

Защита электронных устройств от импульсных помех большой энергии

Статья посвящена вопросам обеспечения стойкости электронной аппаратуры к импульсным помехам большой энергии, возникающим на портах электропитания разнообразных электронных устройств.

Виталий Скворцов, к. т. н

sva@ie.tusur.ru

Виталий Суворов

jk3ger@gmail.com

Электрические импульсные помехи создают значительную угрозу для электрооборудования и данных. Они могут иметь разные названия, например всплески, перенапряжения и выбросы, но в любом случае последствия воздействия этих нарушений остаются одними и теми же: перебои, ухудшения свойств и повреждения оборудования, неизбежно приводящие к его простоям.

По линиям электропитания, входящим в здание под или над уровнем земли, в домашнее или офисное оборудование могут передаваться значительные импульсные помехи. Выбросы при импульсных помехах, создаваемые индуктивными и емкостными связями, обусловленные взаимным расположением линий, могут вызывать серьезные повреждения электронных устройств.

Механизмы проникновения импульсных помех

Механизм индуктивной связи является основным и наиболее распространенным физическим процессом возникновения импульсной помехи.

Всякий раз, когда электрический ток проходит через токопроводящий материал, в окружающей среде создается магнитное поле. Если в это магнитное поле помещен второй проводник, а само поле не стационарно, тогда во втором проводнике будет наводиться ток. Такое индуктивное взаимодействие может быть вызвано линией, индуцирующей напряжение в расположенной рядом линии электропитания или передачи данных, также возможно взаимное влияние линий. Гораздо более сильное воздействие может вызвать молния, так как в результате молниевых разрядов на землю образуются электромагнитные поля, индуцирующие энергию в проводниках различных электронных цепей почти таким же способом, каким магнитное поле от одного проводника может наводить импульсные помехи в расположенном рядом проводнике фактически без прямого контакта с этой линией. Подобного вида воздействия в линиях электропередачи вызывают различные нежелательные эффекты, такие как:

- Разрушение. В эту категорию входят все случаи, когда импульсные помехи с высокими уровнями энергии вызывают немедленный отказ оборудо-

вания. Часто это видимые физические повреждения, например сгоревшие или треснувшие платы и компоненты и другие очевидные признаки.

- Повреждения. Обычно они возникают, когда импульсная помеха попадает в оборудование в результате индуктивного взаимодействия. После этого электронные компоненты пытаются обработать импульсную помеху как действительную логическую команду. В результате происходит блокирование системы, возникают сбои, выдаются ошибочные данные на выходе, теряются или повреждаются файлы.
- Рассеяние. Эти энергетические воздействия связаны с повторяющимися нагрузками на компоненты интегральных схем (ИС). Материалы, используемые для изготовления ИС, могут выдержать определенное число повторяющихся энергетических всплесков, но не в течение значительного периода времени. Происходящее накопление тепловой энергии в компонентах и обусловленная этим деградация параметров в конечном итоге приведет к выходу из строя электронной аппаратуры (ЭА). Поэтому для обеспечения надежного функционирования ЭА, в соответствии с областью ее применения, существуют стандарты испытаний, необходимых для обеспечения стойкости аппаратуры к импульсным помехам.
- Импульсная помеха. На основании стандарта МЭК 50-161-90 это электромагнитная помеха, которая проявляется в тракте конкретного технического средства (ТС) как последовательность отдельных импульсов или переходных процессов. Микросекундная импульсная помеха (МИП) — импульсная помеха общей длительностью от 1 мкс до 1 мс. В соответствии с ГОСТ Р 51317.4.5-99 [1] причинами возникновения микросекундных помех являются разнообразные коммутационные процессы, происходящие в системах электроснабжения большой и малой мощности, а также различные электрические атмосферные явления. Согласно данному стандарту импульсные помехи могут проникать в порты электропитания кондуктивным (непосредственно по проводам) путем по следующим контурам: «провод-провод» (I), «провод-земля» (II) (рис. 1). МИП, возникающие на портах электропитания устройства, по схеме «провод-провод» (I) являются

