

Подавление импульсных помех

в бортовых сетях электропитания постоянного напряжения

Электромагнитные импульсы могут вызывать в цепях постоянного и переменного тока высоковольтные импульсные перенапряжения обеих полярностей весьма значительной величины — до 1–6 кВ, что может вызвать выход из строя питаемой аппаратуры. Появление этих импульсов обусловлено грозовыми разрядами, коммутационными переходными процессами, а также преднамеренными силовыми электромагнитными деструктивными воздействиями. Для обеспечения устойчивости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию импульсных перенапряжений применяются разнообразные устройства защиты. В данной статье рассматриваются некоторые способы ограничения бросков напряжения в первичной сети постоянного тока автономных объектов до безопасных для электронной аппаратуры уровней. Несмотря на то, что эти концепции являются универсальными, здесь они сформулированы конкретно для гибридно-пленочных DC/DC-преобразователей Interpoint на основе рекомендаций специалистов компании [1] с дополнительными комментариями по общим проблемам защиты технических средств от импульсных перенапряжений.

Виктор Жданкин

victor@prosoft.ru

Требования к высоковольтным импульсным перенапряжениям на шине питания являются вопросом, к которому необходимо обратиться в начале проектирования электронной аппаратуры, а не на более поздних этапах. Если перенести решение этой проблемы на более поздний период, то может быть недостаточно возможностей для хорошего

решения, и придется затрачивать дополнительные временные и финансовые ресурсы на доработку аппаратуры. Когда подходит время проектирования аппаратуры, должны быть заданы два очень важных вопроса:

- Каков импеданс источника импульсных помех? Следует осведомиться об обеих частях комплекса

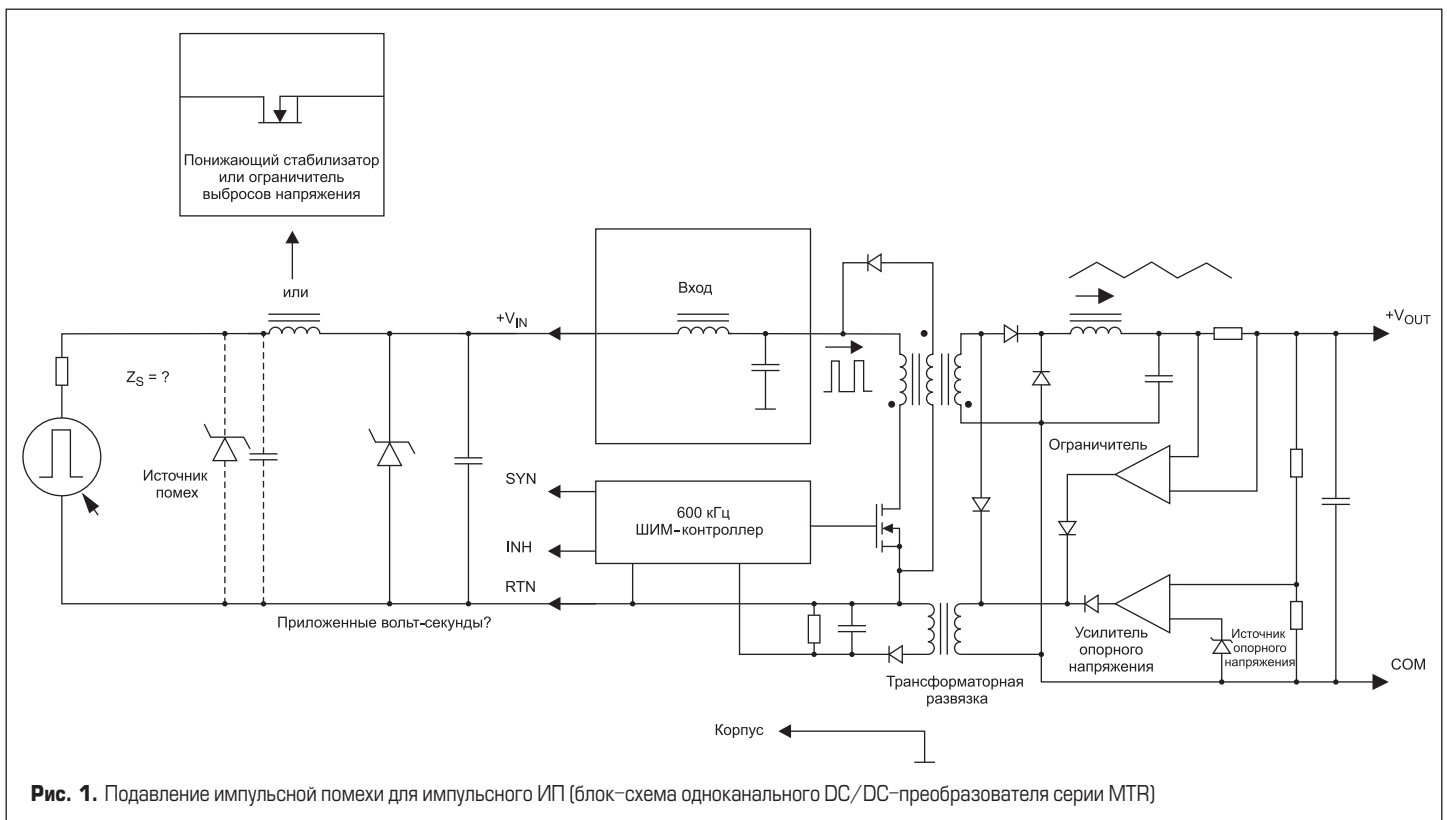


Рис. 1. Подавление импульсной помехи для импульсного ИП (блок-схема одноканального DC/DC-преобразователя серии MTR)

сопротивления Z — вещественной и мнимой.

- Каково значение вольт-секунд прикладываемой импульсной помехи? Размеры дросселя определяются вольт-секундами, приложенными к дросселю, при наихудшем варианте.

В том случае, когда ответом является большой импеданс источника и небольшие приложенные вольт-секунды, проблема может быть решена просто. Если же значения приложенных вольт-секунд значительное, а импеданс источника низкий (обычный случай), способ решения будет более сложным.

Все нижеследующее относится к системе электропитания постоянного тока 28 (27) В летательных аппаратов и других автономных объектов, где могут возникать импульсные помехи положительной полярности в пределах диапазона 35–50 В, тогда как максимальная нормированная величина длительной помехи для большей части преобразователей напряжения Interpoint составляет 50 В. Для преобразователей, у которых допускается переходное отклонение входного напряжения 80 В длительного действия (до 1 с), ослабление отклонения до пределов, скажем, менее чем 70 В должно быть безопасным, но отклик на выходе источника питания (ИП) может потребовать меньшего предельного значения.

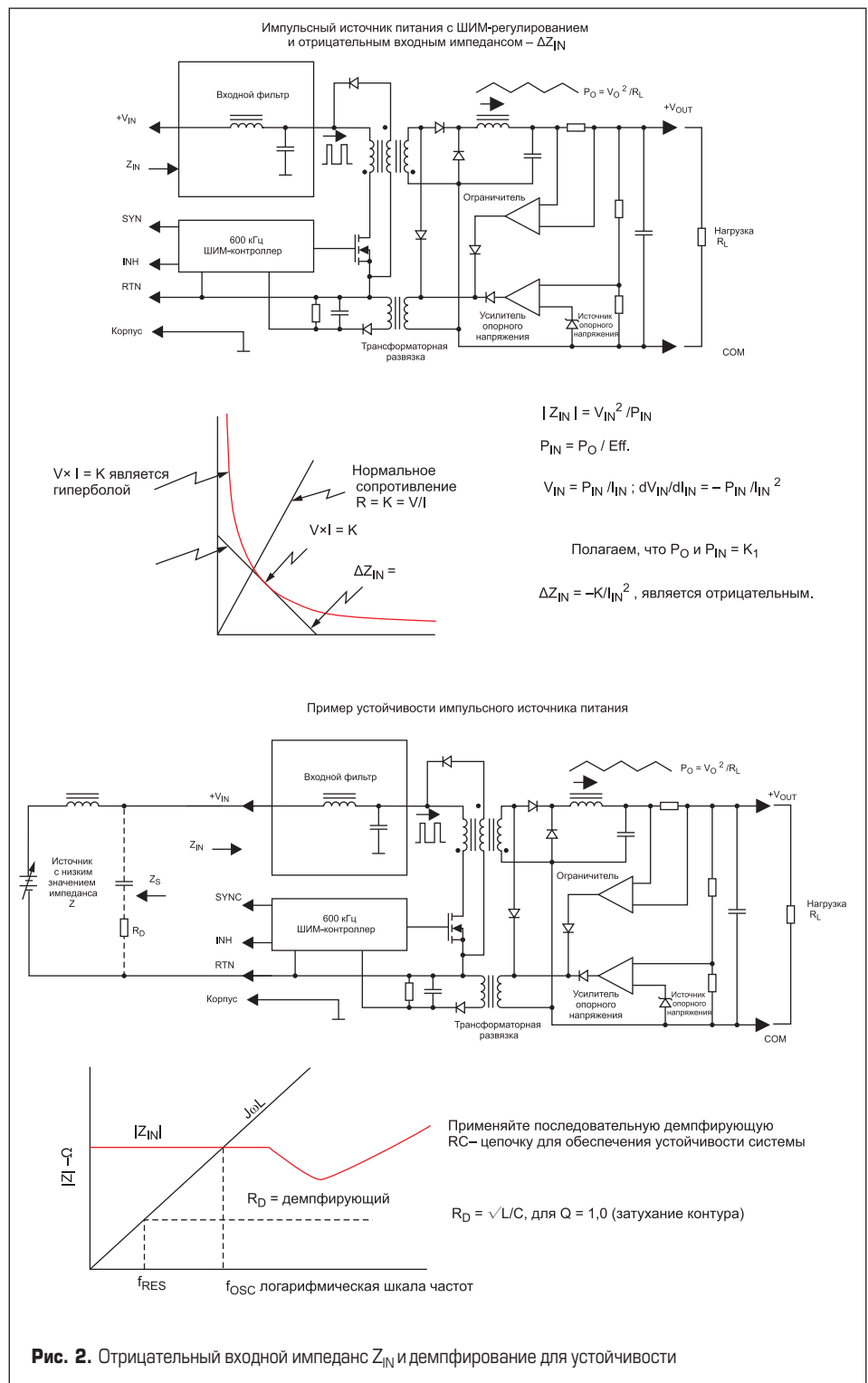
Далее перечислены средства, доступные для подавления переходных напряжений:

1. Полупроводниковые защитные диоды (Transient Voltage Suppressor, TVS), металлооксидные варисторы (Metal Oxide Varistor, MOV), газонаполненные разрядники. Это так называемые «средства грубой силы», но наиболее простые, дешевые и надежные элементы для защиты от импульсных перенапряжений. Все эти элементы имеют различные вольт-амперные характеристики, различные возможности по поглощению энергии электромагнитного импульса и различное быстродействие.
2. Шунтирующие конденсаторы. Используются при высоком импедансе Z источника помех.
3. Последовательный дроссель для ограничения изменений тока di/dt .
4. Импульсный понижающий стабилизатор для более длительных импульсных помех с более низким напряжением.
5. Ограничитель выбросов напряжения — последовательный регулятор, который открывается, чтобы принимать помеху и поддерживать во время действия помехи входное напряжение в ИП, равное 40 В.
6. Комбинация упомянутых выше методов 1, 2 и 3.

