

ОТСУТСТВИЕ СТАНДАРТА НА ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА ЗАТРУДНЯЕТ СОЗДАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ

В.И. Гуревич, канд. техн. наук

Введение

Защита современной электронной аппаратуры, в частности, в электроэнергетике от электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ) является важной и актуальной проблемой современного этапа развития техники по многим причинам, рассмотренным ранее [1]. Основными методами защиты от воздействия ЭМИ ЯВ на высокочувствительную аппаратуру являются тщательное электромагнитное экранирование самой аппаратуры и подключенных к ней внешних кабелей, а также подавление импульса посредством специальных фильтров (рисунок 1), через которые осуществляется связь аппаратуры с внешними устройствами и системами.

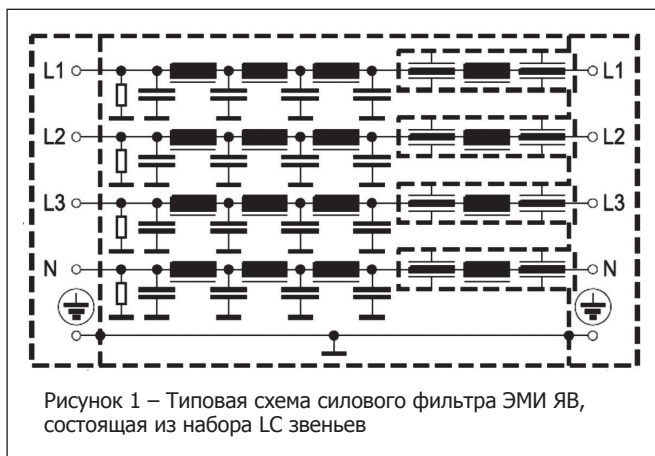


Рисунок 1 – Типовая схема силового фильтра ЭМИ ЯВ, состоящая из набора LC звеньев

Современный рынок таких фильтров представлен сегодня десятками типов, производимых многочисленными компаниями: ETS-Lindgren, MPE, Meteorlabor-EMP, European EMC Products Ltd., Captor Corp., LCR Electronics, API Technologies, Astrodyne TDI Corp., Fi-Coil, EMI Solutions Pvt. Ltd, RFI Corp., и др. Казалось бы, в чем проблема: хочешь защитить свою аппаратуру от ЭМИ ЯВ? Установи такие фильтры и спи спокойно!

Действительно ли фильтры защищают от электромагнитного импульса?

При попытке выбрать фильтр, способный эффективно подавлять ЭМИ ЯВ, неожиданно сталкиваешься с проблемой: все перечисленные выше компании рекламируют свои фильтры, как высокоэффективные средства защиты от ЭМИ ЯВ и при этом ссылаются на соответствие этих фильтров военному стандарту MIL-STD-188-125 [2], однако, при этом они указывают параметры испытательных импульсов, которым были подвергнуты фильтры, существенно отличающихся от указанных в стандарте. Так, например, этот стандарт предусматривает испытания импульсами тока 20/500 нс определенной амплитуды, на нагрузку 60 Ом, тогда как фильтры испытываются производителями импульсами тока 8/20 мкс на нагрузку 1 Ом. Почему? Да, потому что импульс

8/20 мкс – это стандартный импульс, воспроизводимый всеми видами испытательной аппаратуры, предназначенной для испытания на устойчивость к разряду молнии, тогда как для испытания импульсами тока 20/500 нс на нагрузку 60 Ом требуется специальная весьма дорогостоящая аппаратура, которой нет у производителей фильтров. Об этой проблеме прямо говорится в [3].

Еще одна странность заключается в том, что MIL-STD-188-125 предусматривает испытания объекта импульсами тока в двух режимах: при протекании тока между всеми объединенными вместе входами и землей (common mode) и между каждым входом отдельно и землей (wire-to-ground mode). Однако при высотном ядерном взрыве импульс высокого напряжения может прикладываться не только между входами аппаратуры и землей (этот режим в других стандартах обозначен как «common mode»), но и между различными входами изолированной от земли аппаратуры («differential mode»). Стандарт MIL-STD-188-125 не предусматривает таких испытаний, они рассматриваются в других стандартах. В связи с этим, некоторые компании, рекламирующие свои фильтры, как фильтры ЭМИ ЯВ, вообще не снабжают их элементами ограничения импульсных напряжений, ссылаясь все на тот же MIL-STD-188-125, но при этом утверждают, что поскольку их фильтры прошли испытания импульсом тока с амплитудой в несколько тысяч ампер и признаны соответствующими стандарту MIL-STD-188-125, то это значит, что они обеспечивают полноценную защиту от ЭМИ ЯВ. Действительно, в этом стандарте ограничители импульсных напряжений представлены как совершенно самостоятельные элементы, не имеющие отношения к фильтрам (рисунок 2).