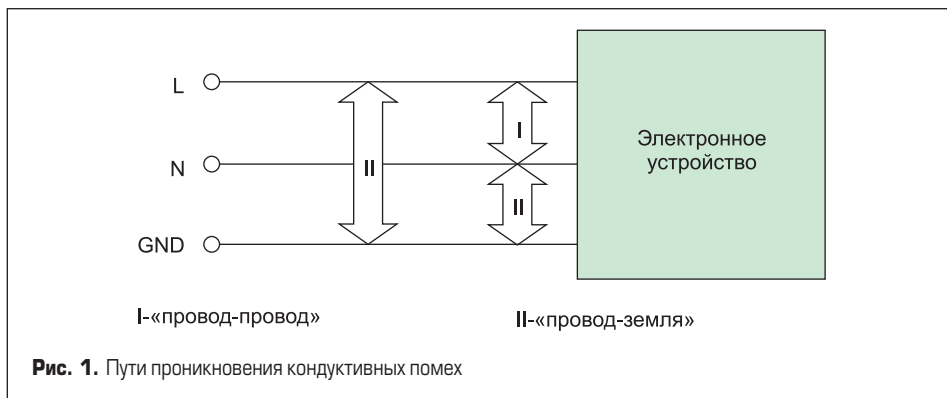


Рис. 1. Пути проникновения кондуктивных помех

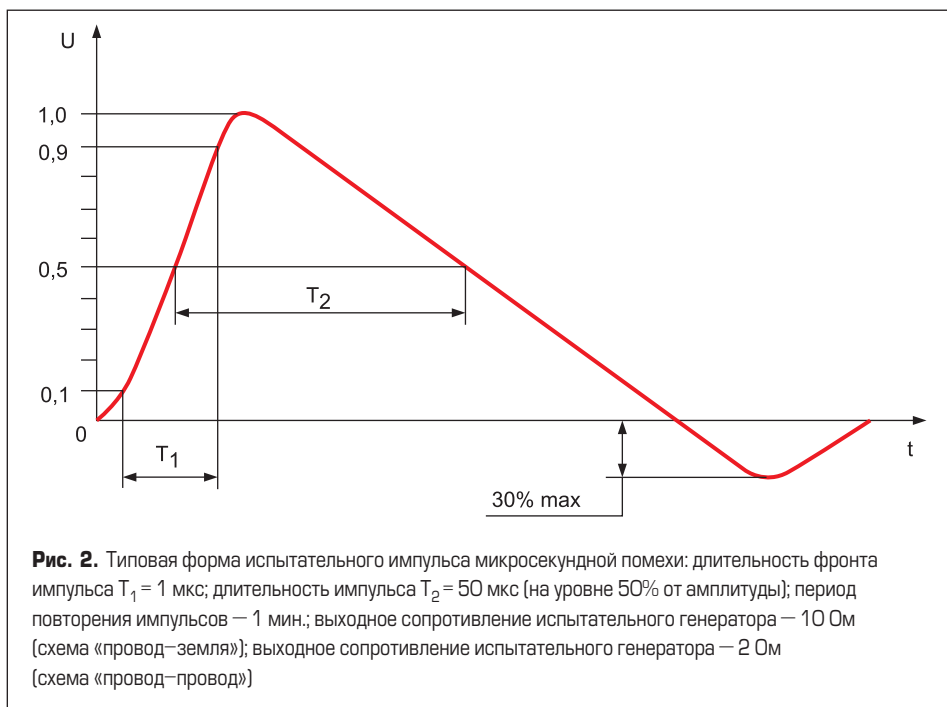


Рис. 2. Типовая форма испытательного импульса микросекундной помехи: длительность фронта импульса $T_1 = 1$ мкс; длительность импульса $T_2 = 50$ мкс (на уровне 50% от амплитуды); период повторения импульсов — 1 мин.; выходное сопротивление испытательного генератора — 10 Ом (схема «провод-земля»); выходное сопротивление испытательного генератора — 2 Ом (схема «провод-провод»)

наиболее опасными ввиду большего значения энергии, которую несет в себе импульс помехи (испытательный импульс, подаваемый по схеме «провод-провод» (I) амплитудой 1 кВ, что соответствует степени жесткости 2, обладает энергией 25 Дж, а МИП, подаваемая по схеме «провод-земля» (II), 5 Дж). Поэтому энергия импульсной помехи, поступающая в электронное устройство по схеме «провод-земля» (II), имеет меньшее значение относительно схемы «провод-провод» (I) из-за различного импеданса данных цепей.