На рис. 1 представлена функциональная схема импульсного ИП с некоторыми различными средствами подавления импульсных помех, показанных на его входе. ИП имеет дифференциальное отрицательное сопротивление, которое должно быть принято во внимание, прежде чем включать последовательно со входом какую-либо ограничивающую схему. Входной импе-

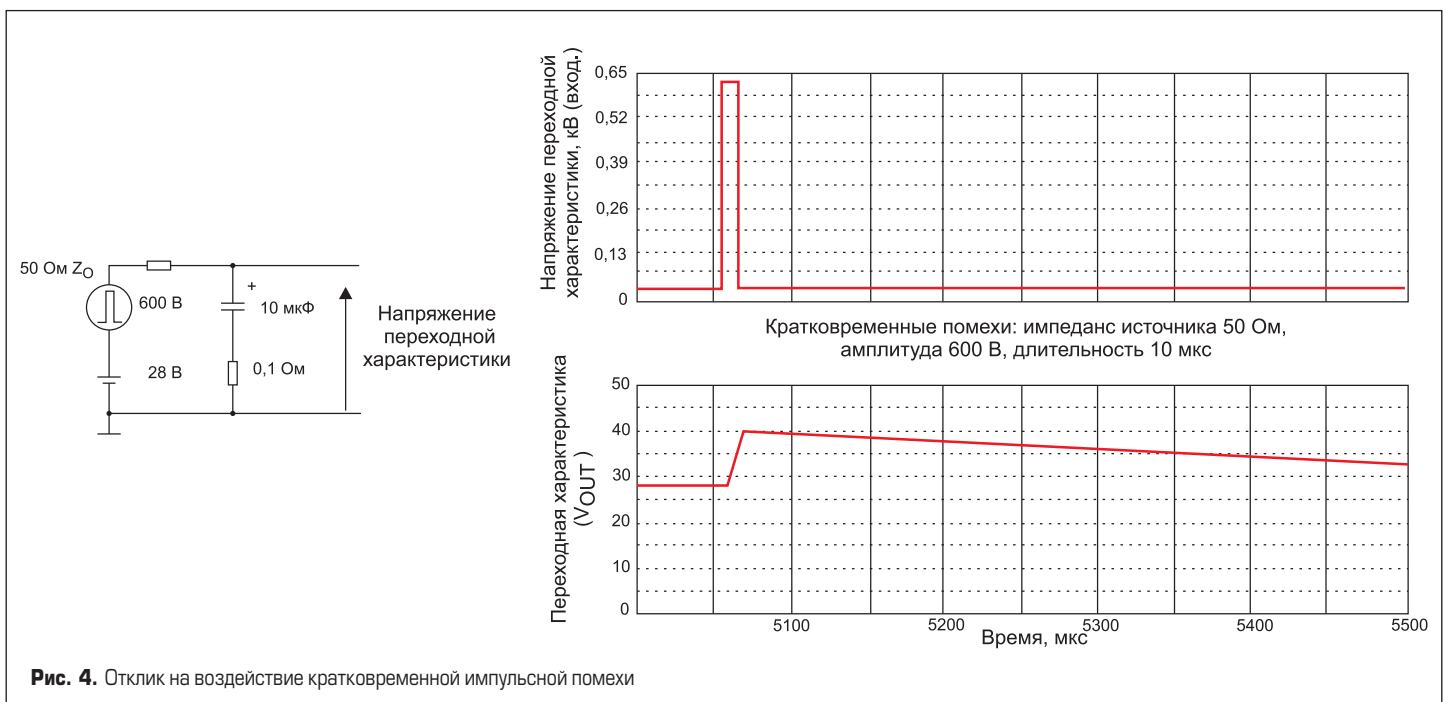
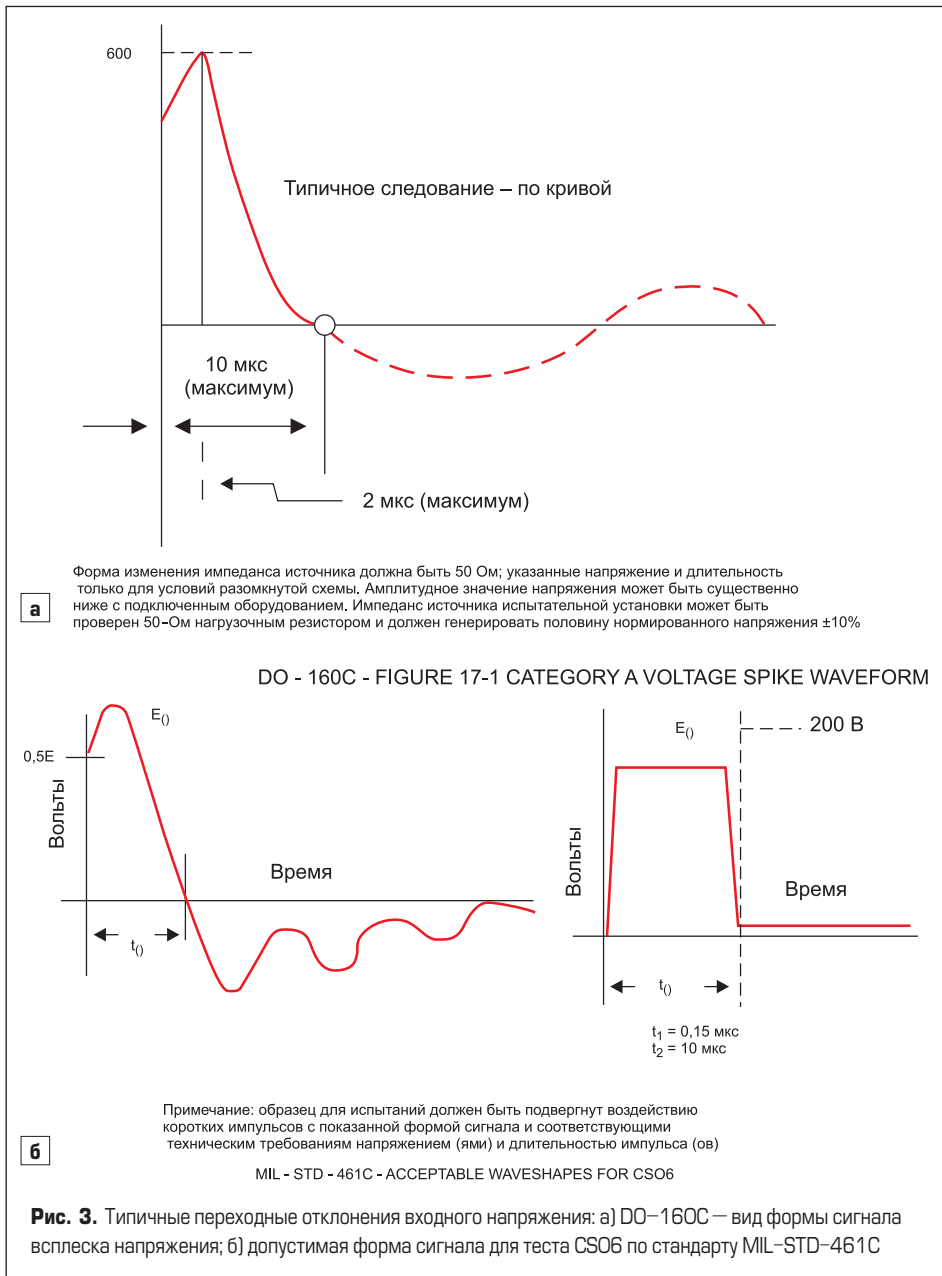
данс Z является отрицательным вследствие постоянной входной мощности при постоянной нагрузке и является функцией напряжения сети: при снижении входного напряжения входной ток имеет положительное приращение. Просто определенная постоянная величина $V_{IN} \times I_{IN} = K$ при постоянной нагрузке, и входной ток $I_{IN} = K/V_{IN}$. Уменьшающийся входной ток при повышающемся входном напряжении описывает гиперболу, наклон в рабочем режиме принимает отрицательное значение Z . Входной ток имеет наибольшее значение при минимальном напряжении сети и входной импеданс Z , минимальный в этой рабочей точке. Для устойчивой работы импеданс

ИП, располагающегося перед любой схемой подавления помех, должен быть меньше импеданса импульсного ИП при минимальном напряжении сети и во всей полосе пропускания контура управления, включая частоту коммутации модуля. Можно порекомендовать проконсультироваться со специалистами Interpoint, прежде чем принимать окончательное решение об использовании какой-либо схемы ограничительной цепи. Некоторая дополнительная информация содержится также на рис. 2. В частности, рекомендация ввести в схему демпфирующую $R_D C_D$ -цепочку для ослабления влияния резонанса позволяет снизить напряжение на конденсаторе при резонансе.



Кратковременные импульсные помехи

На рис. 3 представлено несколько типичных форм сигналов импульсных помех, взятых из стандартов DO-160C Environmental Conditions and Test Procedure for Airborne Equipment и MIL-STD-461C Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipments. Верхняя часть формы сигнала является аппроксимированным демпфированным полусинусоидальным импульсом с пиковым значением 600 В и полупериодом 10 мкс. Импеданс 50 Ом источника обеспечивает возможность его подавления шунтирующим конденсатором или полупроводниковым ограничителем напряжения, включенным параллельно 28-В шине питания. В любом из двух случаев пиковое значение ограниченного тока не превысит 12 А (600 В/50 Ом). Для упрощения используется 600-В прямоугольный импульс; конденсатор емкостью 10 мкФ с низким значением эквивалентного последовательного сопротивления (Equivalent Series Capacitance, ESR), размещенный в качестве шунта на шине, ослабит пиковую переходную характеристику до ≈ 12 В при максимальном значении напряжения на 28-В шине питания. Постоянная времени RC-цепочки будет равной произведению $50 \times$ длительность импульсной помехи, следовательно, реакция есть 2% от импульсной помехи плюс падение на ESR конденсатора. Обратимся к схеме и графикам, представленным на рис. 4. Полупроводниковый ограничитель напряжения будет также работать вместо или совместно с конденсатором. Подходящим устройством для поверхностного монтажа является полупроводниковый ограничитель напряжения SMCJ30A от компании Vishay General Semiconductor или STMicroelectronics. Это устройство будет фиксировать уровень напряжения на шине приблизительно на 40 В или ниже, а также



пропускать ток в импульсе 200 А за 1/120 с при прямом смещении, что полезно для подавления отрицательных помех, если это имеет место. Альтернативно для устранения отрицательного импульса может применяться диод, включенный последовательно с линией положительного напряжения шины.

