУ),

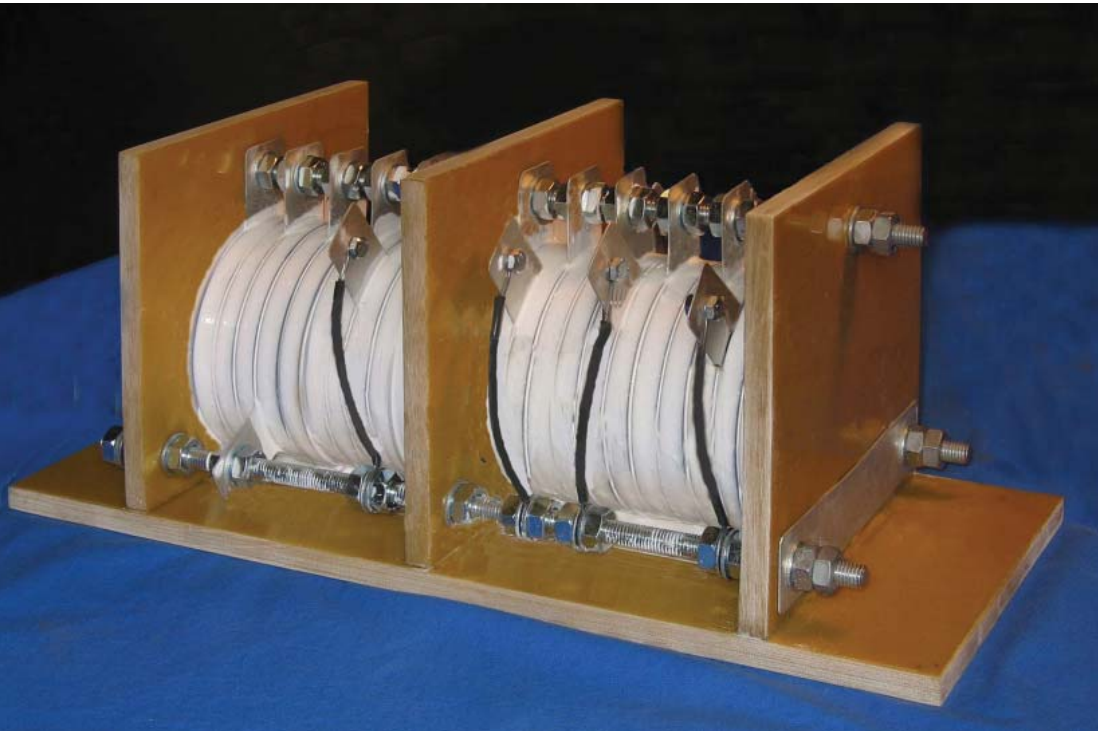
ГЕНЕЛЬТ А.Е.,
ООО «АТДИА»

Устройство защиты обмотки
гидрогенератора ЭПН
800/200-2,4 с максимально
допустимым длительным
рабочим напряжением 800 В
и максимальной рассеиваемой
энергией 200 кДж

В современных систе-
мах производства,
передачи и потребления
электроэнергии широко
используют силовые полупро-
водниковые приборы. Запас
электрической прочности этих
элементов значительно ниже,
чем у традиционной изоляции.

Ключевые слова: коммутационные перенапряжения; варисторы; полупрово-
дниковые преобразователи; остающееся напряжение; пропускная способ-
ность; ресурс наработки.

В случае возникновения в сети
импульсных перенапряжений эти
приборы с большой вероятностью
будут разрушены. Эффективным
способом защиты сети от таких
перенапряжений является под-
ключение варистора парал-
лельно защищаемому участку
электрической цепи.



ВВЕДЕНИЕ

Наиболее эффективным способом
защиты от импульсных перена-
пряжений является подключение
варистора параллельно защищае-
мому участку электрической цепи.
Первые варисторы изготавливали
из спеченного порошка карбида
кремния (SiC). В 1970-е гг. их стали
заменять на оксидно-цинковые
(ZnO) варисторы, имеющие гораздо
более выраженную нелинейность
вольт-амперной характеристики
(ВАХ). Именно эти варисторы и рас-
сматриваются в настоящей статье.

Следует отметить, что в последние
десятилетия в системах произ-
водства, передачи и потребления
электроэнергии широко используют
силовые полупроводниковые прибо-
ры. Запас электрической прочности
этих элементов значительно ниже,
чем у традиционной изоляции.
Именно этот факт и приводит к не-
обходимости снижения **напряжения**,
остающегося **при поглощении**
импульса.