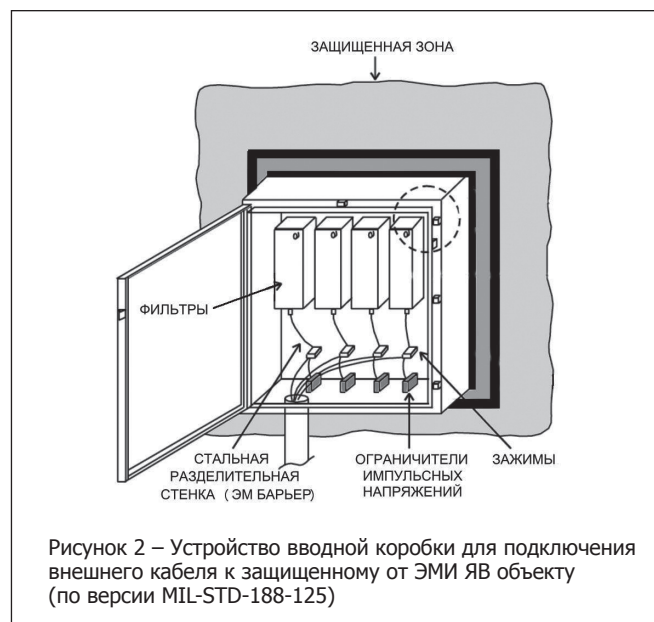


Рисунок 2 – Устройство вводной коробки для подключения внешнего кабеля к защищенному от ЭМИ ЯВ объекту (по версии MIL-STD-188-125)

При таком подходе, фильтры действительно не обязаны защищать от перенапряжений на входах. Вот только можно ли при таком подходе утверждать, что эти самые фильтры являются полноценной защитой от ЭМИ ЯВ? Очевидно, понимая проблему, многие производители все же снабжают свои фильтры элементами защиты от импульсных перенапряжений, установленными на входах. По их мнению, теперь такие фильтры с полным правом можно называть фильтрами защиты от ЭМИ ЯВ.

Однако при внимательном рассмотрении защитных элементов, применяемых в этих фильтрах, возникают серьезные сомнения в их эффективности. Наиболее распространенные и дешевые ограничители импульсных напряжений, применяемые в фильтрах, это газовые разрядники и оксидно-цинковые варисторы (рисунок 3). Как известно, они являются относительно «медленными» элементами, хорошо справляющимися с подавлением стандартных импульсов 8/20 мкс, но не успевающими сработать при воздействии короткого импульса высокого напряжения E1 ЭМИ ЯВ с параметрами 2/25 нс [4] (или 5/50 нс по данным [5]). Потребитель же, прочитав, что выбранный им фильтр предназначен для защиты от ЭМИ ЯВ и прошел испытания импульсами тока 8/20 мкс в полном соответствии с военным стандартом MIL-STD-188-125, вряд ли будет искать этот стандарт и проверять, а действительно ли это тот самый импульс.



Рисунок 3 – Фильтры компании MPE с защитными элементами на входе, в качестве которых применяются варисторы (VDR) и газовые разрядники (GDT)

Однако предъявлять претензии производителям рано. В [6] прямо говорится о том, что установленные в фильтрах недостаточно быстрые варисторы и еще более медленные газовые разрядники, оказывается, вообще не предназначены для защиты от ЭМИ ЯВ, а являются элементами защиты от разрядов молнии и коммутационных перенапряжений. Вот так: в фильтрах для защиты от ЭМИ ЯВ применяются ограничители напряжения, предназначенные для защиты от ... молнии, но не от ЭМИ ЯВ! Тем не менее, некоторые типы фильтров компании MPE с защитными варисторами названы в рекламных проспектах фильтрами, специально предназначенными для защиты от компонента E1. Однако внимательный анализ параметров этих фильтров показал, что они ничем, кроме названия в заголовке, не отличаются от всех остальных фильтров этой компании, то есть, на самом деле, защищены от разрядов молнии, а не от компонента E1 ЭМИ ЯВ. В противном случае, нужно будет признать, что параметры разряда молнии ничем не отли-

чаются от параметров компонента E1, что на самом деле совершенно не соответствует действительности.