В настоящих исследованиях в качестве МИП, поступающих в электронное устройство, взяты параметры МИП и форма испытательного импульса (рис. 2), регламентируемые [1].

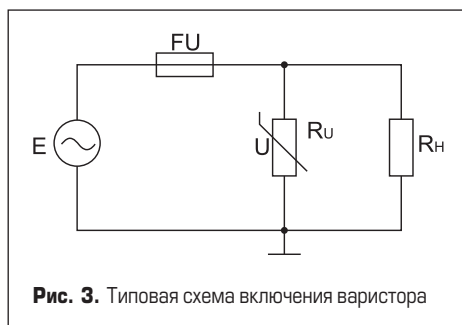


Рис. 3. Типовая схема включения варистора

Современная промышленность выпускает специализированные приборы, называемые устройствами защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП), которые предназначены для защиты электронной аппаратуры от нежелательных воздействий импульсных помех.

На данный момент существует ряд основных подходов к созданию устройств защиты от импульсных помех, а именно: УЗИП либо поглощают энергию, либо отводят ее в цепь

защитного заземления, либо используется комбинация подходов, тем самым обеспечивая более высокий уровень стойкости ЭА.

Как правило, процесс шунтирования импульса помехи на заземление реализуют при помощи различного рода нелинейных компонентов, основным принципом работы которых является уменьшение омического сопротивления при превышении приложенного напряжения выше уровня срабатывания (газоразрядники, варисторы, TVS-диоды, TVS-тиристоры).

Наиболее распространенным и дешевым элементом защиты от импульсных помех такого типа являются металлооксидные варисторы (МОВ), имеющие резко выраженную нелинейную вольт-амперную характеристику, способные уменьшать собственное активное сопротивление при достижении напряжения срабатывания и, соответственно, шунтировать защищаемый объект.

МОВ будет оставаться в высокоомном состоянии, позволяя энергии проходить по обычной схеме до тех пор, пока в линию не поступит напряжение, превышающее напряжение срабатывания МОВ. В результате чего резко увеличивается ток (с единиц миллиампер до сотен ампер), протекающий через варистор, тем самым защищая электронные компоненты устройства от перенапряжения. При этом напряжение, поступающее на оборудование, будет поддерживаться на приемлемом уровне до окончания воздействия помехи.

МОВ часто комбинируют с плавкими вставками (FU), которые размещаются по пути подачи энергии в защищаемое оборудование (рис. 3), чтобы разорвать цепь в случае превышения токового уровня, который способен выдержать варистор. При этом от нагрева перегорит плавкая вставка, которая обычно находится рядом или прикреплена к МОВ. В результате электрическая цепь будет разомкнута и дальнейшее поступление энергии в защищаемое оборудование станет невозможным.

Традиционной схемой защиты от импульсных помех, базирующейся на применении МОВ, является схема так называемого «варисторного треугольника» (рис. 4), которая нашла широкое применение в современных УЗИП.