Кроме того, мощность устройств,
в которых работают силовые полу-
проводниковые приборы, непрерыв-
но растет и достигаетк настоящему
времени десятков мегаватт, а
рабочие токи — десятков килоампер.
Такая **тенденция** обуславливает не-
обходимость увеличения площади
рабочей зоны варисторов или их
параллельного соединения. Парал-
лельное соединение варисторов
кроме того способствует
уменьшению остающегося
напряжения за счет понижения
плотности тока. Так, при соединении
двух варисторов напряжение при
том же коммутационном токе
уменьшается на 3%, четырех —
на 6%. Однако при **параллельной**
сбрке возникают трудности
в подборе варисторов **с параметра-**
ми, ообеспечивающими пропуска-
ние одинакового тока. Это связано с
нелинейностью их ВАХ.

Типичная ВАХ оксидно-цинкового
варистора **отражает** отношение
остающегося напряжения
к максимальному рабочему — так
называемый коэффициент защиты
Кз~ — на уровне 3,1÷3,3 для гро-
зового импульса (плотность тока
через варистор порядка 500 А/см²)
и 2,3÷2,4 для коммутационного
импульса (плотность тока порядка
35 А/см²). Для постоянного тока
эти отношения (Кз=) составляют
2,3÷2,5 и 1,9÷2,0, соответственно.

Коммутационные импульсы, как пра-
вило, несут в 100 раз большую
энергию, чем грозовые, и их разру-
шительное воздействие на элементы
электрооборудования до сих пор
недооценено. В работе Халило-
ва Ф.Х. [1] утверждается, что, если
достигнутый к настоящему вре-
мени уровень защиты от грозовых
перенапряжений принять за 50%
от желаемого, то уровень защиты
от коммутационных перенапряже-
ний не превысит 15%. Актуальность
снижения остающегося напряжения
при защите электрооборудования
от коммутационных перенапряже-
ний подчеркивалась неоднократно
разными авторами [2, 3].

Параллельные сборки варисторов
с практически неограниченным чис-
лом элементов производит фирма
Metrosil [4] на основе варисторов
из SiC, которые имеют существенно
меньшую нелинейность ВАХ, чем ва-
ристоры на основе ZnO. Такие сбор-
ки обладают огромной энергоем-
костью, но не подходят для защиты
полупроводниковых элементов из-за
больших остающихся напряжений.
Небольшие параллельные сборки
из ZnO-варисторов производит фир-
ма Panasonic [5].

Нами предлагаются меры по по-
вышению уровня защиты силовых
полупроводниковых элементов
за счет уменьшения отношения
остающегося напряжения к рабоче-
му и увеличения энергоемкости за-

щитных устройств при параллельном
соединении варисторов.

ПРЕДМЕТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Оксидно-цинковые варисторы из-
готавливали в ЗАО НПФ «Магнетон
Варистор» по традиционной керами-
ческой технологии с использова-
нием ротационно-пульсационного
мокрого смещения компонентов.
Электроды формировали электроду-
говым напылением алюминия либо
латуни с поверхностным слоем оло-
ва. Испытания классификационных
параметров варисторов производи-
ли на постоянном токе с источником
питания на базе установки для опре-
деления пробивных напряжений
УПУ-10. Измерение малых токов
производили с помощью микроам-
перметра М109. Подаваемое на ва-
ристор выпрямленное напряжение
отфильтровывалось конденсатором
емкостью 10 мкФ. Импульсные испы-
тания проводили на универсальном
стенде [6], обеспечивающем форми-
рование прямоугольных импульсов
с энергией до 20 кДж при остаю-
щемся напряжении до 5 кВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предварительные исследования
показали, что введение в состав
варисторной керамики примесей,
создающих глубокие уровни в за-
прещенной зоне ZnO, позволяет
управлять токами варистора при ра-
бочем напряжении, по природе сво-
ей являющимися токами утечки [7,
8]. Уменьшения токов утечки удалось
добиться совместным легированием
ZnO оксидами иттрия (Y) и циркония
(Zr). Эти составы уже запатентова-
ны [9]. Результаты сравнения токов
в области утечки для варистора
фирмы EPCOS

и варистора, из керамики, легированной Y + Zr, фирмы «Магнетон Варистор» (МВ) толщиной 10 мм каждый приведены на рис. 1. Сравнение показывает, что рабочий ток варистора из легированной керамики почти вдвое меньше, чем у варисторов из нелегированного материала. При увеличении температуры эта разница возрастает и достигает 2,5 – 3,0 при температуре рабочих испытаний варисторов. [10, 11]. При больших плотностях тока варисторы с добавками Y и Zr показывают меньшие остающиеся напряжения, чем варисторы из нелегированного материала. Отношение остающегося напряжения к классификационному при 35 А/см² составляет 1,47 для варистора EPCOS и 1,38 для МВ.