В дискуссии с представителем компании MPE по поводу обоснованности применения варисторов в фильтрах, предназначенных для защиты от ЭМИ ЯВ, был выдвинут один новый довод. Представитель компании заявил, что несмотря на то, что варистор сам по себе не очень быстрый элемент, в соединении с L-C элементами фильтра, его эффективность становится достаточной для защиты от компонента E1. Проверка этого довода компании показала, что и он не точен. В ряде публикаций на эту тему [7–8] утверждается, что присоединение к защитному элементу даже коротких внешних проводников, обладающих очень малой индуктивностью, снижает его быстродействие. Оказывается, что время реакции защитного элемента на приложенный к нему импульс напряжения очень сильно зависит и от конструкции корпуса этого элемента, и от формы (длины) его выводов [7–8]. Более того, в [8] утверждается, что именно конструкция и длина внешних выводов определяют время реакции защитного элемента. Зная это, производители защитных элементов часто указывают в рекламных материалах время реакции не полностью собранного элемента в корпусе с выводами, а лишь материала, используемого для изготовления этого защитного элемента [8]. Вместе с тем, производители работают над усовершенствованием конструкции выводов защитных элементов и добиваются существенных успехов [9].

Из изложенного выше становится понятным, что получить объективные данные о быстродействии того или иного типа защитного элемента можно только проведя собственные независимые испытания готовых изделий, предлагаемых на рынке, хотя некоторые косвенные данные о результатах таких испытаний [10] позволяют произвести предварительную сравнительную оценку. Так, например, по утверждению [10], динамическое сопротивление и время реакции защитного элемента на основе лавинного диода (TVS diode) почти в 10 раз меньше, чем у варистора. Мы не проводили собственных исследований быстродействия этих диодов и варисторов для того, чтобы подтвердить или опровергнуть эти данные, однако, тот факт, что для защиты электронной аппаратуры от высоковольтных электростатических разрядов (а это наносекундный диапазон, то есть наиболее близкий по временному параметру к ЭМИ ЯВ) применяются защитные элементы на основе лавинных диодов, а не варисторов, говорит сам за себя.

Еще одной проблемой, связанной с использованием элементов защиты от импульсных напряжений, является схема включения этих элементов, принятая в большинстве фильтров (рисунок 1), при которой каждый такой элемент включен между входом и заземленным корпусом фильтра. При таком включении, получается, что между входами фильтра оказываются включенными два последовательно соединенных элемента, обуславливающих двойное остаточное напряжение, которое может представлять опасность для защищаемой электронной цепи.

Технические требования по устойчивости аппаратуры к таким напряжениям и методы ее испытаний описаны в стандартах IEC 61000-4-4 [5] и IEC 61000-4-25[11]. Под испытательным импульсом такого напряжения подразумевается так называемый Electrical Fast Transient (EFT) – быстрый импульс, параметры которого и методика испытаний

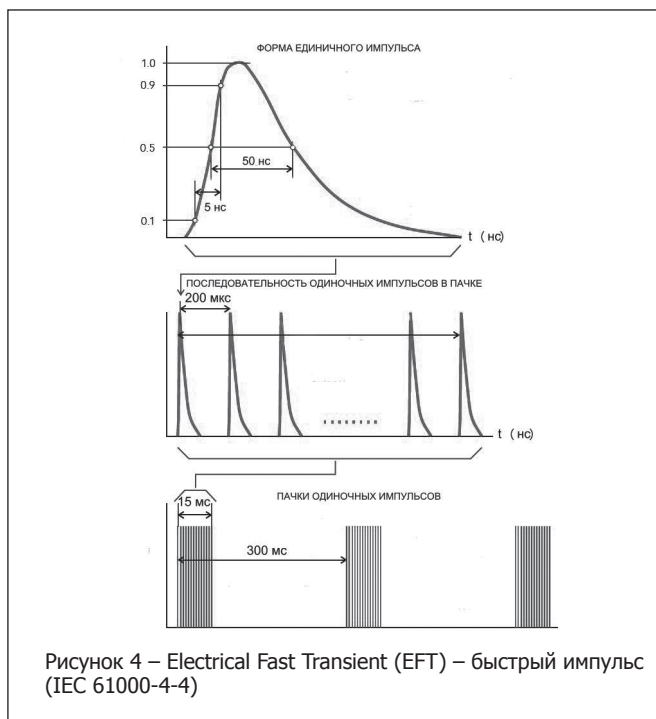


Рисунок 4 – Electrical Fast Transient (EFT) – быстрый импульс (IEC 61000-4-4)

