

В.В.КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, зав.отд., НТУ «ХПИ»;

И.П.ЛЕСНОЙ, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;

В.Н.ДНЫЩЕНКО, зав. сектором, НТУ «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ SPD ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ

Сучасна елементна база електронних виробів не в змозі витримати вплив імпульсних перенапруг, рівень яких регламентується відповідними стандартами. Експлуатація таких виробів неможлива без застосування спеціальних пристроїв захисту, які названо «пристрій захисту від імпульсних перенапруг». Основні вимоги до таких пристроїв містяться у стандарті ІЕС 61643-11:2011. У статті описано методіку випробувань та деякі отримані результати.

The modern element base of electronic wares can not survive influences of surge pulses, the level of that is regulated by corresponding standards. Exploitation of such wares is impossible without the special protective devices named «SPD». The basic requirements to these devices are contained in the standard of IEC 61643-11: 2011. Methodology of tests and their results are described in the article.

Современная элементная база электронных изделий не может выдержать воздействия импульсных перенапряжений, уровень которых регламентируется соответствующими стандартами. Эксплуатация таких изделий невозможна без специальных защитных устройств, называемых «устройство защиты от импульсных перенапряжений». Основные требования к этим устройствам содержатся в стандарте IEC 61643-11:2011. В статье описывается методика испытаний и их результаты.

Введение

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств (ТС) является актуальной задачей, как для изготовителей продукции, так и для ее потребителей. Действующий в Украине Технический регламент по ЭМС [1] устанавливает определенные требования к уровню устойчивости ТС, в зависимости от их типа, области применения и имеющихся у ТС портов. Большинство ТС имеют порты электропитания. Обеспечение заданного уровня устойчивости порта электропитания к импульсным перенапряжениям может быть достигнуто за счет применения специальных устройств защиты от перенапряжений, которые называются SPD (surge protective device). Такое устройство содержит, по крайней мере, один нелинейный элемент, и обеспечивает ограничение напряжения и отведение тока импульсной помехи. SPD идентифицируются как одно- и двух- портовые. Одно-портовый SPD не вносит последовательного импеданса в цепь питания (параллельное включение), а двух-портовый имеет характерный последовательный импеданс (включается в разрыв цепи питания). SPD в зависимости от используемой элементной базы бывают трех типов:

- коммутирующие напряжение (voltage switching);
- ограничивающие напряжение (voltage limiting);

– комбинированные.

SPD коммутирующего типа имеют высокий импеданс в штатном режиме питания, но мгновенно изменяют его до низких значений при появлении импульса перенапряжения. Это достигается за счет применения компонент «кρουбарного» типа, таких как: воздушный разрядник, газовый разрядник, тиристор, симистор.

SPD ограничивающего типа имеют высокий импеданс в штатном режиме питания, но импеданс непрерывно уменьшается по мере увеличения тока и напряжения помехи. Типичными компонентами, применяемыми в таком типе SPD, являются варисторы, супрессоры и лавинные диоды, обобщенно называемые «ограничители».

На практике, часто применяются SPD комбинированного типа, сочетающие в себе компоненты обоих описанных выше типов, поскольку такие устройства обеспечивают лучшие параметры защиты.

По месту использования, SPD бывают двух типов: для наружного применения и использования внутри помещений.

По параметрам тока и напряжения, которые SPD может пропустить через себя, и уровню напряжения, которое попадает на защищаемый порт, устройства принято разделять на три типа в соответствии с классом испытаний: I, II и III.

Современные требования, которые предъявляются к устройствам защиты портов электропитания, регламентируются стандартом IEC 61643-11:2011 [2]. Основные положения этого стандарта в части обсуждаемого вопроса, описаны в работе [3]. В Европейском союзе действует стандарт EN IEC 61643-11:2002 [4], являющийся модифицированной версией предыдущей редакции упомянутого выше стандарта МЭК. В США действует стандарт [5], требования которого хоть и отличаются от требований стандарта [2] в части порядка проведения испытаний, но эти отличия нельзя считать существенными. Однако, рынок США предъявляет дополнительные по сравнению со стандартами [2, 4] требования к защитным возможностям SPD, связанные с ослаблением дестабилизирующего действия некоторых видов помех [6-8], которые могут появляться в сетях питания. Очевидно, что такой подход оправдан, поскольку не целесообразно под каждый вид помехи устанавливать отдельное защитное устройство. Это обстоятельство следует учитывать разработчикам и изготовителям, если в их планах есть освоение рынка США.