В качестве элементов, ограничивающих напряжение импульсов, наибольшее распространение получили варисторы и полупроводниковые защитные диоды. Все эти компоненты имеют различные вольт-амперные характеристики, различные возможности по поглощению энергии электромагнитного импульса, определяемые, в основном, теплоемкостью и предельной температурой компонента, различное быстроедействие, габариты и стоимость.

Полупроводниковые защитные диоды имеют весьма высокое быстроедействие (до 1 пс) и пропускают большие токи в импульсе, при этом мощность, рассеиваемая диодом в импульсе, может достигать 1,5 кВт и более. Однако защитные диоды обладают малой теплоемкостью и относительно низкой предельной температурой кристалла, что обуславливает сравнительно небольшую энергию, которую он может поглотить без разрушения (не более единиц-десятков джоулей). Конструкции на основе сборок полупроводниковых ограничителей напряжения (ПОН) позволяют увеличить рассеиваемую мощность до 150 Дж [2], но основным недостатком такого решения является высокая стоимость и сложность изготовления. Однако альтернативный вариант с одним варистором является более дешевым и более простым конструктивно.

Металлооксидные варисторы имеют быстроедействие несколько хуже защитных

диодов (до 25 нс), пропускают также значительные импульсные токи и могут поглотить значительно большую энергию — до нескольких тысяч джоулей (в зависимости от размеров варистора), но из-за большего дифференциального сопротивления уровень ограничения существенно зависит от значения импульсного тока, протекающего через элемент. Применение варисторов является более дешевым вариантом ввиду их низкой стоимости. Более подробно рекомендации по выбору устройств защиты компонентов схем — варисторов и полупроводниковых защитных диодов — представлены в [3]. О применении варисторов в составе защитного (по перенапряжению) оборудования, об их характеристиках, порядке выбора конкретного устройства и о применении комбинации из нескольких защитных элементов подробно написано в [4]. Выбор варисторов для подавления высоковольтных импульсов на входе модулей электропитания в бортовой сети 27 В описан в [5]. Необходимо обратить внимание, что при выборе ограничительных элементов следует учитывать параметры конкретных модулей питания (особенно важно значение переходного отклонения напряжения и его длительность, на которое рассчитан модуль питания, и его длительность: от этого в значительной степени зависит формирование схемы защиты).

Источник помехи, представленный на рис. 3, взятый из стандарта MIL-STD-461С, имеет низкий импеданс Z и будет сложнее для ослабления, чем в предыдущем случае. Если не определено иным образом, импеданс источника Z должен быть предположен равным нулю. При испытании часто допускается зна-

чение 0,5 Ом. Для целей анализа применяется значение 0,1 Ом.

Прямоугольный импульс помехи с амплитудой 200 В и длительностью 0,15 мкс может быть ограничен керамическим конденсатором с низким ESR или полупроводниковым ограничителем напряжения. Ток помехи в линии, тем не менее, может быть весьма значительным. Добавление последовательно небольшой индуктивности уменьшит ток до контролируемого уровня. Так как помеха, в основном, прикладывается к индуктивности, скорость, с которой будет повышаться ток, — V/L , где V — пиковое напряжение помехи, L — индуктивность в Гн; скорость имеет размерность А/с. В том случае, когда пиковый ток ограничен до 10 А, индуктивность = $Vt/10$ или более, где t — длительность импульса 0,15 мкс. В таком случае вычисленное значение индуктивности будет составлять 3 мкГн. Один из двух — или шунтирующий конденсатор, или полупроводниковый ограничитель напряжения — может быть использован для работы совместно с небольшим дросселем. В этом случае будет использоваться конденсатор емкостью 10 мкФ, формирующий с дросселем резонансный контур. На основе затухания контура $Q = 1$, суммарное гасящее сопротивление последовательно с L и C должно быть $= \sqrt{L/C} = 0,55$ Ом, чтобы минимизировать импеданс управляющего входа. Резистор 0,5 Ом добавлен последовательно с конденсатором 10 мкФ и включает его эквивалентное последовательное сопротивление (ESR). Модели схемы и результаты представлены на рис. 5 и 6. Отметим, что на воздействие

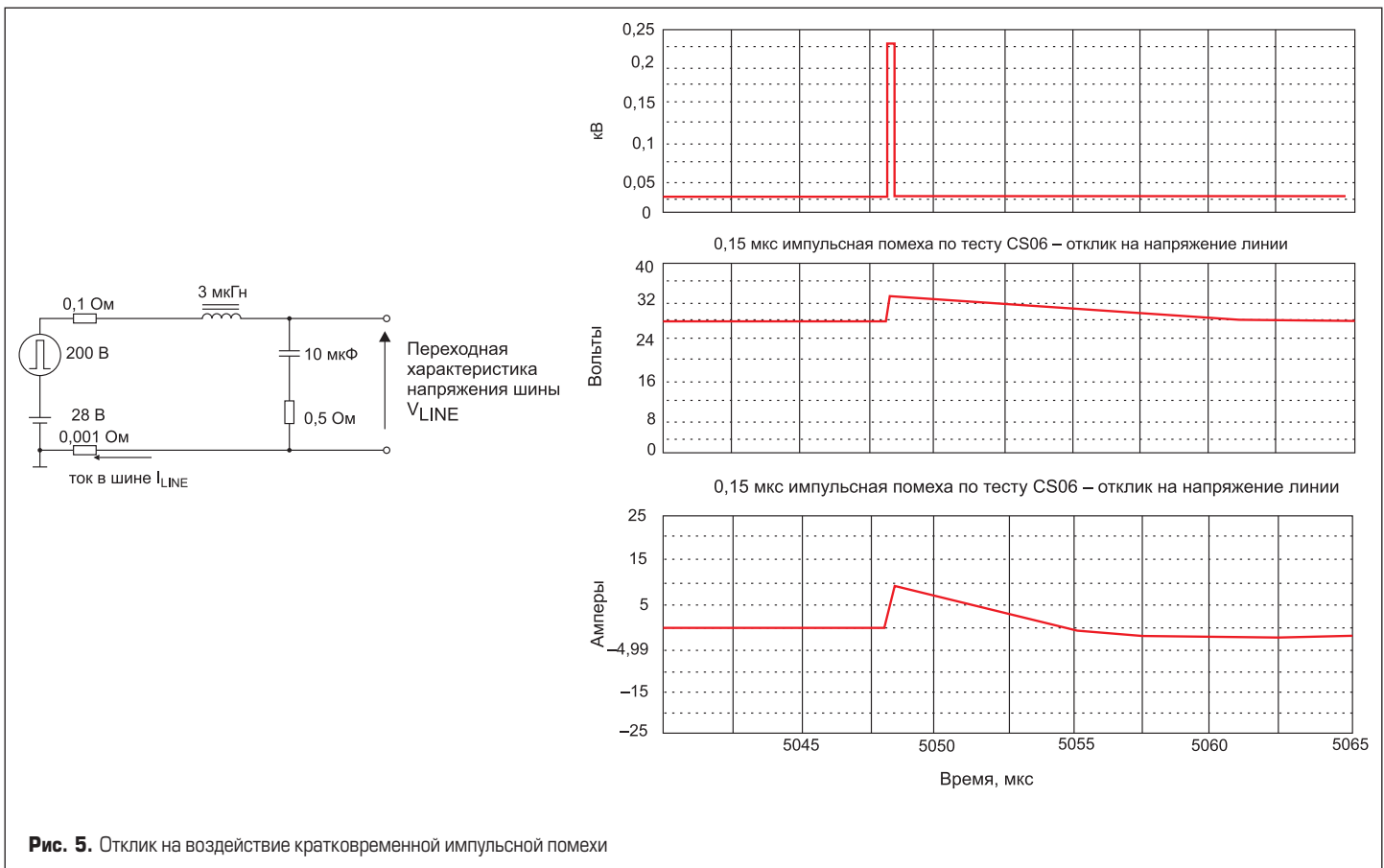


Рис. 5. Отклик на воздействие кратковременной импульсной помехи

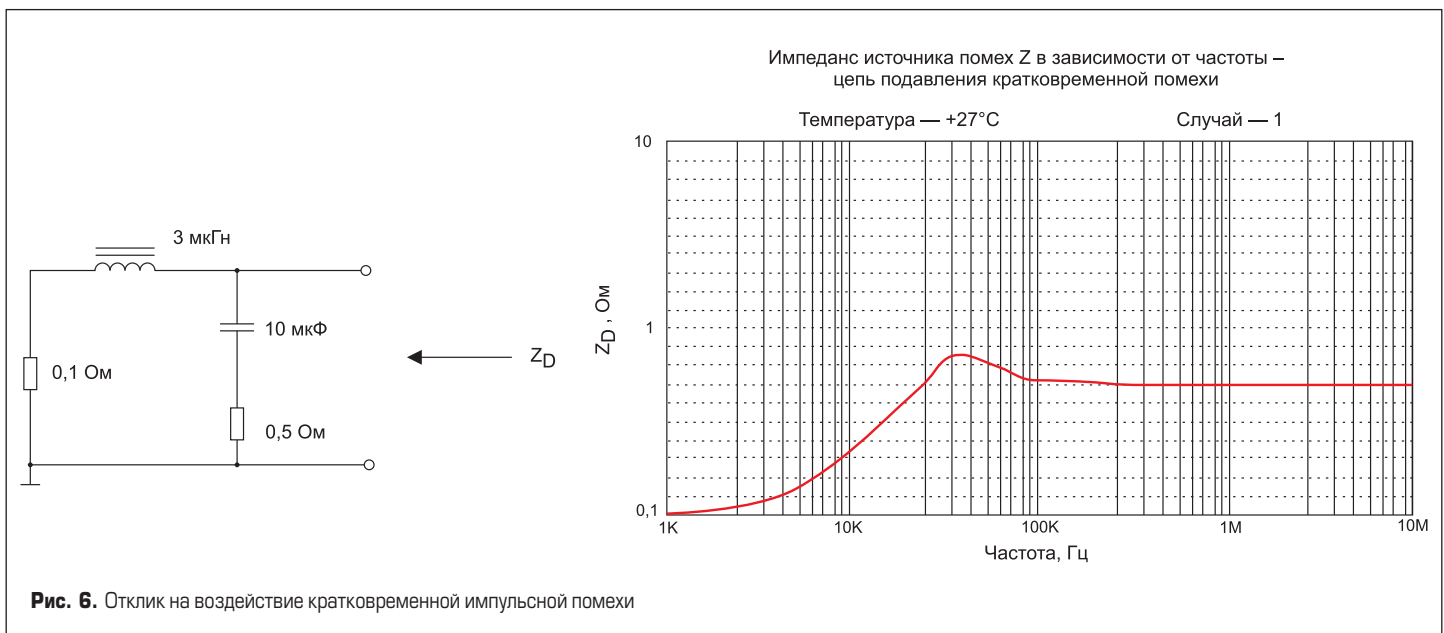


Рис. 6. Отклик на воздействие кратковременной импульсной помехи

200-В кратковременной импульсной помехи отклик на выходе схемы повышается до всего лишь ≈ 34 В (средний график).