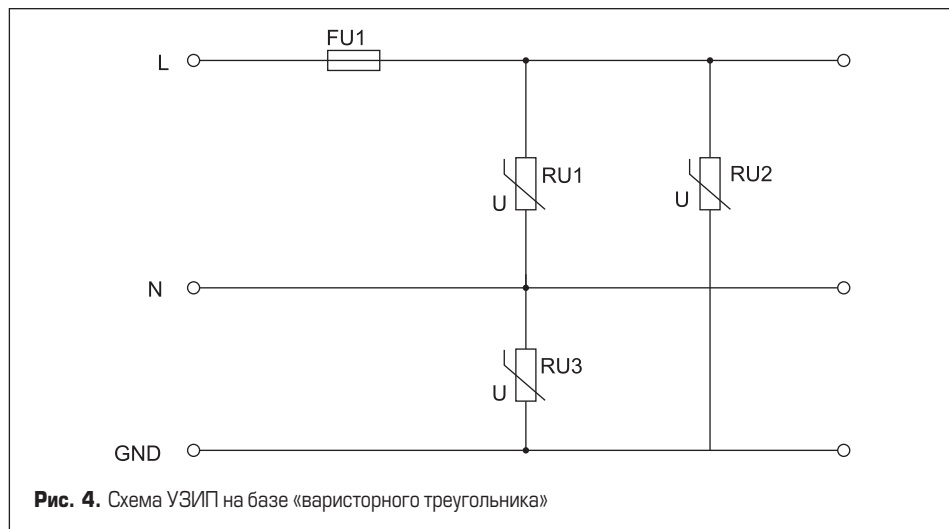


Рис. 4. Схема УЗИП на базе «варисторного треугольника»

Таблица 1. Сравнение элементов защиты от перенапряжений

Элемент защиты	Преимущества	Недостатки	Использование
Газоразрядник	Высокое значение допустимого тока 2,5–150 кА. Низкая емкость (не более 2 пФ). Высокое сопротивление изоляции (более 1 ГОм). Малый ток утечки (менее 10 нА).	Относительно большое время срабатывания, связанное с длительностью ионизации газа. Зависимость напряжения ионизации газа от скорости нарастания напряжения на клеммах.	В качестве первой ступени комбинированной защиты силовых цепей от атмосферных и коммутационных перенапряжений.
Варистор	Малое время срабатывания (10–20 нс). Широкий диапазон рабочих токов и напряжений (3–20 кВ, 0,1 мА–90 кА).	Ограниченный срок службы, напрямую зависящий от мощности и частоты повторения импульсов перенапряжения. Зависимость напряжения срабатывания от протекающего тока.	Первая и вторая ступень комбинированной защиты. Защита силовых цепей и автомобильной электроники. Защита электронных компонентов устройств.
TVS-диод	Низкие уровни ограничения напряжения (единицы вольт). Широкий диапазон рабочих токов и напряжений. Высокое быстродействие (не менее 10^{-12} с). Малая собственная емкость.	Низкое значение номинального импульсного тока (до 200 А). Относительно высокая стоимость.	Для защиты компонентов на печатной плате в оконечной ступени системы комбинированной защиты.
TVS-тиристор	Высокое быстродействие (не менее 10^{-9} с). Большой управляющий ток (до 90 мА).	Ограниченный диапазон рабочих напряжений (до 150 В). Защищаемое устройство шунтируется на заземление после прохождения импульса.	