Современные требования к устройствам защиты

Изложение современных требований к техническим характеристикам SPD, следует начать с определения терминов и обозначений, важных для понимания рассматриваемого вопроса, которые используются в цитируемом стандарте IEC 61643-11:2011 [2]. Рамки статьи не позволяют изложить все требования стандарта общий объем, которого составляет 98 страниц, поэтому, рассматривается лишь та часть стандарта, которые относятся к основным

защитным характеристикам SPD, определяемым при проведении импульсных испытаний. При этих испытаниях осуществляется определение уровня напряжения защиты.

I_{imp} – импульсный разрядный ток – пиковое значение тока (рекомендуемая форма 10/350 мкс), протекающего через SPD, при испытаниях класса I;

I_n – номинальный разрядный ток – пиковое значение тока формы 8/20 мкс, протекающего через SPD, при испытаниях класса II;

I_{max} – максимальный разрядный ток, формы 8/20 мкс, который может пропустить через себя SPD, сохранив после этого нормальное функционирование. Значение I_{max} указывается изготовителем, и должно быть не менее значения I_n ;

U_c – максимальное действующее значение напряжения, которое может быть непрерывно приложено к порту SPD;

U_p – уровень напряжения защиты – максимальное напряжение, ожидаемое на выходе SPD, при испытаниях импульсными токами и напряжениями, заданных уровнем и форм, в соответствии с классом испытаний. Значение U_p задается изготовителем путем выбора из стандартизованного ряда. Это значение должно быть больше всех измеренных ограниченных напряжений, полученных в процессе испытаний, при протекании тока с амплитудой, соответствующей с I_n или I_{imp} для испытаний II или I класса, соответственно;

Измеренное ограниченное напряжение – максимальное значение напряжения, измеренного на выходах SPD, при подаче импульсов заданной формы и амплитуды;

U_{max} – наибольшее измеренное напряжение в процессе испытаний импульсными напряжениями;

U_{res} – остаточное напряжение – пиковое значение напряжения, которое появляется между клеммами SPD при протекании разрядного тока;

U_{oc} – напряжение холостого хода генератора комбинированной волны;

I_{cw} – ток короткого замыкания генератора комбинированной волны;

Комбинированная волна – волна напряжения U_{oc} (форма 1,2/50 мкс) заданного уровня, переходящая в волну тока I_{cw} (форма 8/20 мкс) с пиковым значением, соответствующим внутреннему сопротивлению генератора, равному 2 Ом.

Стандарт регламентирует три класса импульсных испытаний, которые отличаются амплитудно-временными параметрами испытательных напряжений и токов:

Класс I – отличительной особенностью испытаний этого класса является ток I_{imp} , который может достигать 25 кА. Требования к форме сформулированы таким образом, чтобы обеспечивался определенный уровень заряда, который протекает через SPD. На практике, используется импульс формы 10/350 мкс, удовлетворяющий всем требованиям стандарта [2].

Класс II – испытания проводятся с номинальным разрядным током I_n , напряжением 1,2/50 мкс и максимальным разрядным током I_{max} .

Класс III – испытания комбинированной волной с уровнем до 6 кВ /3 кА. Испытания проводятся по методике, регламентируемой стандартом IEC 61000-4-5:2005 [9].

Рассмотрим виды импульсных испытаний, включенные в раздел 8.3.3 стандарта [2]. Следует отметить, что в стандарте в разделе 8.1 содержатся указания о рекомендуемых параметрах испытательных импульсов и уровней допустимых отклонений. Эта информация является полезной для лучшего понимания обсуждаемых требований.