Дроссель должен выдерживать не только ток помехи, но также нормальный ток нагрузки. Пример конструкции на кольцевом сердечнике, изготовленном на основе сплава алюминия с железом (состав: 6% алюминия, 9% кремния и 85% железа) Kool Mц диаметром 10,16 мм, который имеет значительно более низкий уровень потерь, чем сердечники на основе распыленного железа, пропускает ток 20 А при плотности магнитного потока приблизительно 80% от насыщения. Дроссель имеет семь витков провода диаметром 0,644 мм (#22AWG) с сопротивлением постоянному току приблизительно 0,006 Ом при +23 °С. Заказной номер сердечника фирмы Magnetics Inc. 77040-A7. Формулы для индуктивности и плотности магнитного потока представлены далее для тех, кто желает проверить это самостоятельно:

$$L = 4\pi\mu AN^2 \times 10^{-7} / l,$$

где: A — площадь поперечного сечения, м²; l — длина линии магнитной индукции, м; μ — магнитная проницаемость; N — число витков; I — максимальный ток дросселя, А;

$$B = 4\pi\mu NI \times 10^{-3}.$$

Единицы измерения индуктивности — Гн, а плотности магнитного потока — Гс (гауссы).

Высокая индукция насыщения (1,05 Тл) в сочетании с невысокой стоимостью делают использование сердечников Kool Mц (или в обозначениях у других производителей Sendust cores), в большинстве случаев, значительно более предпочтительным, чем сердечников на основе прессованного молибденового пермаллоя, также известного под названием Мопермаллоя, тем более, что высокое содержание никеля (2% молибдена, 81% никеля и 17% железа) делает его самым дорогим из порошковых сердечников. Благодаря наличию распределен-

ного немагнитного зазора все виды порошковых сердечников допускают работу с подмагничиванием постоянным током, или переменным током низкой частоты, или постоянной составляющей несимметричного переменного или пульсирующего тока. Сердечники Kool Mц несколько хуже держат подмагничивание постоянным током по сравнению с сердечниками из других магнитоэлектриков [6, 7].

Импульс помехи с амплитудой 200 В и длительностью 10 мкс потребует использования гораздо большего дросселя в том случае, когда использован вышеупомянутый способ ограничения. Если необходимо ограничить ток помехи, например до уровня 20 А, тогда значение индуктивности дросселя должно быть минимум 100 мкГн. Здесь будет использоваться полупроводниковый защитный диод для ограничения напряжения сети и выбран конденсатор 47 мкФ для установки импеданса задающего входа до значения менее чем 2 Ом. Вычисленный из формулы $\sqrt{L/C}$ демпфирующий резистор равен 1,4 Ом. Графики переходной характеристики и импеданс Z управляющего входа представлены на рис. 7 и 8. Полупроводниковый защитный диод срабатывает при напряжениях выше 39 В и имеет динамическое сопротивление 0,5 Ом. Подобная модель ограничителя напряжения для поверхностного монтажа — SMLJ30A. В том случае, когда импеданс Z управляющего входа должен быть меньше, необходимо увеличить шунтирующий конденсатор и пересчитать демпфирующий резистор. Например, если емкость конденсатора увеличить до 470 мкФ, значение импеданса Z управляющего входа может быть уменьшено до значения $< 0,5$ Ом, а полупроводниковый ограничитель напряжения может быть исключен.

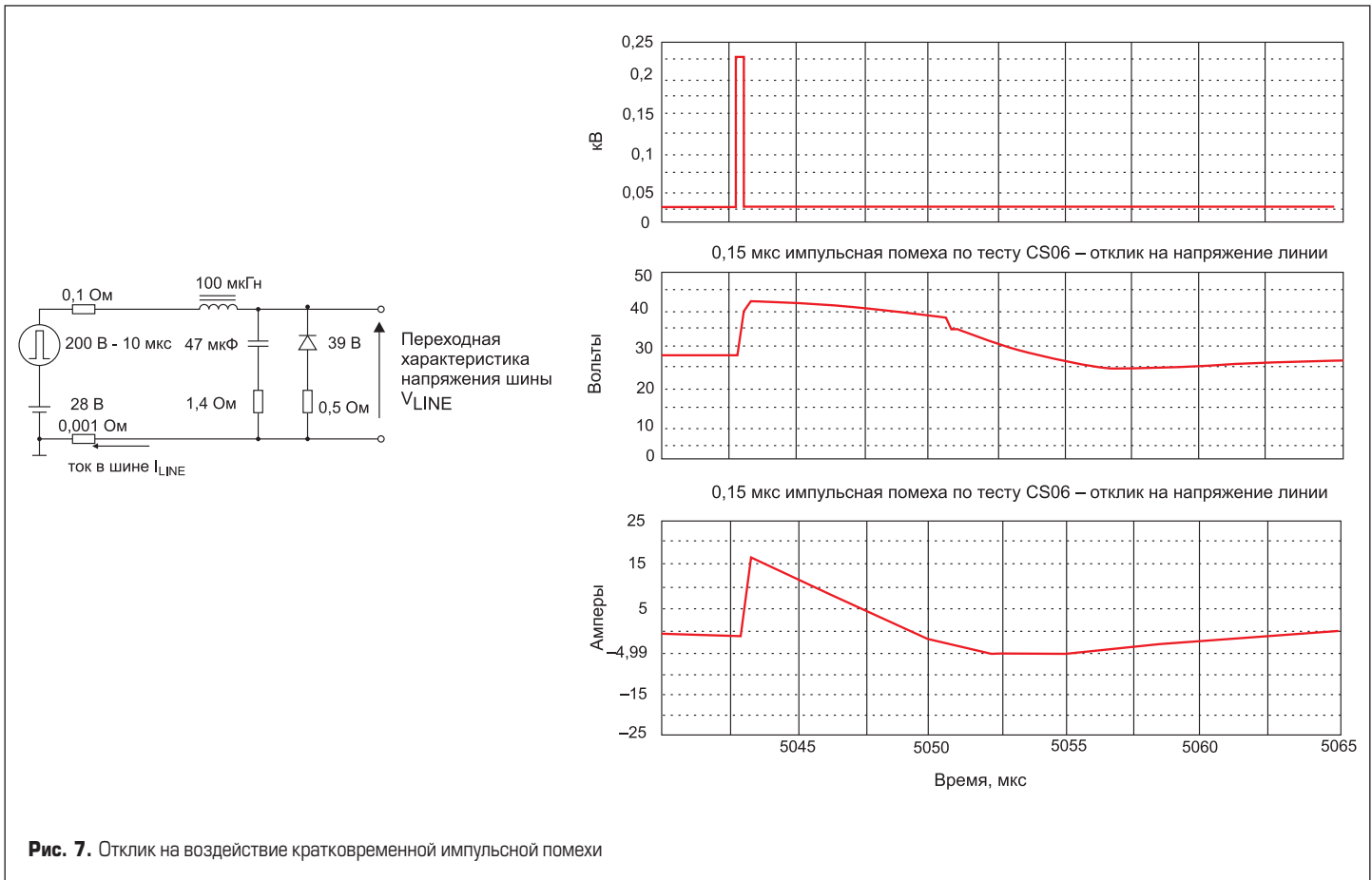
В этом примере через дроссель может протекать ток 30 А: 10 А — при нормальном режиме работы, и дополнительные 20 А — при подавлении импульсного перенапряжения. Дроссель намотан на тороидальном (кольцевом) сердечнике из сплава алюминия с желе-

зом Kool Mц 19 витками провода диаметром 2,3 мм (#11AWG) с сопротивлением приблизительно 0,005 Ом при температуре +23 °С. Номер кольцевого сердечника с внешним диаметром 47 мм и высотой 18 мм в обозначении компании Magnetics Inc. — 77438-A7. Дроссель может быть использован в 150-Вт системе, где максимальное значение рабочего тока > 5 А при 28 В и 10 А — при низком напряжении на шине.

Для менее мощных систем, где нормальное значение рабочего тока менее чем, скажем, 1,5 А при напряжении шины 28 В, дроссель может быть немного меньше. В том случае, когда переходной ток ограничен до < 5 А, тогда значение последовательно включенной индуктивности становится равным 400 мкГн или больше. Если емкость конденсатора остается равной 47 мкФ, оптимальное значение демпфирующего резистора становится равным 2,8 Ом. Переходная характеристика почти такая же, как на рис. 7, за исключением меньших амплитуд. Импеданс Z управляющего входа (источник помехи) приблизительно 4 Ом на резонансном пике и 2,8 Ом впоследствии.

Последовательный дроссель имеет 51 виток провода 0,644 мм (#22 AWG) с сопротивлением 0,102 Ом при температуре +23 °С. Кольцевой сердечник с диаметром 27 мм и высотой 11,2 мм из сплава алюминия с железом Kool Mц 77930-A7. Это меньше, чем в предыдущем случае, но может быть больше, чем желаемо. Ограничитель выбросов напряжения может быть рассмотрен в качестве альтернативного решения (см. далее).

Сопоставление отечественных стандартов (ГОСТ Р 54073-2010) с зарубежными (DO-160C, MIL-STD-461) показывает, что нормативные показатели качества в основном совпадают или близки по величине. Более того, как отмечено в [8], анализ динамики развития национальных стандартов в области оборонной промышленности показывает, что они в значительной степени основаны на зарубежных аналогичных стандартах и зачастую,



соответствуют им. Здесь же проведен анализ динамики изменений основных требований в этих стандартах. В частности, отмечено, что одной из тенденций требований к ЭМС оборонной продукции является повышение жесткости испытаний на устойчивость к импульсным помехам.