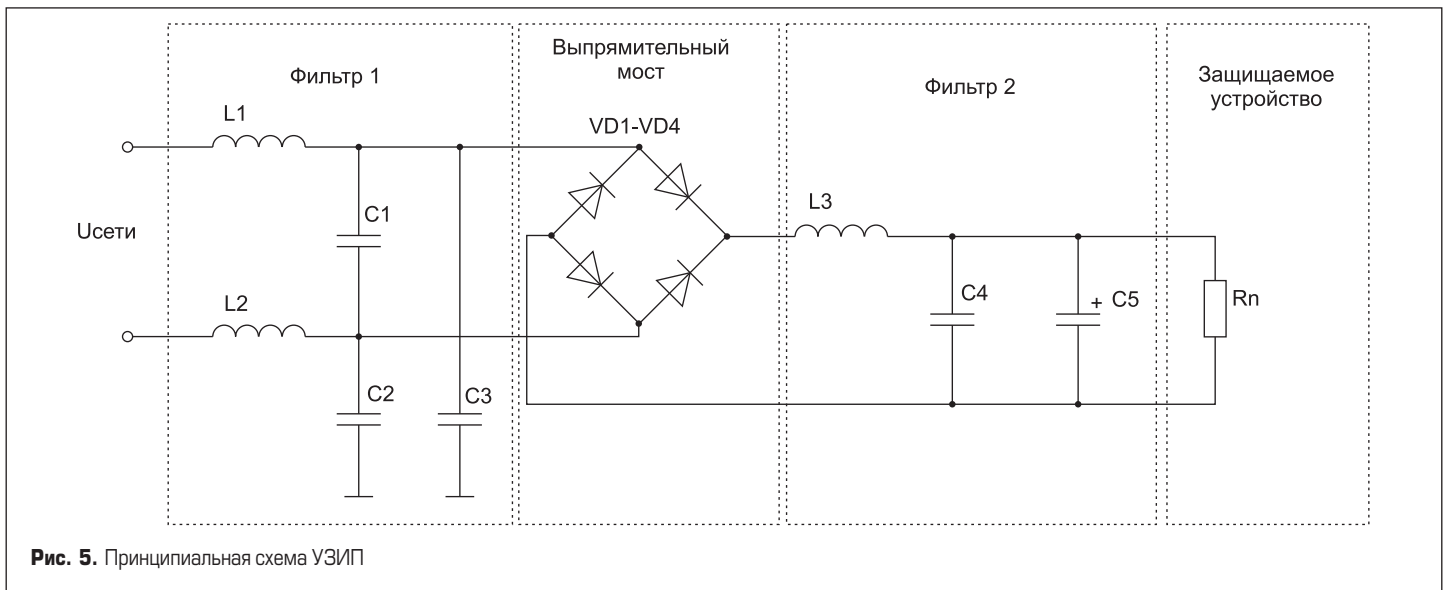


Рис. 5. Принципиальная схема УЗИП

Однако такая схема обладает существенным недостатком, который встает барьером на пути всеобъемлющего ее применения в качестве устройства защиты от высоковольтных импульсных помех, поскольку данное решение является «одноразовым»: после срабатывания плавких вставок требуется вмешательство оператора для их замены. Кроме того, всем полупроводниковым компонентам присущи инерционные свойства. Имеет значение время «реакции», в течение которого защитный элемент изменяет свои электрические свойства для своевременной защиты электронного устройства. В тех же случаях, когда длительность импульса помехи мала по сравнению со временем «реакции» УЗИП, происходит беспрепятственное проникновение импульса помехи в защищаемое устройство.

Кроме того, у варисторов существует предел максимально допустимой энергии, которую он может рассеять в виде тепла. Следует отметить тот факт, что большинство производителей устройств защиты указывают в документации на оборудование значение максимальной поглощаемой энергии помехи. Однако данный параметр не является точным, поскольку он показывает суммарную мощность всех варисторов, входящих в состав УЗИП, и его можно считать неадекватным показателем степени защиты устройства. Так как помеха, как правило, проникает по портам

электропитания устройства по различным направлениям, есть вероятность, что в локальном месте электронной схемы проходящая энергия будет превосходить значение максимальной рассеиваемой энергии расположенного там варистора.

Помимо варисторов, существуют другие виды полупроводниковых ограничителей, которые также обладают всеми вышеперечисленными недостатками, присущими полупроводниковым приборам. В таблице 1 проведено сравнение существующих видов ограничителей, применяемых в сфере защиты электронных устройств.

Проведенные исследования выявили возможность создания нового принципа защиты от импульсных помех, основой которого является использование двухступенчатой защиты устройств преобразовательной техники, питающихся от промышленной сети. При этом в качестве входной цепи используется звено постоянного тока.

На рис. 5 представлена упрощенная функциональная схема предлагаемого УЗИП. Такое устройство состоит из последовательно соединенных фильтра 1 (Ф1), выпрямительного моста, фильтра 2 (Ф2) и защищаемой нагрузки. Фильтр 1 предназначен для обеспечения паспортного режима работы диодов выпрямительного моста, а именно — для формирования необходимых значений dI/dt

и dU/dt . Фильтр 2, состоящий из дросселя L_3 и конденсаторов C_4 , C_5 (причем конденсатор C_4 неполярный, а C_5 электролитический), подключен к выходу силового выпрямителя. Этот фильтр, кроме обеспечения требуемого коэффициента пульсации напряжения (L_3, C_5), является накопителем «быстрой» энергии импульсной помехи (L_3, C_4).