Импульсный разрядный ток при дополнительных испытаниях класса I определяется его параметрами: пиковым значением I_{imp} , зарядом Q и условной энергией W/R. Условная энергия определяется как энергия, рассеянная на сопротивлении 1 Ом, при протекании тока с пиковым значением I_{imp} . Импульсный ток должен достичь значения I_{imp} не более чем за 50 мкс. Протекание заряда и рассеяние энергии должны завершиться в течении времени, не превышающим 5 мс. В табл. 1 (в стандарте табл. 6) представлены величины заряда и энергии, соответствующие указанным значениям I_{imp} . Типичной формой волны, при которой могут быть достигнуты параметры, соответствующие табл. 1, является униполярный импульс с фронтом 10 мкс, и длительностью на полуспаде 350 мкс.

Таблица 1 – Параметры испытания класса I

I_{imp} , кА	Q, Кл	W/R, кДж/Ом
25	12,5	156
20	10	100
12,5	6,25	39
10	5	25
5	2,5	6,25
2	1	1
1	0,5	0,25

Примечание: Допустимые отклонения параметров установлены такими:

$$I_{imp}: \pm 10\%; Q: -10\%/+20\%; W/R: -10\%/ +45\%.$$

Импульсные токи, используемые при испытаниях классов I и II для определения остаточного напряжения, имеют форму 8/20 мкс. Предпочтительный ряд значений номинальных разрядных токов I_n указан таким:

0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 5,0; 10,0; 15,0 и 20,0 кА.

Допустимые отклонения параметров волны тока (пиковое значение, время фронта и длительность полуволны) $\pm 10\%$.

Допускаются небольшие колебания или отклонения от установленного значения при условии, что амплитуда любого колебания не превышает 5 % от пикового значения. Любое изменение полярности после перехода тока через нуль не должно быть более чем 30 % от пикового значения.

С целью определения компонент «кребарного» типа проводятся испы-

тания классов I и II импульсным напряжением стандартной формы 1,2/50 мкс. Допуски на форму волны напряжения следующие:

- пиковое значение ... $\pm 5\%$;
- длительность фронта ... $\pm 30\%$;
- длительность полуволны $\pm 20\%$.

Колебания или отклонения от установленного значения могут произойти на пике импульса. Если частота таких колебаний свыше 500 кГц или длительность отклонения менее 1 мкс, с целью проведения измерений вычерчивается кривая значений, и тогда максимальная амплитуда этой кривой определит пиковое значение испытательного напряжения. Измерительные приборы должны иметь полосу частот не менее 25 МГц, и погрешность не более 3%.

Испытание класса III осуществляются комбинированной волной. Стандартный импульс генератора комбинированной волны характеризуется выходным напряжением в условиях разомкнутой цепи и выходным током в условиях короткого замыкания. Напряжение разомкнутой цепи должно иметь время фронта 1,2 мкс и время полу периода 50 мкс. Ток короткого замыкания должен иметь время фронта 8 мкс и время полупериода 20 мкс. Допуски на напряжение U_{oc} в состоянии разомкнутой цепи следующие:

- пиковое значение ... $\pm 5\%$;
- длительность фронта ... $\pm 30\%$;
- длительность полупада... $\pm 20\%$.

Предпочтительный ряд значений напряжений U_{oc} указан таким: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 10,0 и 20,0 кВ.

Детально требования к параметрам комбинированной волны и методики испытаний представлены в стандарте IEC 61000-4-5:2005 [9], гармонизированном в Украине.

Рассмотрим методики измерения ограниченного напряжения, являющегося основным параметром, характеризующим эффективность конкретного SPD. Испытания различных типов SPD с целью подтверждения уровня напряжения защиты (U_p) должны быть проведены в соответствии с табл. 2 (табл. 7 стандарта [2]).

Таблица 2 – Испытания, выполняемые для определения предельного напряжения

Пункт по стандарту [2]	Класс I	Класс II	Класс III
8.3.3.1	X	X	–
8.3.3.2	X*	X*	–
8.3.3.3	–	–	X

Примечание: Знак «X» означает, что испытания проводятся.

* – Применимо только для кроубарного и комбинированного типа SPD.

При испытаниях применяются следующие особые условия.

а) Все однопортовые SPD испытывают обесточенными.