Импульсные перенапряжения с ограниченной энергией

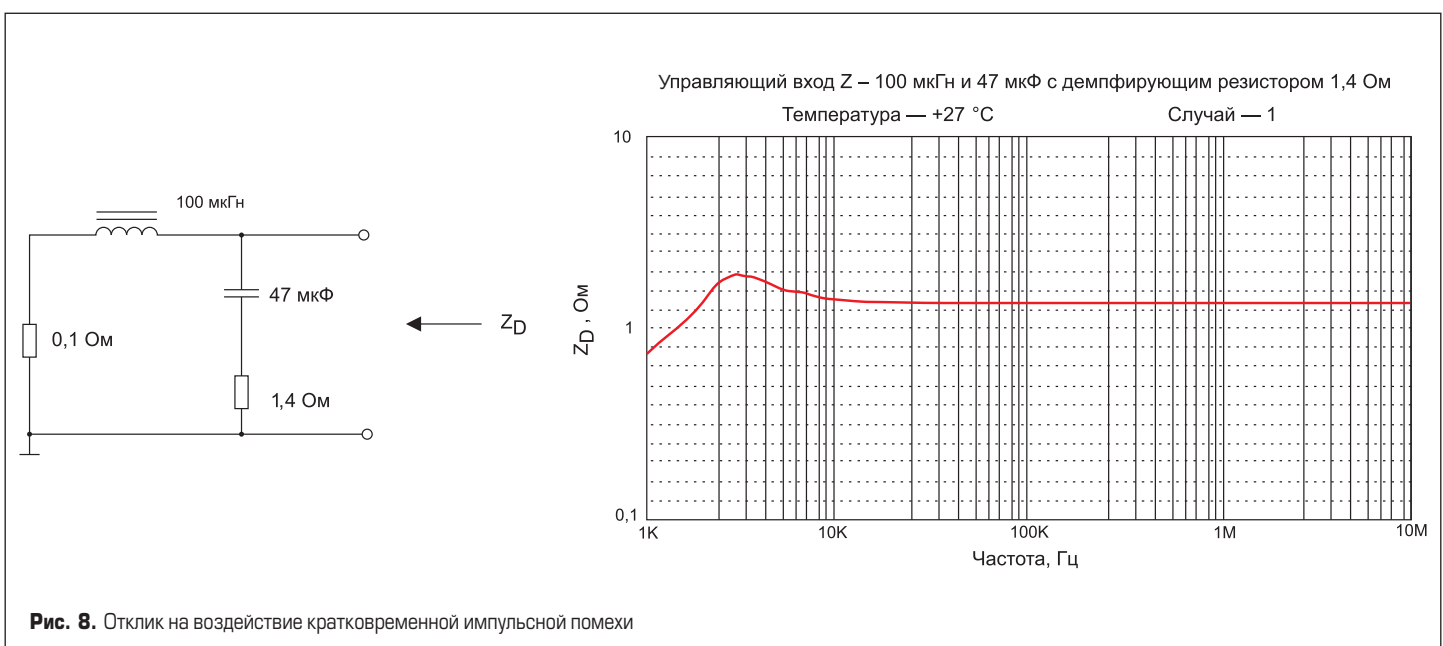
В стандарте MIL-STD-1275A Characteristics of 28 Volt DC Electrical Systems in Military

Vehicles имеются импульсные перенапряжения с предельной энергией 0,015 Дж, или 0,015 Вт/с. Импульс перенапряжения, представленный на рис. 9, длится 1 мс. Суммарная мощность в таком случае не превысит $0,015/0,001 = 15$ Вт и может быть ограничена небольшим полупроводниковым ограничителем напряжения на уровне 40 В или что-то около того. Шунтирующий конденсатор может быть также использован для подавления, и его минимальное значение легко вычислить по представленной формуле накопления энергии:

$$C_{MIN} = (2 \times Energy) / (V_{MAX}^2 - V_{LINE}^2) = 0,03 / (40^2 - 28^2) = 37 \text{ мкФ.}$$

Провалы напряжения бортовой сети

При кратковременном пропадании напряжения питания шина питания может быть поддержана аккумулятором или предварительно заряженным конденсатором, подключенным к шине питания через обратно включенный выпрямитель (диод). В номенклатуре Interpoint имеются модули



Длительные переходные напряжения

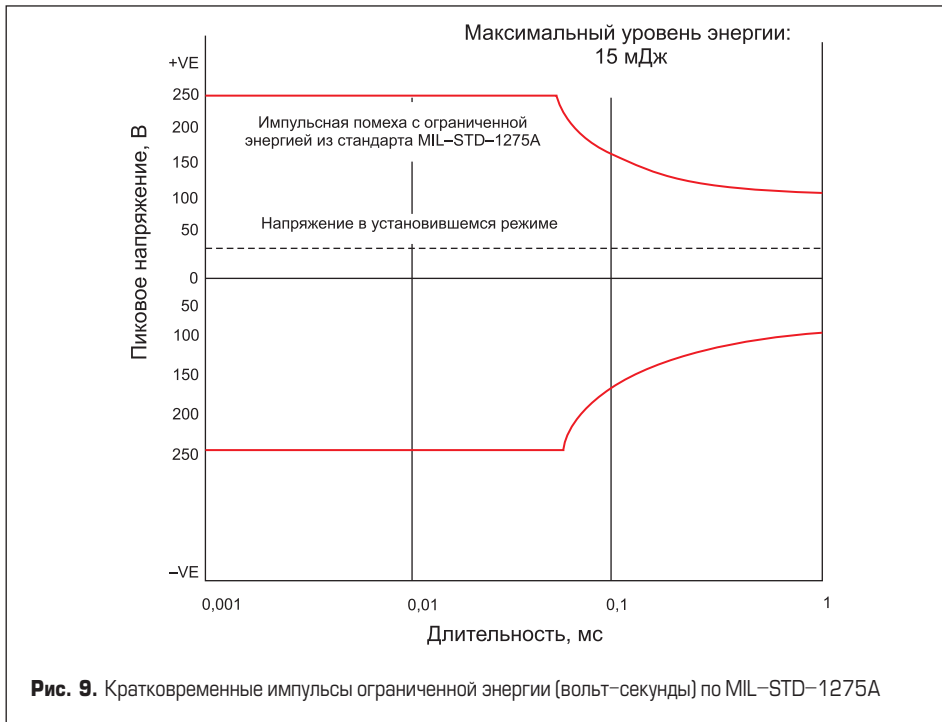


Рис. 9. Кратковременные импульсы ограниченной энергии (вольт-секунды) по MIL-STD-1275A

поддержания напряжения, которые предварительно заряжают внешний конденсатор до напряжения приблизительно 40 В и затем, как только происходит провал напряжения, подключают его к внутренней шине питания через ключ на MOSFET. Это устройства поддержания напряжения HUMMER HUM-40 (Hold-Up Module) и HUM-70, применение которых позволяет значительно снизить необходимую емкость конденсатора (в некоторых случаях до 80%). Там, где необходимо для поддержания напряжения применить конденсатор, минимальное значение емкости может быть вычислено по формуле:

$$C = 2P\Delta T / \eta \times (V_{CH}^2 - V_{LL}^2),$$

где: P — входная мощность, Вт; ΔT — длительность провала напряжения, с; V_{CH} — на-

пряжение на поддерживающем конденсаторе при провале напряжения; η — КПД преобразователя при расчетной (номинальной) нагрузке; V_{LL} — низкое значение напряжения, при котором источник питания прекращает стабилизировать напряжение, обычно 12–16 В. Структурная схема системы с применением модуля поддержания напряжения серии HUM представлена на рис. 10.

Более подробно с принципом работы модулей поддержания напряжения, применяемых при снижении напряжения входной шины авиационного электронного оборудования для поддержания работоспособности, можно ознакомиться в [9] и справочном листке модулей HUM.

Компания Crane Aerospace & Electronics планирует выпустить устройство LCM-50, сочетающее функции поддержания напряжения и ограничителя выбросов напряжения.

Длительные импульсные перенапряжения, как определено здесь, — те, которые имеют длительность 50–100 мс и затем возвращаются к нормальному напряжению 28 В в течение от 50 мс до 1 с или более.

Типичными случаями являются 80-В импульсы, которые допускаются стандартом MIL-STD-704A Electric Power, Aircraft, Characteristics, and Utilization Of, и 100-В импульсы, которые допускаются стандартом MIL-STD-1275A. Последний импульс характеризуется заданным импедансом источника 0,5 Ом. Источник помех в MIL-STD-704A не имеет определенного импеданса источника Z , и его значение для отдельных систем может колебаться от нескольких миллиом до 0,5 Ом. На рис. 11 представлены примеры кривых импульсов перенапряжений из стандарта MIL-STD-1275A.

Импульсные перенапряжения, подобные этим, имеют весьма большое значение вольт-секунд, чтобы быть ограниченными стандартными средствами накопления энергии, как в предыдущих примерах. Компоненты L и C были бы слишком большими. Это может также быть, как правило, справедливым для импульсных перенапряжений, имеющих низкий импеданс источника Z и длительности более нескольких десятков микросекунд. Полупроводниковые ограничители напряжения могут быть использованы, так же как и при более длительном времени перенапряжений, но они могут быть большими, поэтому должны соблюдаться показатели безопасной энергии, а также и максимального тока.