Оба обстоятельства делают варисторы из легированного материала более эффективными, чем традиционные, при защите полупроводниковых приборов, .

Параллельное соединение варисторов в тех случаях, когда пропускная способность варистора меньше, чем амплитуда или энергия коммутационного импульса, требует дополнительных затрат. Они идут не только на изготовление дополнительного количества варисторов, но и на подбор подобных, обеспечивающих равномерное распределение токов. В НПФ «Магнетон Варистор» разработана специальная методика подгонки варисторов, обеспечивающая равномерность распределения тока на уровне ± 10% с минимальными затратами.

При параллельной сборке варисторов возрастает вероятность выхода из строя защитного устройства за счет деградации наиболее нагруженного элемента. Поэтому системе контроля надежности варисторов следует уделять особое внимание. В соответствии с ГОСТ Р 52725- 2007 [12] надежность варисторов и ограничителей перенапряжений на их основе в части защиты от коммутационных импульсов подтверждается испытаниями на пропускную способность (6 серий по 3 импульса пропускным током) и рабочими испытаниями при повышенной температуре. При этом критериями пригодности являются прохождение испытаний без видимых повреждений и снижение остающегося напряжения при номинальном разрядном токе не более чем на 5%. При анало-

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЛЕГИРОВАННОГО (EPCOS) И ЛЕГИРОВАННОГО (МВ – Y + ZR) ВАРИСТОРОВ

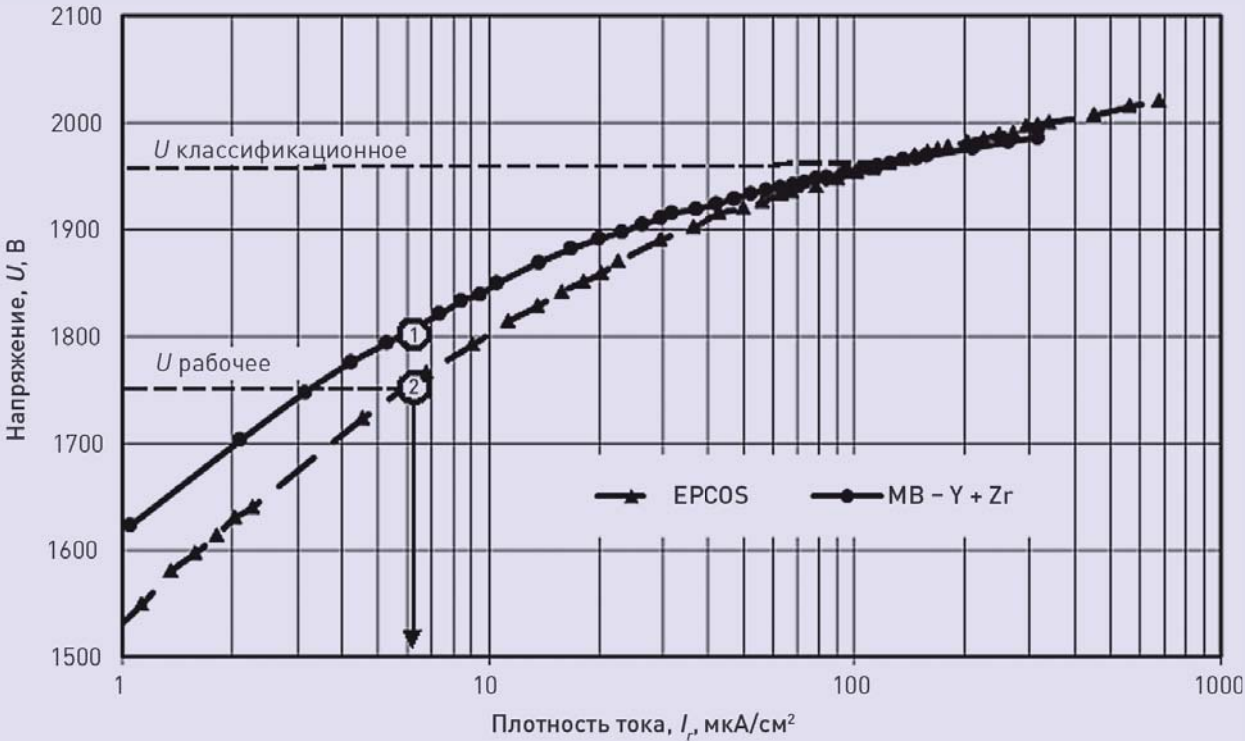


Рис. 1

ЗАВИСИМОСТЬ СНИЖЕНИЯ КЛАССИФИКАЦИОННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТ СУММАРНОЙ ЭНЕРГИИ, ПОГЛОЩЕННОЙ ВАРИСТОРАМИ

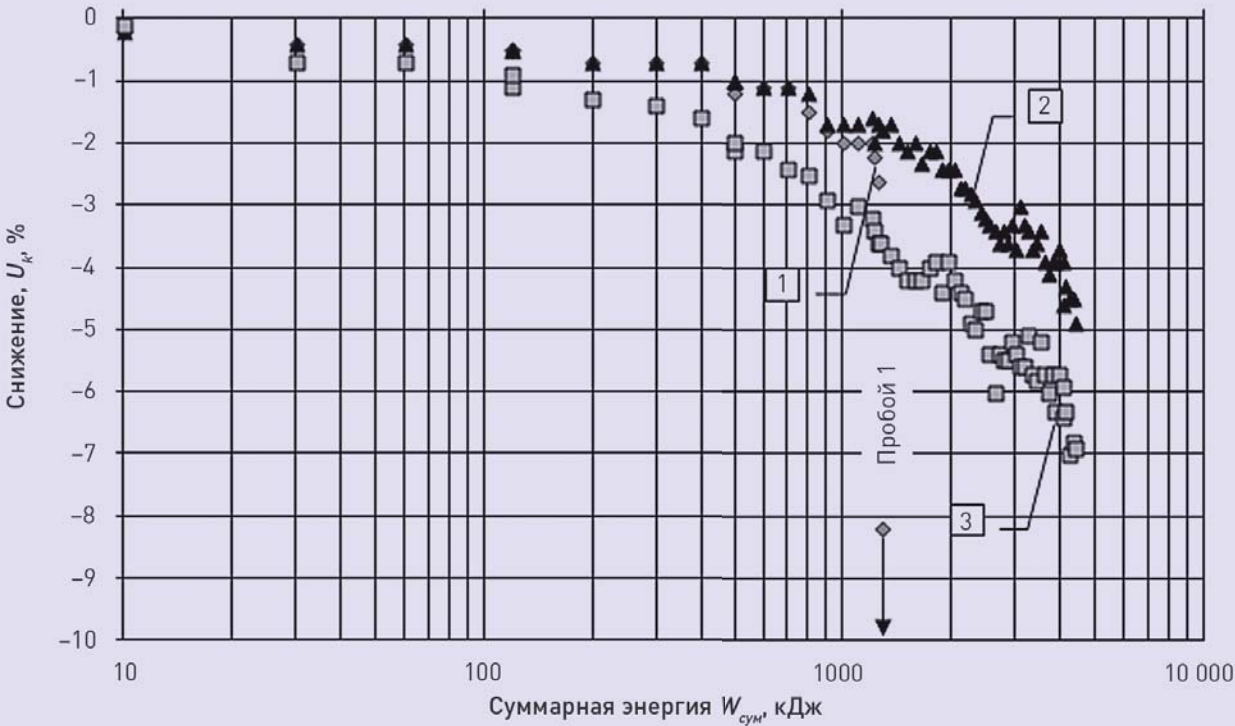


Рис. 2

гичных испытаниях одиночных варисторов продукция считается годной, если после испытаний классификационное напряжение уменьшается не более чем на 10%. Оба подхода не характеризуют ресурс наработки защитных устройств. В этой связи нами была предпринята попытка оценки ресурса мощного устройства защиты обмотки гидрогенератора ЭПН 800/200-2,4 с максимально допустимым длительным рабочим напряжением 800 В и максимальной рассеиваемой энергией 200 кДж. Прибор состоит из 20 параллельно включенных варисторов диаметром 115мм. В реальных условиях каждый варистор должен рассеивать энер-