б) Все двухпортовые SPD испытывают с подачей напряжения от источника с номинальным током не менее 5 А при напряжении U_c . Положительный импульс подается при $(90 \pm 5)^\circ$, а отрицательный импульс при $(270 \pm 5)^\circ$ по отношению к фазе питающего напряжения.

с) Для однопортовых SPD, не имеющего отдельных выводов нагрузки, предельное напряжение измеряют на выводах, к которым прикладывают перенапряжение. Для однопортовых SPD с отдельными выводами нагрузки, предельное напряжение измеряют на выводах длиной 150 мм.

д) Измерения ограниченного напряжения и определение U_{\max} осуществляются путем проведения испытаний, в соответствии с таблицей 2, применительно к классу испытаний SPD.

Определение остаточного напряжения

1. При протекании импульсов тока 8/20 мкс (п. 8.3.3.1 табл. 2).

а) При испытаниях SPD по классу I, подают импульсы тока 8/20 мкс с пиковыми значениями, приблизительно равными 0,1; 0,2; 0,5 и 1,0 значений $I_{\text{имп}}$. Когда испытываются SPD по классу II, подают импульсы тока 8/20 мкс с пиковыми значениями, приблизительно равными 0,1; 0,2; 0,5 и 1,0 значений I_n . Если SPD содержит только компоненты, ограничивающие напряжение, это испытание проводится только при пиковом значении, равном $I_{\text{имп}}$ или I_n для класса I или II, соответственно. В случае, когда изготовитель указывает I_{\max} , дополнительные испытания током 8/20 должны быть проведены при пиковом значении равном I_{\max} с измерением остаточного напряжения.

б) Одна серия импульсов положительной полярности и одна серия импульсов отрицательной полярности должны быть приложены к SPD.

с) Интервал между отдельными импульсами должен быть достаточным, чтобы образцы остыли до температуры окружающего воздуха.

д) Осциллограммы тока и напряжения должны регистрироваться для каждого импульса. По результатам должен быть построен график зависимости пиковых (абсолютных) значений остаточного напряжения U_{res} от величины тока в диапазоне до I_n или $I_{\text{имп}}$. На кривой должно быть достаточно точек, чтобы убедиться в отсутствии значительных отклонений.

е) По графику остаточного напряжения U_{res} , определяется наибольшее значение U_{\max} , которое достигается в интервале токов I_n или I_{\max} для класса II и $I_{\text{имп}}$ для класса I.

2. При подаче срезанной волны напряжения (п. 8.3.3.2 табл. 2).

Применяется стандартное импульсное напряжение формой 1,2/50 мкс. Испытания начинаются при напряжении 6 кВ, создаваемых генератором на разомкнутой цепи.

а) К SPD прикладывают 10 импульсов каждой полярности: пять положительной и пять отрицательной.

б) Интервал между отдельными импульсами должен быть достаточным, чтобы образцы остыли до температуры окружающего воздуха.

с) Если не наблюдается среза напряжения на фронте каждого из 10 импульсов, то испытания а) и б) повторяются при более высоком напряжении на выходе генератора, вплоть до максимального 10 кВ. Напряжение поднимается с шагом, выбранным испытательной лабораторией, до тех пор, пока при прикладывании всех импульсов не появится разряд.

д) Напряжение на SPD должно регистрироваться осциллографом.

е) Измеренное ограниченное напряжение и U_{\max} есть величина максимального срезанного напряжения, зарегистрированного при проведении этих испытаний.

3. При подаче комбинированной волны (п. 8.3.3.3 табл. 2).

При проведении этих испытаний используется генератор комбинированной волны и устройство связи-развязки, требования к которым детально описаны в стандарте [9]. Процедура испытаний такова:

а) Интервал между отдельными импульсами должен быть достаточным, чтобы образцы остыли до температуры окружающего воздуха.

б) Выходное напряжение генератора устанавливается равным 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 величины U_{oc} , указанной изготовителем SPD. Если SPD содержит только компоненты, ограничивающие напряжение, эти испытания проводят только при напряжении, равном U_{oc} .