описаны в стандарте IEC 61000-4-4 (рисунок 4). Методика выбора параметров испытательных импульсов на основе этих стандартов для конкретного примера – микропроцессорного устройства релейной защиты (МУРЗ), изложена в [12], для которого амплитуда импульсного напряжения EFT составила 8 кВ.

По нашему мнению, таким испытаниям должны подвергаться фильтры с элементами защиты от импульсных напряжений, предназначенные для защиты от ЭМИ ЯВ в дополнение к испытаниям, предусмотренным стандартом MIL-STD-188-125, причем, с приложением испытательных напряжений как между входами и землей, так и между отдельными входами.

О частотном диапазоне фильтров

Еще одна проблема связана с амплитудно-частотной характеристикой фильтров. Типовая характеристика высококачественного фильтра, предназначенного для защиты от ЭМИ ЯВ, приведена на рисунке 5. Как же параметры реальных фильтров связаны с этой типовой характеристикой?

Одни компании (как, например, Meteolabor) вообще не приводят в техническом описании некоторых своих фильтров данные о частотном диапазоне и вносимом затухании. Другие

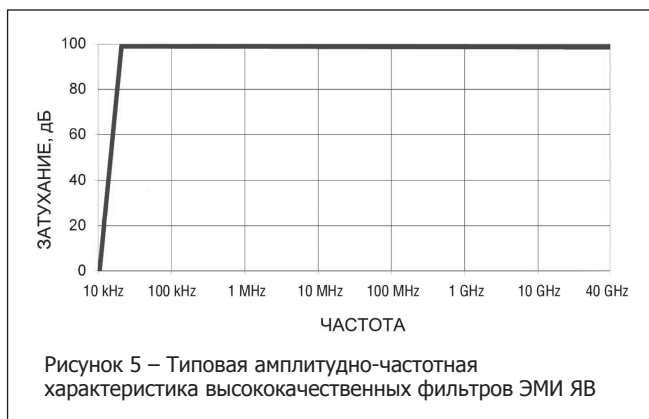


Рисунок 5 – Типовая амплитудно-частотная характеристика высококачественных фильтров ЭМИ ЯВ

(например, MPE) приводят в своей документации типовую характеристику, которой должны обладать фильтры в соответствии со стандартом MIL-STD-188-125 (частотный диапазон 14 кГц – 40 ГГц, затухание во всем диапазоне 100 дБ) и тут же приводят реальные характеристики производимых фильтров с параметрами: 10 кГц – 1 ГГц с затуханием 80 дБ – для фильтра обычного качества и тот же частотный диапазон, но с затуханием 100 дБ – для фильтра улучшенного качества. А куда же подевался частотный диапазон от 1 ГГц до 40 ГГц? Сотрудники компании Astrodyne (LCR Electronics, Inc.) оказались хитрее. Они написали в технической документации на свои фильтры, что они обеспечивают затухание в 100 дБ в частотном диапазоне 14 кГц – 10 ГГц в соответствии со стандартом MIL-STD-220 [13], но если их фильтры будут хорошо экранированы и изолированы (читай: установлены в «клетке Фарадея»), то их частотный диапазон может быть расширен до требуемого значения 40 ГГц. Вот так: чтобы фильтр «правильно» защищал от ЭМИ ЯВ, его самого сначала нужно защитить от этого самого ЭМИ ЯВ! Как говорится, комментарии излишни.

Вся комичность ситуации отражена в таблице 1, в которой приведены для сравнения частотные характеристики фильтров ведущих производителей: все фильтры имеют одно и то же назначение и все соответствуют требованиям стандарта MIL-STD-188-125, и при этом все они имеют существенно различающиеся параметры. Как же такое может быть?