На рис. 6 представлена схема замещения «быстрого» L_3C_4 -фильтра, где r_1 — внутреннее сопротивление испытательного генератора, имитирующего микросекундный импульс напряжения; R_n — сопротивление нагрузки. Такая цепь является звеном второго порядка, в котором при подаче внешнего импульсного воздействия на вход на выходе могут возникнуть колебательные процессы. В соответствии с теорией автоматического управления для такой цепи должен быть проведен анализ передаточной функции на отсутствие колебательных процессов.

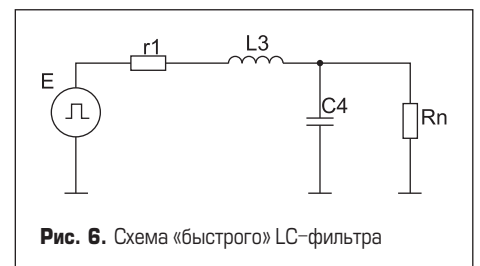


Рис. 6. Схема «быстрого» LC-фильтра

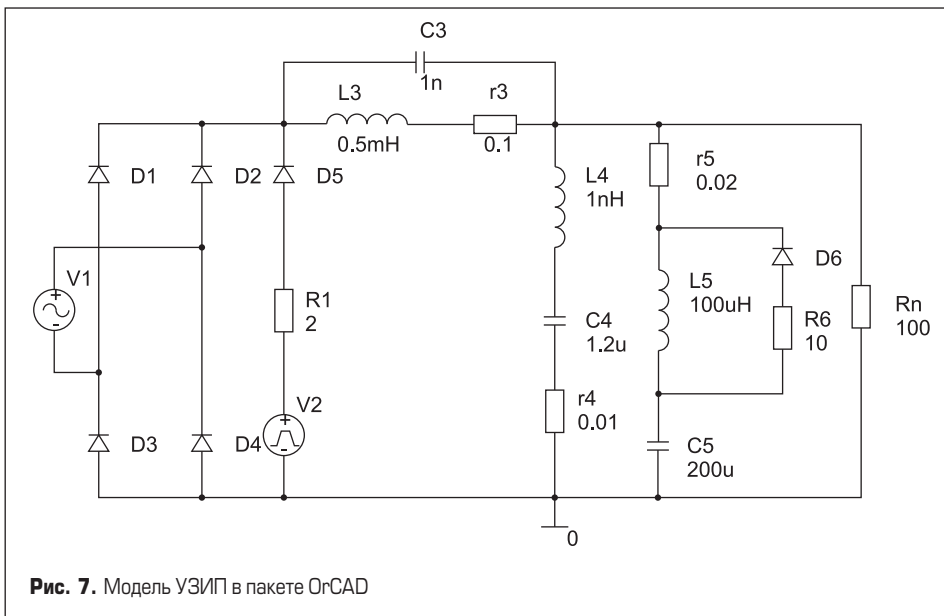


Рис. 7. Модель УЗИП в пакете OrCAD

Передаточная функция «быстрого» L_3C_4 -фильтра имеет вид:

$$W(p) = \frac{k}{T_1^2 + T_2 + 1} = \frac{k}{T_1^2 p + 2\xi T_1 p + 1}$$

где ξ — коэффициент демпфирования; T_1, T_2 — постоянные времени звена; k — коэффициент передачи звена.

Постоянные времени звена и коэффициенты передаточной функции вычисляются по следующим формулам:

$$\xi = \frac{T_2}{2T_1}; T_1 = \sqrt{\frac{R_n LC}{r_1 + R_n}}$$

$$T_2 = \frac{r_1 R_n C + L}{r_1 + R_n}; k = \frac{R_n}{R_n + r_1}$$

Критерием анализа устойчивости данного звена положено, что коэффициент демпфирования должен быть больше либо равным единице ($\xi \geq 1$).

На рис. 7 изображена модель УЗИП, работающего на нагрузку мощностью 600 Вт (при моделировании УЗИП его максимальная мощность принята 600 Вт). В данной модели электролитический конденсатор C_5 , помимо емкости, обладает также собственным сопротивлением и индуктивностью (реактивные параметры электролитического конденсатора приняты усредненными).