с) С установками генератора по п. б) к SPD прикладывают по четыре разряда каждой амплитуды: два положительной полярности и два отрицательной полярности.

д) Для каждого импульса должны быть сняты осциллограммы тока, поданного к SPD генератором, и напряжения на выходе SPD.

е) Измеренное ограниченное напряжение и U_{\max} равно максимальному напряжению, зарегистрированному при проведении этих испытаний. Это может быть срезанное напряжение или остаточное напряжение в зависимости от конструкции SPD.

Критерии соответствия

1. В результате испытаний не должны регистрироваться или наблюдаться пробои и воспламенения SPD.

2. Величины измеренного ограниченного напряжения U_{\max} , полученные при испытаниях по разделу 8.3.3, не должны превышать значения U_p , указанного изготовителем.

В связи с этим, следует указать предпочтительные значения уровня напряжения защиты U_p в соответствии со стандартом [2]:

0,08; 0,09; 0,10; 0,12; 0,15; 0,22; 0,33; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90; 1,00; 1,20; 1,50; 1,80; 2,00; 2,50; 3,00; 4,00; 5,00; 6,00; 8,00 и 10,00 кВ.

3. Нет видимых повреждений, которые появились в процессе испытаний.

Методика испытаний

В качестве примера, рассмотрим результаты испытаний конкретного устройства защиты, общий вид которого представлен на рис. 1. Это устройство трехфазное, однопортовое, имеет 10 ступеней защиты. Изготовитель указал, что устройство относится к классам II и III. Следовательно, испытания должны быть проведены по пунктам 8.3.3.1 и 8.3.3.3 стандарта IEC 61643-11:2011. В рамках данной статьи ограничимся рассмотрением результатов испытаний только по первому из указанных пунктов, то есть по классу II. Эффективность SPD оценивается по параметрам остаточного напряжения на портах устройства при подаче импульсов тока формой 8/20 мкс с уровнем силы тока в диапазоне от 1 кА до 20 кА. При испытаниях, на каждом из четырех уровней из указанного интервала силы тока подавалось по 3 импульса как положительной, так и отрицательной полярностей.

При испытаниях, напряжение генератора УИГ-1 подавалось непосредственно на порт SPD, который в момент воздействия не был подключен с сети питания. Сочетание пар портов SPD выбиралось таким образом, чтобы испытать все имеющие варианты степеней защиты: фаза-земля, фаза-нейтраль, нейтраль-земля.



Рисунок 1 – Испытываемое устройство защиты

Измерение уровня остаточного напряжения и его формы осуществлено с помощью высоковольтного пробника ИИН-К1 с оптической линией передачи информации. Регистрация сигнала с пробника осуществлялась с помощью цифрового запоминающего осциллографа, имеющего полосу частот не менее

100 МГц.

Измерение параметров тока, осуществлялось с помощью низкоомных шунтов (сопротивление менее 0,05 Ом). Шунт ШК-50 с кабельной линией связи используется для измерений токов на выходе установки УИГ-1 при коротком замыкании. Шунт ШО-4 с оптической линией передачи информации используется для измерения тока, протекающего через порт SPD.