Понижающий импульсный регулятор является наиболее эффективным средством защиты от длительных импульсных перенапряжений, но он генерирует свои собственные помехи и требует конечного времени для включения и функционирования, типично — приблизительно 1 мс. Для импульсных перенапряжений с вы-

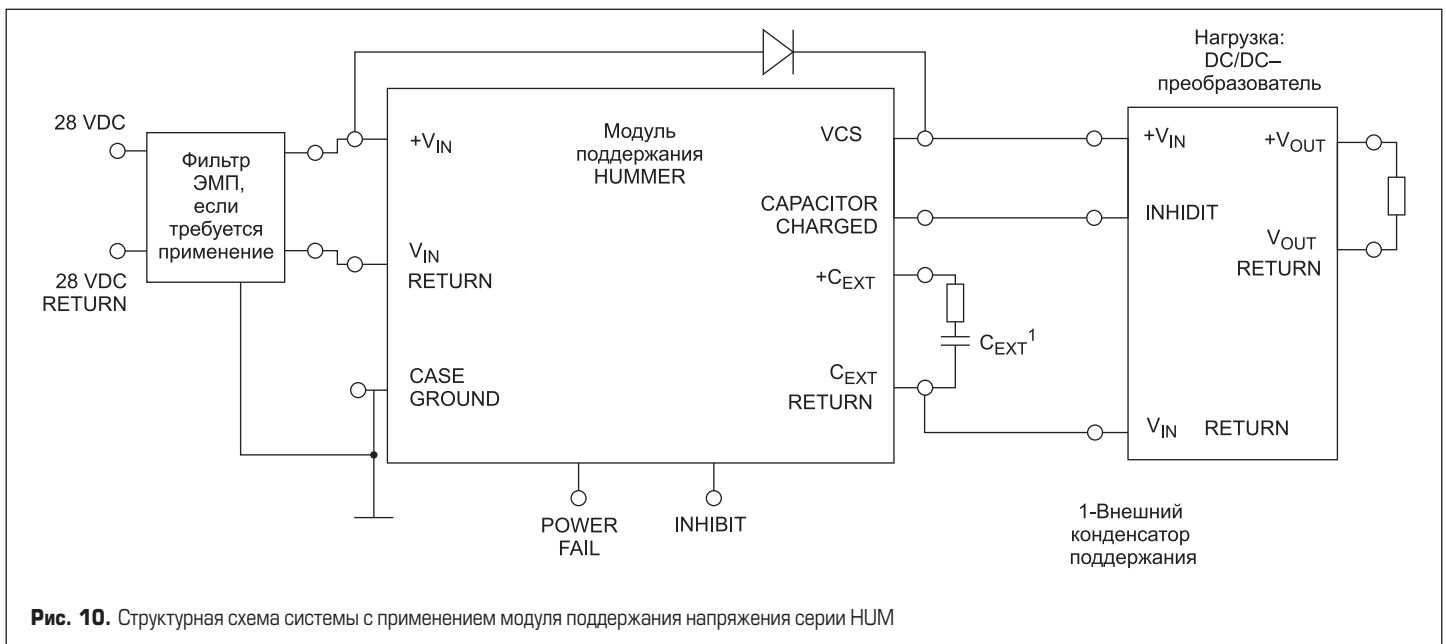


Рис. 10. Структурная схема системы с применением модуля поддержания напряжения серии HUM

сокой скоростью включения это не будет работать хорошо. Ограничитель выбросов напряжения является наилучшим общим решением. Модуль фильтра-ограничителя FM-704A компании Crane&Electronics сочетает функцию ограничителя выбросов напряжения и помехоподавляющего фильтра кондуктивных помех. Функциональная схема модуля представлена на рис. 12. В модуле ограничителя выбросов напряжения используются два параллельно включенных силовых MOSFET с каналом N-типа в линии высокого напряжения для снижения сопротивления в открытом состоянии и уменьшения потерь на проводимость и генератор зарядовой накачки для обеспечения повышения напряжения на затворе транзистора более напряжения +28 В шины питания.

Левый стабилитрон определяет нижний порог входного напряжения, примерно 15 В, и реализует функцию защиты от пониженного входного напряжения, а правый — определяет верхний порог входного напряжения примерно в 43 В. При входном напряжении менее 15 В генератор зарядовой накачки не включен, MOSFET закрыт. При входном напряжении более 43 В биполярный транзистор открывается, закрывая транзистор MOSFET. Два диода, конденсатор и резистор образуют схему зарядового насоса, позволяющую повысить напряжения на затворе MOSFET выше входного напряжения. Схема зарядового насоса — это вилка Авраменко, которая применяется для съема мощности с резонансных линий передачи энергии. В данной схеме генератор

формирует меандр с выходным напряжением выше порога открывания полевого транзистора (15–20 В) и частотой 50–200 кГц.

Для уменьшения несимметричных помех применяется несимметричный дроссель. Устойчивость системы обеспечивается включением на входе демпфирующей RC-цепи (25 Ом, 3300 пФ). Демпфирующая RC-цепь, включенная на входе между общим проводом и корпусом, служит для подавления паразитного резонанса, вызванного индуктивностью рассеивания 390 мкГн дросселя, судя по номиналам, порядка 2 мкГн. Несимметричная установка этой цепи объясняется несимметричностью фильтра синфазных помех. Два Г-образных LC-фильтра обеспечивают уменьшение импеданса источника положительного напряжения при подключении DC/DC-преобразователей с ШИМ-регулированием, а также подавление пульсаций, вызванных пульсирующим током подключенного преобразователя. Два конденсатора Y-типа (3300 пФ), подключенные к корпусу, снижают уровень синфазной помехи. Внешний вид конструкции модуля фильтра-ограничителя FM-704A представлен на рис. 13.

Более подробная и полезная информация о применении модуля FM-704A содержится в справочном листке на это изделие.

Два дополнительных примера ограничителей выбросов напряжения представлены на рис. 14. В одном из них (рис. 14а) используется MOSFET с каналом N-типа в обратном проводе, а в другом (рис. 14б) используются транзисторы MOSFET с каналом

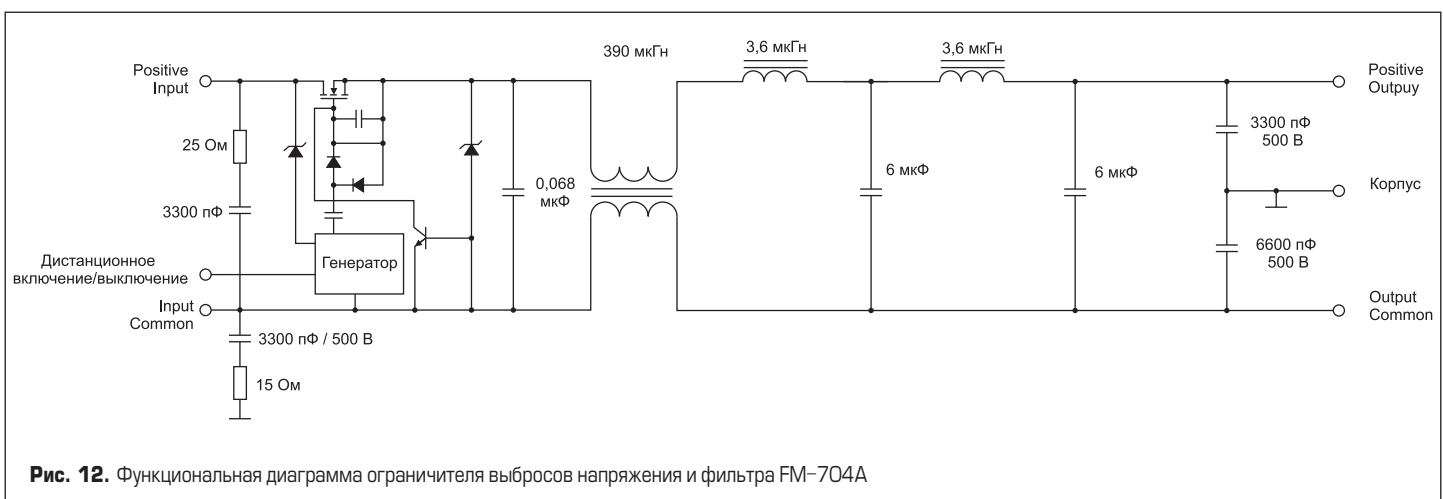
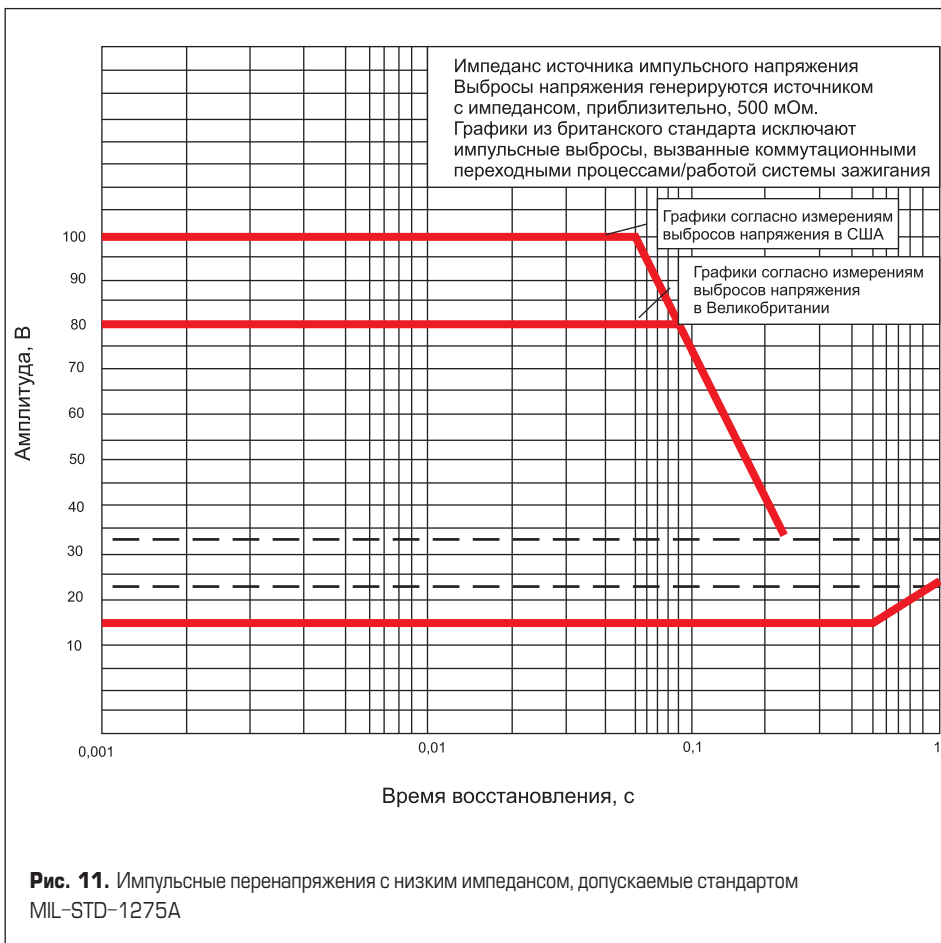


Рис. 12. Функциональная диаграмма ограничителя выбросов напряжения и фильтра FM-704A