В таблице 2 приведены параметры элементов схемы замещения УЗИП.

Параметры элементов фильтра выбраны таким образом, чтобы выброс напряжения на нагрузке не превысил значения 500 В при положительной амплитуде МИП величиной 1 кВ (рис. 8) при воздействии импульса помехи в момент времени, соответствующий максимальному мгновенному значению питающего синусоидального напряжения (в соответствии с п. 8.2 ГОСТ [1]).

Процессы, происходящие в «быстром» L_3C_4 -фильтре, имеют следующую последовательность (рис. 9): ток дросселя в момент поступления импульса начинает возрастать

Таблица 2. Параметры элементов схемы замещения УЗИП

Обозначение элемента	Назначение	Номинал
V_1	Источник синусоидального напряжения	$U = 220 \text{ В}, f = 50 \text{ Гц}$
V_2	Генератор микросекундной импульсной помехи (МИП)	$U_A = 1 \text{ кВ}, T_7 = 50 \text{ мкс}$
D_1, D_2, D_3, D_4	Диоды выпрямительного моста	идеальные
D_5	Вспомогательный диод, предотвращающий попадание энергии сети в генератор микросекундной помехи	
D_6	Диод демпфирующей $R_6 D_6$ -цепи	
R_6	Резистор, имитирующий внутреннее сопротивление источника импульсной помехи) регламентирующий вид испытаний («провод-провод» по ГОСТ Р 51317.4.5-99)	
r_3	Внутреннее сопротивление дросселя L_3	0,1 Ом
r_4	Внутреннее сопротивление неполярного конденсатора C_4	0,01 Ом
r_5	Внутреннее сопротивление электролитического конденсатора C_5	0,02 Ом
R_n	Резистор демпфирующей $R_6 D_6$ -цепи	10 Ом
R_n	Активное сопротивление нагрузки	100 Ом
L_4	Эквивалентная последовательная индуктивность неполярного конденсатора C_4	1 нГн
L_5	Эквивалентная последовательная индуктивность электролитического конденсатора C_5	100 мкГн
L_3	Индуктивность	0,5 мГн
C_4	Емкость неполярного конденсатора	1,2 мкФ
C_5	Емкость электролитического конденсатора	200 мкФ

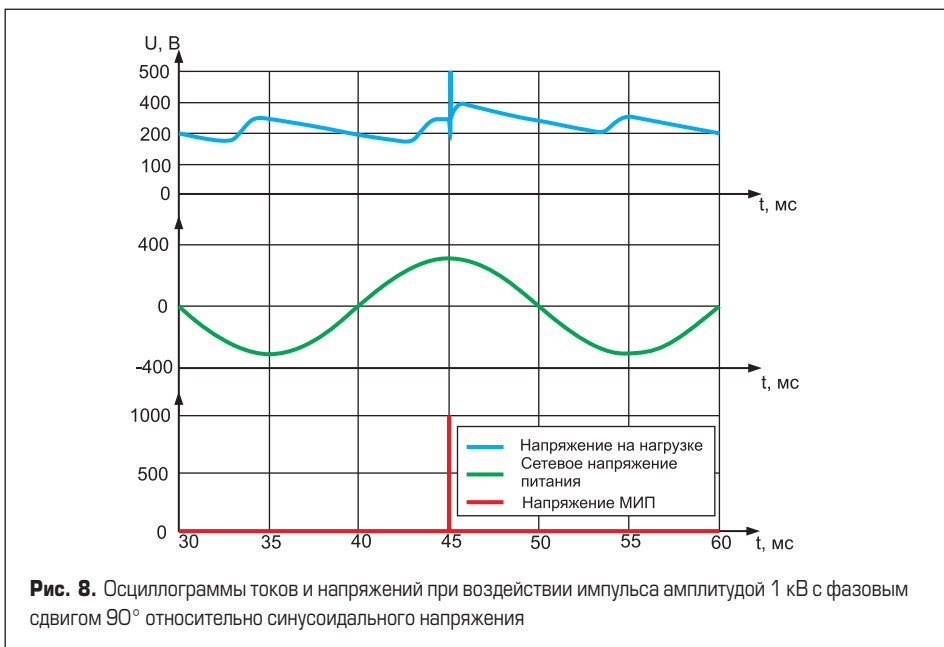


Рис. 8. Осциллограммы токов и напряжений при воздействии импульса амплитудой 1 кВ с фазовым сдвигом 90° относительно синусоидального напряжения