Еще одной особенностью принятой схемы включения отдельных внутренних элементов фильтров между каждым входом и землей, является не только двойное остаточное напряжение на элементах защиты от импульсных напряжений, о чем упоминалось выше, но и двойная емкость и двойная индуктивность, включенная между входами по сравнению с индуктивностью и емкостью между каждым входом и землей.

Таблица 1 – Частотные характеристики фильтров ведущих производителей

Примечание	Затухание, дБ	Частотный интервал		Производитель фильтров ЭМИ ЯВ
		Max, ГГц	Min, кГц	
–	100	1	14	LCR Electronics
для стандартного фильтра	80	1	10	MPE
для улучшенного фильтра	100	18	14	MPE
–	100	1	14	Fi-Coil
–	100	10	14	Captor Corp.
–	100	40	14	ETS-Lindgren
для фильтра типа PLP	80	1	200	MeteoLabor
для фильтра типа USP	–	–	–	MeteoLabor

Отсюда следует, что частотные характеристики фильтров для импульса, приложенного между входами, будут не такими, как для импульса, приложенного между входом и землей. Насколько эти характеристики будут приемлемы для защиты от ЭМИ ЯВ?

Выводы

Какой потребитель будет так глубоко «копать»? Почему он не должен поверить утверждениям компании-производителя о высокой эффективности его продукции? А если даже и не поверит, то все равно не сможет, в большинстве случаев, самостоятельно проверить реальную эффективность «работы» такого фильтра. Понятно, какова будет эффективность защиты его ответственной аппаратуры фильтром, если в критической ситуации он окажется не способным защитить от ЭМИ ЯВ.

Сегодня ситуация такова, что каждый производитель сам решает, включать или не включать ограничители импульсного напряжения в состав фильтров; использовать или не использовать дешевые, но не подходящие по своим параметрам элементы; испытывать фильтры стандартным «грозовым» импульсом, или импульсом с параметрами, оговоренными в военном стандарте, упоминать или вообще не упоминать о частотном диапазоне, использовать частотный диапазон, оговоренный в стандарте MIL-STD-188-125 или в стандарте MIL-STD-220 [13], а может быть и указать собственный частотный диапазон и при этом дать ссылку на известный военный стандарт. Кто там будет проверять!

Сложившееся положение дел – следствие отсутствия специального стандарта, оговаривающего требования к конструкции и к параметрам фильтров ЭМИ ЯВ, методам их испытаний, критериям качества функционирования. Такая ситуация является, по нашему мнению, недопустимой, учитывая важность проблемы, и требует незамедлительного исправления.

Литература:

1. Гуревич, В.И. Уязвимости микропроцессорных реле защиты: проблемы и решения / В.И. Гуревич. – М. : Инфра-Инженерия, 2014. – 256 с.
2. MIL-STD-188-125-1 High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions; Part 1: Fixed Facilities.
3. Nalhorczyk, A.J. HEMP Filter Design to Meet MIL-STD-188-125 PCI Test Requirements / A.J. Nalhorczyk // IEEE. 10-th International Conference Electromagnetic Interference & Compatibility, 26-27 Nov., 2008. – PP. 205–209.
4. MIL-STD-461F Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, 2007.
5. IEC 61000-4-4 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-4: Testing and measurement techniques - Electrical fast transient/burst immunity test, 2012.
6. Application Notes Cat. 1: HEMP Filter Maintenance and Monitoring. Rev.1. MPE Ltd., December, 2012.
7. Surge Protective Device Response Time, Application Note 9910-0003A, Schneider Electric, August 2011.
8. Power Quality Surge Protective Devices (SPD), Application Notes: Response Time ratings, DET-733 (8/10), General Electric.
9. Surface Mount Power TVS Diodes Deliver Optimal Protection for Power Supply. Application Note, Bourns, Inc, 7/14.e/ESD1435.

10. Goldman, S.J. Selecting Protection Devices: TVS Diodes vs. Metal-Oxide Varistors / S.J. Goldman // Power Electronics, June 1, 2010.

11. IEC 61000-4-25:2001 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-25: Testing and measurement techniques - HEMP immunity test methods for equipment and systems.

12. Гуревич, В.И. Проблемы тестирования микропроцессорных реле защиты на устойчивость к преднамеренным электромагнитным деструктивным воздействиям / В.И. Гуревич // Компоненты и технологии. – 2014. – № 12. – С. 161–168.

13. MIL-STD-220B Method of Insertion Loss Measurement, Department of Defense, 1959.