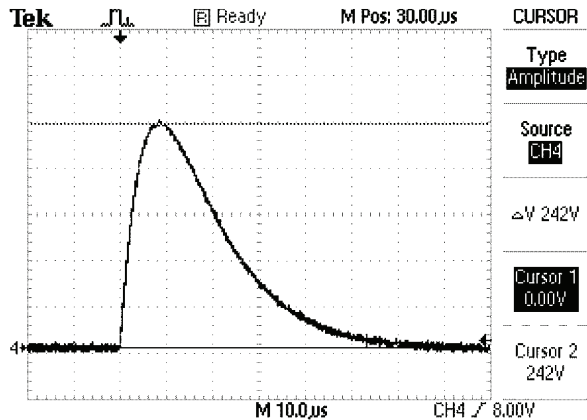


Рисунок 2 – Типовая осциллограмма импульса тока формы 8/20 мкс

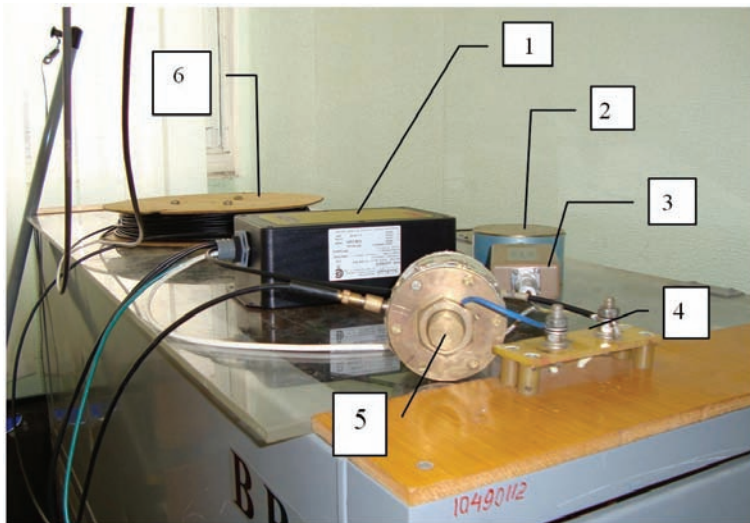


Рисунок 3 – Общий вид испытательного поля установки УИГ-1:
1 – Испытываемое изделие; 2 – Измеритель напряжений оптический ИИН-К1; 3 – Высоковольтный делитель 1:150; 4 – Высоковольтный вывод установки УИГ-1; 5 – Шунт оптический ШО-4; 6 – Бухта оптического кабеля к ИИН-К1

Типовая осциллограмма импульса тока положительной полярности на выходе установки УИГ-1 представлена на рис. 2.

Общий вид испытательного поля показан на рис. 3.

Результаты испытаний

Осциллограмма остаточного напряжения на портах устройств защиты, при подаче импульсов тока с амплитудой в диапазоне от 1 кА до 20 кА, имеет вид, представленный на рисунке 4. На осциллограмме по каналу 1 регистрировался ток, протекающий через SPD. Коэффициент (k_1) калибровки измерительного тракта равен 9,6 А/мВ. Амплитуда тока (I_m) определяется по формуле: $I_m = k_1 \cdot U_1$. По каналу 2 регистрировалось остаточное напряжение U_{res} . На осциллограмме курсор установлен так, что значения $\Delta V = U_2$ [мВ], указанные в середине правой колонки, относятся к сигналу U_{res} . Коэффициент (k_2) калибровки измерительного тракта равен $k_2 = 8,785$ В/мВ. Амплитуда напряжения (U_{res}) определяется по формуле: $U_{res} = k_2 \cdot U_2$

Для каждого уровня силы тока из трех вариантов определялся вариант с максимальным значением остаточного напряжения и эти значения принимались за результат. Формы остаточного напряжения для различных вариантов сочетания пар портов испытываемого устройства защиты не имеют принципиальных отличий и схожи с осциллограммой, представленной на рис. 4.

По результатам испытаний построен график зависимости величины остаточного напряжения от амплитуды тока, протекающего через SPD, представленный на рис. 5. Сплошная кривая относится к импульсам положительной полярности, пунктирная – отрицательной.

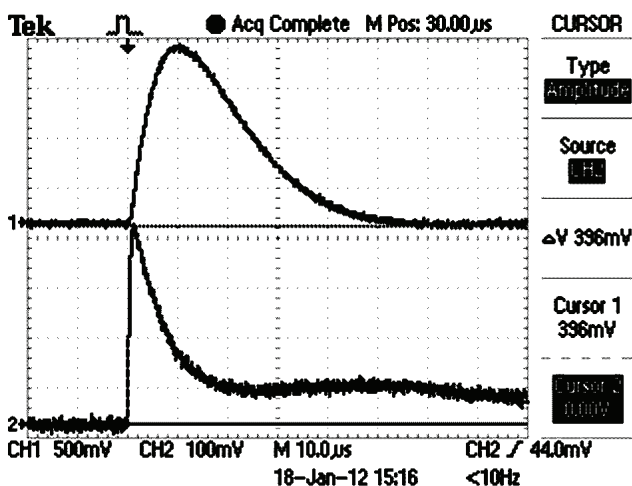


Рисунок 4 – Осциллограмма остаточного напряжения и тока, протекающего через SPD через пару A-G при положительной полярности тока силой 17,07 кА