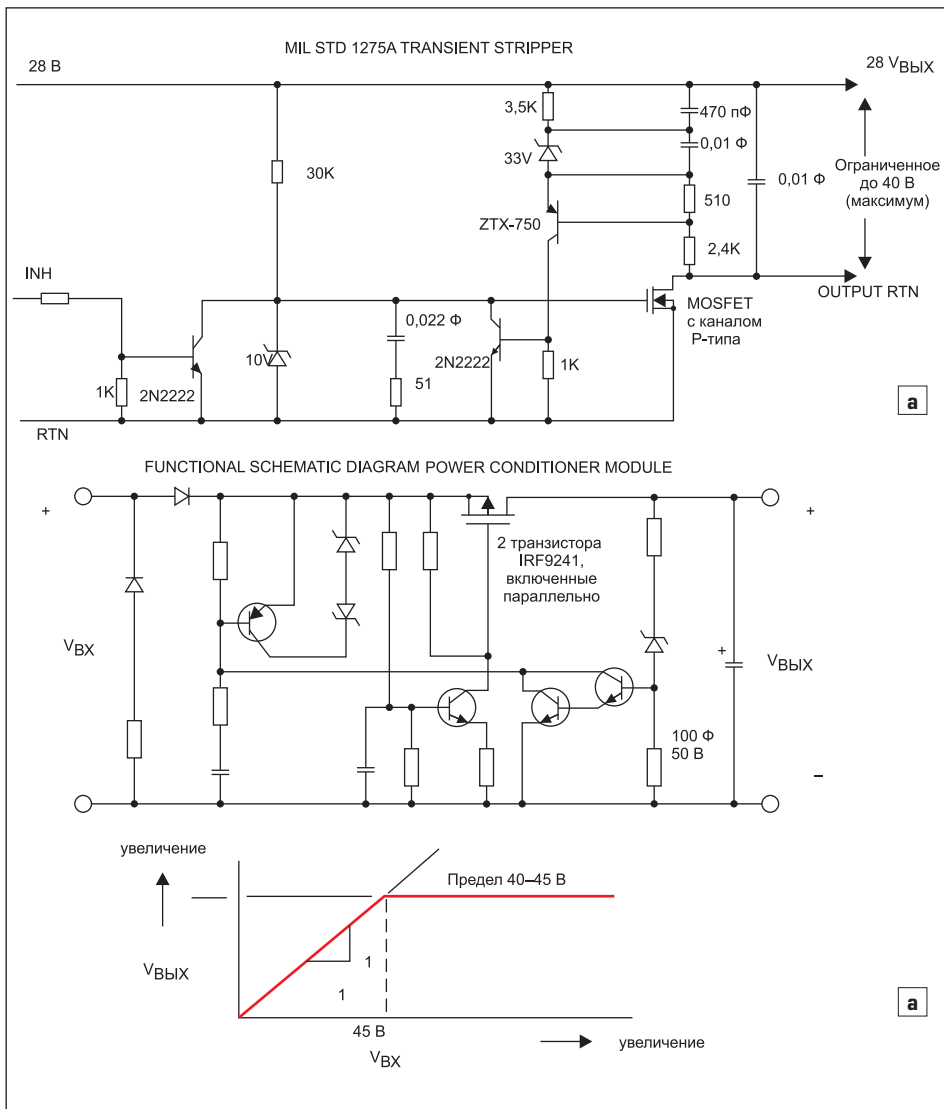


Рис. 14. Ограничители выбросов напряжения: а) ограничитель выбросов напряжения из стандарта MIL-STD-1275A; б) функциональная схема модуля стабилизатора напряжения; в) принцип работы стабилизатора напряжения

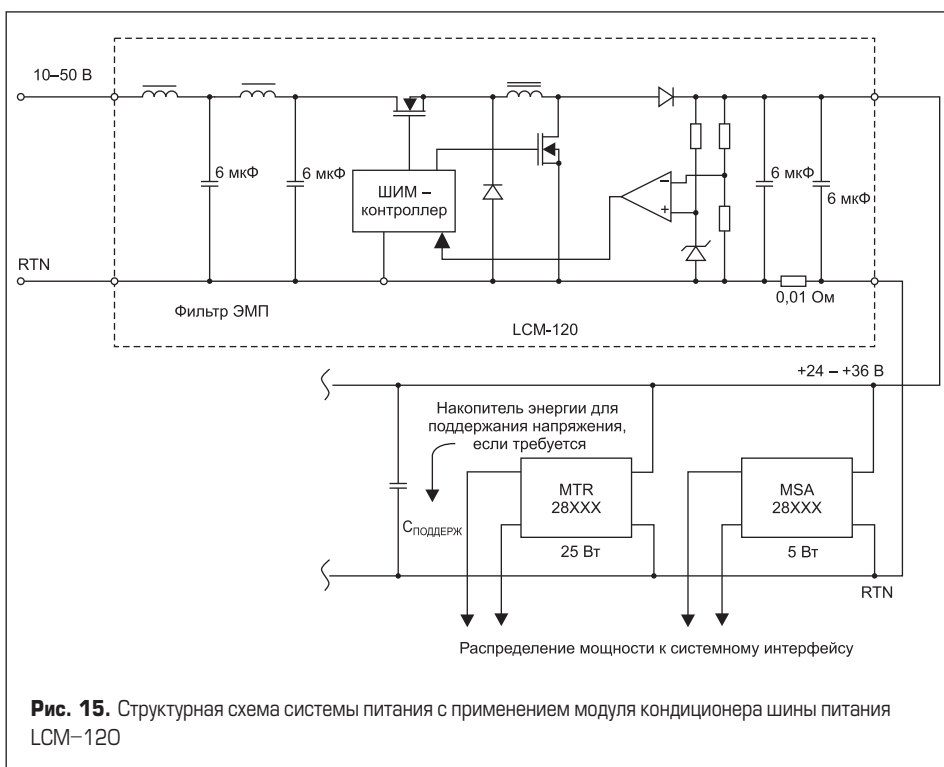


Рис. 15. Структурная схема системы питания с применением модуля кондиционера шины питания LCM-120

P-типа в линии высокого напряжения +28 В. Ограничитель выбросов напряжения является быстродействующим стабилизатором напряжения, в котором при нормальной работе полностью открытый MOSFET включен своим сопротивлением открытого канала R_{DS} последовательно с шиной питания. Когда возникают импульсные перенапряжения, ограничитель выбросов напряжения регулирует свой выход в пределах 40–50 В, с компенсацией импульсного перенапряжения, образующегося на концах параллельно или последовательно соединенного MOSFET. Ток через MOSFET во время импульсного перенапряжения является током нагрузки на выходе со стабилизированным напряжением. В отношении нагрузки импульсного преобразователя напряжения, поскольку стабилизированное напряжение равно 45 В, ток будет приблизительно 60% от его значения при 28 В. Мощность, рассеиваемая на MOSFET, так же, как и суммарная мощность, поглощенная в течение импульсного перенапряжения, должна быть учтена в схеме ограничителя выбросов напряжения.

Интересным решением для нормализации напряжения 28-В шины питания при снижении напряжения до 10 В, что происходит при запуске авиадвигателей, а также при выбросах напряжения до 80 В длительностью до 120 мс, является модуль стабилизатора напряжения LCM-120. Упрощенная структурная схема системы питания с применением модуля кондиционера напряжения шины питания LCM-120 представлена на рис. 15. Модуль является DC/DC-преобразователем напряжения без гальванической развязки между входными и выходными цепями и применяется для расширения диапазона рабочего напряжения модулей DC/DC-преобразователей Interpoint. LCM-120 обеспечивает в нагрузке до 120 Вт от источника постоянного напряжения в диапазоне напряжений 12–50 В, функционируя в одном из трех режимов:

- в диапазоне напряжений 12–24 В — внутренний повышающий стабилизатор обеспечивает 24 В;
- в диапазоне напряжений 24–36 В — вход подключается непосредственно к выходу;
- в диапазоне напряжений 36–50 В — внутренний понижающий стабилизатор обеспечивает 36 В.

Выходное напряжение модуля LCM-120 в различных режимах работы показано на рис. 16. Переходы от одного режима работы к другому имеют гистерезис 0,5–1 В (на диаграмме не показано).

Модуль LCM-120 защищен внутренней схемой ограничения тока, которая ограничивает ток в соответствии с входным напряжением. Эта функция также обеспечивает безопасную зарядку больших внешних конденсаторов. Так как ток считывается между общими точками входной и выходной цепей, обычно между этими точками не производится внешних соединений. В том случае, когда между этими точками желательно

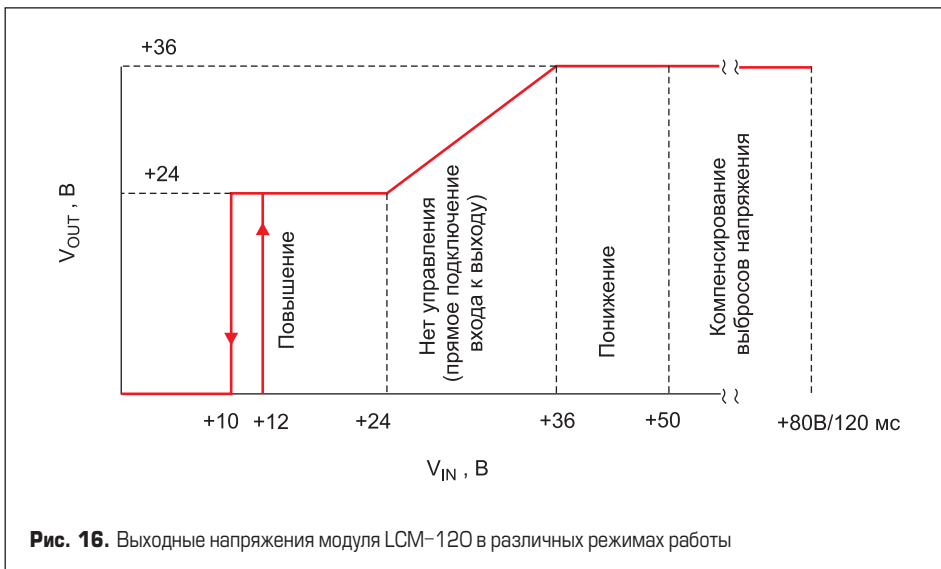


Рис. 16. Выходные напряжения модуля LCM-120 в различных режимах работы

внешнее соединение, сопротивление этого внешнего соединения должно быть более 1 Ом. Модуль будет работать до отклонения входного напряжения до 80 В длительностью 120 мс при поддержании напряжения на уровне 36 В.

Функция защиты от низкого входного напряжения не допускает включение модуля при входных напряжениях ниже 12 В и выключит преобразователь при напряжении менее чем 10 В. Сигнал низкого выходного напряжения (полностью изолированный биполярный NPN-транзистор с рабочим напряжением 18 В) активизируется при снижении входного напряжения ниже 10 В. Этот сигнал можно использовать для управления нагрузками LSTTL.