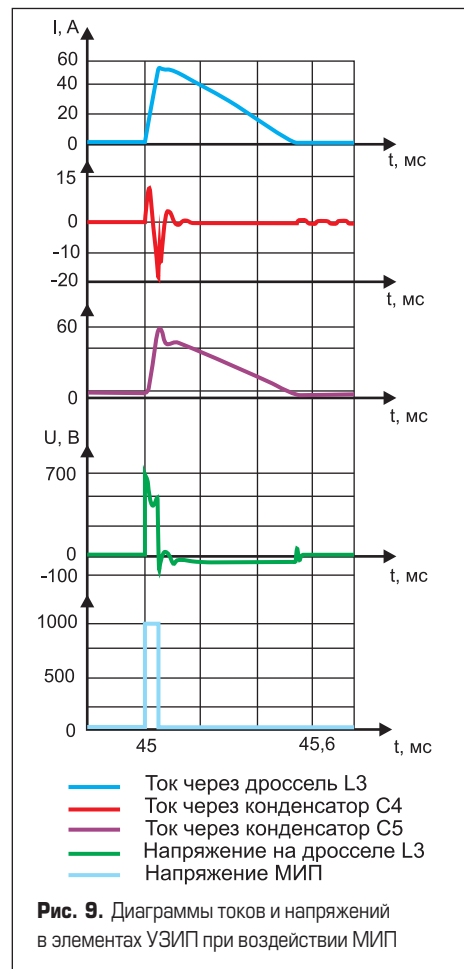


Рис. 9. Диаграммы токов и напряжений в элементах УЗИП при воздействии МИП

по линейному закону, а переменная составляющая тока дросселя начинает протекать через конденсатор (C_4); в момент окончания внешнего воздействия (окончания импульса помехи) ток через дроссель, а следовательно, и через конденсатор (C_4), начинает спадать до исходного значения.

Электролитический конденсатор (C_5), подключенный параллельно неполярному конденсатору (C_4) из-за наличия эквивалентной последовательной индуктивности ($l_{вн}$) не действует в момент воздействия импульсной помехи.

После окончания МИП энергия, накопленная в конденсаторе C_4 , передается в конденсатор C_5 , который со своей постоянной времени впоследствии разряжается на сопротивление нагрузки.

Заключение

Фильтр 1, кроме формирования скорости нарастания напряжения, выполняет функцию блокирования эмиссии помех от электронного устройства в сеть, это вовсе не «лишний узел», его присутствие необходимо с позиций электромагнитной совместимости. Фильтр 2 при отсутствии импульсной помехи исполняет роль сглаживающего фильтра (L_3C_5) электронного устройства. При воздействии помехи «быстрый» фильтр (L_3C_4) демпфирует импульс помехи до допустимых значений. При этом суммарная величина емкости «быстрого» и сглаживающего фильтров незначительно

увеличивается по отношению к сглаживающему фильтру, который был бы установлен в данной системе для обеспечения требуемого коэффициента пульсаций.

Подобный УЗИП может использоваться в любой системе питания ЭА, которой необходимо выдерживать внешние импульсные воздействия большой энергии, так как защитное устройство такого типа повысит общий уровень стойкости ЭА к высоковольтным импульсным помехам за счет двухуровневого принципа аккумулирования энергии помехи и незначительного превышения установленной мощности входного выпрямителя.

Литература

1. ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний». <http://vsegost.com/Catalog/18/18623.shtml>
2. Болотовский Ю. Б., Таназлы Г. И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга. М: Солон-Пресс. 2005.
3. Лебедев Ю. М., Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: Учебное пособие. Томск: ТУСУР. 2003.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. Учебник для студентов электротехнических и приборостроительных специальностей вузов. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. 1978.