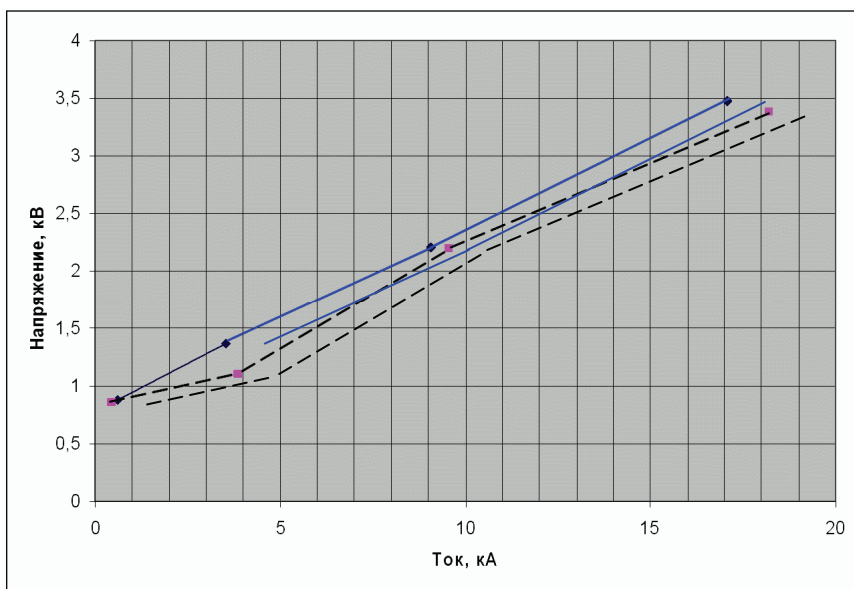


Рисунок 5 – Зависимость уровня остаточного напряжения от силы тока

По результатам испытаний защитное устройство подтвердило свою классификацию по II классу. Значение уровня напряжения защиты U_p определяется как максимальное в диапазоне от 0,1 до 1,0 значений I_n . Изготовитель установил I_n , равным 10 кА. Следовательно, на основании результатов испытаний, значение уровня напряжения защиты $U_p = 2,5$ кВ.

Выводы:

Требования к техническим параметрам устройств защиты от перенапряжений регламентируются стандартом IEC 61643-11:2011.

Испытания устройств защиты на соответствие требованиям указанного стандарта в части воздействия импульсных перенапряжений реализованы.

По результатам испытаний защитное устройство от перенапряжения в сети электропитания, которое было испытано воздействием импульсных токов формой 8/20 мкс, подтвердило свою классификацию по II классу со значением уровня напряжения защиты U_p равным 2,5 кВ.

Список литературы: 1. Технічний регламент з електромагнітної сумісності обладнання, затверджений Постановою Кабінету Міністрів України від 29 липня 2009 р. №785. 2. IEC 61643-11:2011 Low voltage surge protective devices – Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems – Requirements and test methods. 3. Князев В.В. Технічні вимоги до пристроїв захисту від сплесків напруги портів електроживлення технічних засобів // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2012. – № 2. 4. EN IEC 61643-11:2002 Low voltage surge protective devices – Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems – Requirements and test methods. (IEC 61643-1:1998, Mod.). 5. UL 1449: 2006 3-rd Edition. Surge Protection Device. 6. IEEE

Std. C62.41.1-2002 IEEE Guide on the surge environment in low-voltage (1000 V and less) AC power circuits. **7.** IEEE Std. C62.41.2-2002 IEEE Recommended practice on characterizations of surge in low-voltage (1000 V and less) AC power circuits. **8.** IEEE Std. C62.45-2002 IEEE Recommended practice on surge testing for equipment connected to low-voltage (1000 V and less) AC power circuits. **9.** IEC 61000-4-5:2005 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measure techniques – Surge immunity test.

Поступила в редколлегию 04.04.2012.