Когда модуль работает при входном напряжении 12 В и мощности 120 Вт, потери в линии становятся значительной проблемой. Модуль будет формировать на выходе 24 В при 120 Вт. Учитывая КПД, значение входного тока будет $120 \text{ Вт} / 0,88 / 12 = 11,36 \text{ А}$. В том случае, когда сопротивление линии питания от источника до модуля составляет 0,05 Ом, потери на линии при 12 В от первичного источника будут $(0,05 \cdot 11,36 \text{ В}) = 0,57 \text{ В}$. Модуль LCM-120 определит 11,43 В и не запустится.

Для обеспечения устойчивости повышающего преобразователя модуля LCM-120 рекомендуется применять внешний конденсатор



Рис. 17. Внешний вид модуля кондиционера шины питания LCM-120 (габаритные размеры 76,33×38,23×10,16 мм, масса 95 г)

с минимальной емкостью 330 мкФ и общим эквивалентным последовательным сопротивлением, по меньшей мере, 0,25 Ом. Для конденсаторов с очень низким значением ESR может быть использован внешний последовательный резистор (неиндуктивный), чтобы достигнуть минимального значения общего ESR. Максимальное рекомендованное значение емкости — 1 Ф.

Емкость связана с мощностью (нагрузкой) следующим образом:

$$Pdt = 0,5(CV_1^2 - CV_2^2).$$

Допустим, что мощность нагрузки равна 70 Вт; $V_1 = 24 \text{ В}$; $V_2 = 16 \text{ В}$ (минимальное зна-

чение входного напряжения для большинства DC/DC-преобразователей Interpoint).

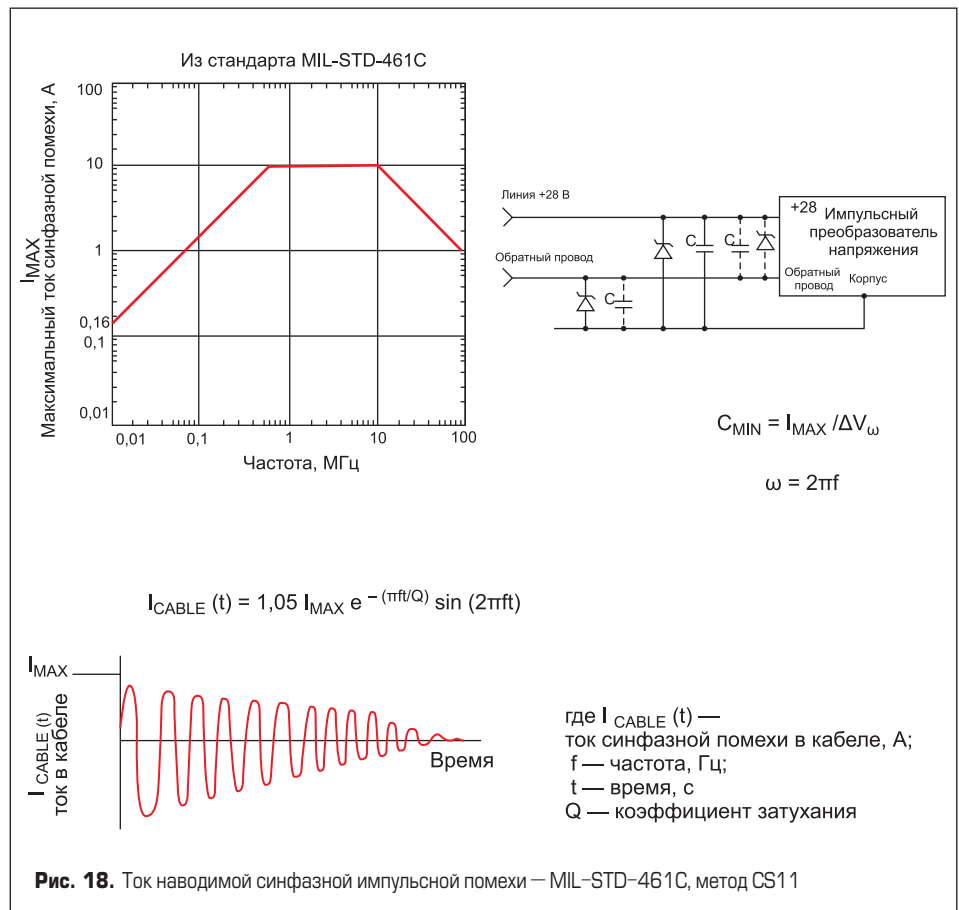
$$C = (2Pdt) / (V_1^2 - V_2^2) = (2 \times 70dt) / (576 - 256) = 140dt / 320 = 0,4375dt.$$

При $dt = 1 \text{ с}$ (ситуация при запуске авиадвигателей, затем напряжение достигает уровня 15–16 В в течение 5 с) требуется емкость 0,4375 Ф.

Внешний вид модуля LCM-120 показан на рис. 17. Модуль LCM-120 был разработан достаточно давно, в начале 90-х годов. В настоящее время планируется к производству более эффективный модуль LCM-50, совмещающий функции поддержания напряжения и нормализации напряжения шины питания.

Наводимые токовые импульсные помехи

Наводимые токовые импульсные помехи, вызванные электромагнитным импульсом или сигналами высокого уровня в соседних электрических проводах и кабелях, могут быть по своей природе помехой общего вида, дифференциальной помехой или сочетанием двух составляющих помех. Пример кривой тока синфазной помехи, представленный на рис. 18, взят из стандарта MIL-STD-461C, метод CS11, и является по своей природе помехой общего вида (синфазная помеха). Этот высоковольтный выброс может быть ограничен керамическими конденсаторами хорошего качества (Y-конденсаторы), установленными между проводом +28 В



и корпусом преобразователя и между обратным проводом и корпусом преобразователя напряжения. В случае асимметрии конденсатор может быть также размещен между линиями шины питания (X-конденсатор). Минимальное значение конденсатора легко вычисляется один раз по определенному максимально допустимому отклонению напряжения. Если предположить, что допустимо максимальное отклонение напряжения 1 В, минимальное значение емкости будет 2,7 мкФ. Более детальная информация представлена на рис. 18. Конденсаторы могут быть также соединены параллельно с устройствами, которые могут быть эффективными для подавления высоковольтных импульсов, наводимых в электрической схеме от молний: на схеме показаны полупроводниковые ограничители напряжения, включенные параллельно конденсаторам.

При воздействии электромагнитных импульсов значительной продолжительности, обусловленных грозовыми разрядами или отдельными видами преднамеренных электромагнитных деструктивных воздействий, рекомендуется применять газонаполненные разрядники. Их особенностью является значительно большая задержка срабатывания, обусловленная относительно медленным развитием разряда в среде инертных газов, заполняющих разрядник (до 4 мкс), что является недостатком. Но при возникновении дугового разряда в искровом промежутке напряжение горения дуги сравнительно низкое — десятки вольт, что снижает мощность, рассеиваемую разрядниками, и позволяет погасить энергию импульса на эквивалентном сопротивлении сети и после срабатывания разрядника наилучшим образом защитить аппаратуру [10]. К недостаткам такого решения следует отнести: недопустимо большое падение напряжения на разряднике, которое может возникать перед его срабатыванием и приводить к повреждению защищаемого элемента; в некоторых случаях, из-за малого напряжения горения газового разрядника в цепях постоянного тока, он не гасится, поэтому возможен тепло-

вой перегрев и разрушение разрядника за счет остаточного тока.

В цепях постоянного тока газовые разрядники применяются в комбинации с полупроводниковыми ограничителями напряжения или варисторами и дросселем, который выступает в качестве токоограничивающего сопротивления, а также способствует более быстрому срабатыванию газового разрядника. Схема сетевого защитного устройства, обеспечивающая защиту от импульсных сетевых перенапряжений в десятки килоджоулей в сети электропитания постоянного тока, выполненная с применением комбинации газонаполненных разрядников, варисторов и полупроводниковых ограничителей напряжения с развязывающими дросселями, рассматривается в [11]. Разрядники обеспечивают ограничение импульсов около 1,5 кВ, исключая пробой изоляции цепей вывод-корпус.

Комбинированные устройства защиты от импульсных перенапряжений обладают наилучшими возможностями по борьбе с помехами из сетей электропитания, но вместе с тем являются наиболее дорогостоящими и сложными устройствами.

Заключение

Защита электронной аппаратуры от высоковольтных импульсных и высокочастотных помех, существующих в системе электропитания автономных объектов, является одной из важнейших задач при проектировании и эксплуатации электронной аппаратуры. Применение устройств защиты от импульсных перенапряжений на основе различных ограничительных элементов и последовательных регуляторов напряжения позволяет надежно и эффективно защитить электронное оборудование. Задача разработчика системы электропитания заключается в правильном выборе элементов ограничителей напряжения с учетом особенностей первичной сети и требований показателей качества электрической энергии, применяемых модулей преобразователей напряжения.

1. Eide M. Transient Suppression: Switching Power Supplies. Application Note. Interpoint, Crane Aerospace & Electronics Power Solutions. Rev C 2006.12.06.
2. Глухов А. В., Цветиков А. Г., Акулов А. Н., Скорняков С. П., Перов Г. В. Электронные компоненты высокой мощности для систем защиты РЭА от импульсных перенапряжений // Силовая электроника. 2012. № 3.
3. Голдман С. Выбор устройств защиты: TVS-диоды против металл-оксидных варисторов // Электронные компоненты. 2010. № 9.
4. Крюков М. Ю. Варисторы фирмы EPCOS для защиты от перенапряжений // Научно-технический сборник «Практическая силовая электроника». 2002. № 7.
5. Твердов И. В. Выбор варисторов для подавления высоковольтных импульсов на входе модулей электропитания // Электропитание. 2015. № 2.
6. Куневич А. В., Максимов А. Н. Современные порошковые магнитные материалы с высокой индукцией насыщения // Электрическое питание. 2002. № 3.
7. Ковалев Н. С. Сравнительные характеристики и применение современных порошковых магнитомягких материалов // Электрическое питание. 2004. № 4.
8. Смирнов А., Басалаев К. Развитие требований к характеристикам электромагнитной совместимости общепромышленной и оборонной продукции и современные технические средства их оценки // Компоненты и технологии. 2015. № 2.
9. Жданкин В. К. Модуль поддержания напряжения уменьшает емкость буферного конденсатора до 80% // Силовая электроника. 2011. № 1.
10. Ковалев Н. С. Защита цепей питания от электромагнитных импульсов // Электрическое питание. 2003. № 4.
11. Колосов В. А., Ларин А. Г., Парфенов А. В. Комбинированное сетевое защитное устройство для системы электропитания постоянного тока // Электропитание. 2012. № 4.