гию 10 кДж при амплитуде тока 120 А и длительности около 60 мс. Поскольку испытательный стенд не мог обеспечить столь большую длительность импульсов, испытания проводили импульсами с амплитудой 3 кА и длительностью 2 мс. Энергия импульса соответствовала требуемой — 10 кДж, что создавало тепловой эффект, эквивалентный реальным условиям эксплуатации. Испытывали три предназначенных к сборке варистора. Перед испытаниями и после однократного импульсного воздействия измеряли классификационное напряжение каждого варистора U_k при токе 5 мА. Время между подачей импульсов составляло не менее 2 ч для обеспечения полного остыва-

ния варистора. После достижения значения суммарной поглощенной энергии 1200 кДж (120 импульсов) энергия импульса была увеличена до 17,7 кДж для ускорения испытаний. Результаты приведены на рис. 2. По достижении суммарной поглощенной энергии W_{сум} = 1250 кДж варистором № 1 на одном из его электродов был обнаружен точечный подгар на металлизированном электроде, классификационное напряжение резко снизилось на 8,2%. На 127 импульсе (1270 кДж) произошел пробой варистора № 1 на месте подгара. Образцы № 2 и 3 к окончанию испытаний рассеяли 4415 кДж суммарной энергии, сохранив работоспособность.

ОБСУЖДЕНИЕ
РЕЗУЛЬТАТОВ

Рабочее напряжение варистора выбирают таким образом, чтобы при самых неблагоприятных условиях (повышенной внешней температуре, увеличении температуры варистора в результате поглощения импульсов перенапряжений, кратковременном повышении напряжения в сети) варистор не потерял тепловой устойчивости, т.е. не попал в режим саморазогрева, приводящего к тепловому пробую [12]. Уменьшение тока в области утечек позволяет использовать варисторы с меньшим классификационным и, соответственно, остающимся напряжением, не теряя тепловой устойчивости. На рис. 1 это иллюстрируется опусканием верхней кривой к ВАХ варисторов EPCOS так, чтобы совместились точки 1 и 2. Рабочие испытания варисторов, из керамики,

легированной Y + Zr, показали, что остающееся напряжение может быть уменьшено на 20% по сравнению с варисторами из нелегированного материала. Результаты ресурсных испытаний не позволяют сделать однозначных выводов. Пробой одного из трех варисторов может быть объяснен слишком большой плотностью тока испытательных импульсов (48 А/см²), которая и привела к локальному подгару. В реальных условиях плотность тока составляет около 1,2 А/см², что в 40 раз меньше. Тем не менее по результатам испытаний изготовителем определен ресурс работы в 100 импульсов с энергией 200 кДж, или суммарной энергией 20 МДж. В рекомендациях по использованию ЭПН 0,8/200-2,4 указывается, что эксплуатация устройства требует периодической проверки его классификационного напряжения. При снижении этого параметра более чем на 5% эксплуатация

устройства становится рискованной, и устройство подлежит замене.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципы повышения эффективности защиты от коммутационных перенапряжений, изложенные в статье, в наибольшей степени реализованы в разработанном в НПФ «Магнетон Варистор» приборе ЭПН 4/100 для защиты современных электровозов с приводом постоянного тока. В этом приборе использованы четыре параллельно соединенных варистора диаметром 115 мм, изготовленные из керамики, легированной Y и Zr. В табл. 1 приведены характеристики этого устройства в сравнении с ОПН 3,3 УХЛ производства НИИ ЗАИ [13]. Как видно из таблицы, предложенные нами решения позволили снизить остающееся напряжение более чем на 40%.

По нашему мнению, это преимущество должно быть востребовано в перспективе при создании полупроводниковых преобразователей для высоковольтных линий передачи постоянного тока [14]. Одним из важнейших дел в этом направлении является развитие методов испытаний и мониторинга состояния защитных устройств, обеспечивающих высокую надежность работы защищаемых систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Халилов Ф.Х. Необходимость ограничения перенапряжений в электрических сетях железных дорог Российской Федерации. Санкт-Петербург: Позитрон, 2004. [Электронный ресурс]: http://www.positron.ru/file_lib/lib_1180617387.pdf (дата обращения: 29.04.2015).

2. Алферов Д.Ф., Аталиков М.М., Кокоулин А.И., Кучинский В.Г., Иванов В.П., Саенко И.В., Сидоров В.А. Блок защиты, обеспечивающий ограничение импульсных перенапряжений на более низком уровне по сравнению с традиционными ограничителями перенапряжения // VIII-й симпозиум «Электротехника 2010». Сб. тезисов. Московская область: 24–26 мая 2005. С. 269.

3. Быстров Р.Ю., Горчаков В.Л., Опрен В.М., Саенко И.В., Синельщикова Т.Ю., Фирсенков А.И. Защита от импульсных перенапряжений мощных низковольтных электропотребителей // Санкт-Петербург: ЭКСПО. Тезисы докладов на конференции «Энергетическая безопасность России», 10–13 мая 2004. С. 16.

4. Компания METROSIL [Электронный ресурс]: <http://www.metrosil.com/products/discs-assemblies> (дата обращения: 29.04.2015).

5. Компания Panasonic. Surge Suppression Components, 2013 [Электронный ресурс]: http://industrial.panasonic.com/ecs/jp/i/29860/se201310P001_072-Sage_E/se201310P001_072-Sage_E.pdf (дата обращения: 29.04.2015).

МОЩНЫЕ ВАРИСТОРЫ И ЭНЕРГОПОГЛОТИТЕЛИ НПФ "МАГНЕТОН ВАРИСТОР"



6. Патент РФ № 32607 от 30.09.2003 // Высоковольтный стенд для испытания варисторов / Саенко И.В., Опрен В.М., Овчаренко А.Е., Быстров Р.Ю., Синельщикова Т.Ю.

7. Пинская Д.Б., Саенко И.В. Исследование легирования оксидно-цинковых варисторов оксидами иттрия и циркония // Физика и технология микро- и наносистем: Тезисы докладов 14-й научной молодежной школы под общ. ред. В.В. Лучинина. СПб.: 2011. С. 93.

8. Пинская Д.Б., Саенко И.В. Влияние легирования оксидами иттрия и циркония на свойства варисторов на основе ZnO // Известия СПбГЭТУ (ЛЭТИ). Вып. 8. СПб.: 2012. С. 20–25.

9. Патент РФ № 2514085 от 27.04.2014 // Керамический материал для варисторов на основе оксида цинка / Пинская Д.Б., Жуковская И.В., Синельщикова Т.Ю., Саенко И.В.

10. Пинская Д.Б. Получение и исследование оксидно-цинковых варисторов с повышенной тепловой стабильностью // Тезисы докладов 20-й Всероссийской межвузовской

научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика». М.: МИЭТ, 2013. С. 117–118.

11. Пинская Д.Б., Саенко И.В. Исследование тепловой стабильности оксидно-цинковых варисторов // Труды 68-й научно-технической конференции, посвященной Дню радио. СПб.: СПбГЭТУ (ЛЭТИ). 2013.

12. ГОСТ Р 52725-2007. Ограничители перенапряжения нелинейные для электроустановок переменного тока от 3 до 750 кВ. Введ. 01.01.2008. М.: Стандартинформ, 2007.

13. Компания НИИ ЗАИ [Электронный ресурс]: <http://www.opn.ru/index.php/opn-rzd/opn-3-3-ukhl1> (дата обращения: 29.04.2015).

14. Борьба за рынок оборудования электропередачи на постоянном токе // «Новости электроэнергетики» [Электронный ресурс]: <http://forca.ru/stati/energetika/borba-za-rynok-oborudovaniya-elektroperedachi-na-postoyannom-toke.html> (дата обращения: 29.04.2015).

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

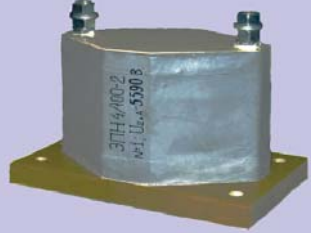
ПАРАМЕТРЫ		
	ОПН 3,3 УХЛ	ЭПН 4/100-2
Номинальное напряжение	3,3 кВ	3,3 кВ
Максимальное длительно допустимое напряжение	4,0 кВ	4,0 кВ
Остающееся напряжение при амплитуде тока 8/20мкс:		
- 2000 А	9,6 кВ	5,9 кВ
- 5000 А	11,7 кВ	6,2 кВ

Табл. 1