

Владимир Гуревич

Проблема заземления электрооборудования как основного метода защиты от ЭМИ ЯВ

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитный импульс (ЭМИ), возникающий при ударе молнии (ЭМИМ) в объекты, находящиеся под потенциалом земли, будь то отдельно стоящее дерево, вышка, здание или штырь молниеотвода — природное явление хорошо известное на протяжении всей истории человечества и хорошо изученное в последнее столетие, благодаря чему давно разработаны и широко применяются на практике методы и средства защиты от него.

Что касается электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ), возникающего у поверхности земли при детонации ядерного боеприпаса на большой высоте (30–400 км), то здесь ситуация иная. Первые прямые эксперименты по изучению ЭМИ ЯВ были проведены летом 1962 г. в США. При проведении этих испытаний были зафиксированы мощные электромагнитные импульсы, которые обладали большим поражающим действием на электронную аппаратуру, линии связи и электроснабжения, радио- и радиолокационные станции и даже вывели из строя уличное освещение на Гавайях, на расстояниях около полутора тысяч километров от эпицентра взрыва.

Осенью того же года в Советском Союзе в рамках так называемого «Проекта К» была произведена серия из трёх высотных ядерных взрывов, каждый мощностью в 300 кт, над территорией военного полигона в Сары-Шаган, Карагандинской обл. в Казахстане, направленных на изучение явления ЭМИ ЯВ. Во время этих тестов были зафиксированы импульсные токи до 3400 А в проводах воздушных телефонных линий, которые обусловили появление импульсного напряжения с амплитудой до 28 кВ, срабатывание всех установленных в аппаратуре разрядников и перегорание всех предохранителей, что сопровождалось прекращением работы системы связи, зафиксировано повреждение систем радиосвязи на расстоянии 600 км от эпицентра взрыва, выход из строя радиолокатора, расположенного на расстоянии 1000 км, повреждения трансформаторов и генераторов на электростанциях, пробой изоляторов ЛЭП. Серьёзные повреждения аппаратуры были зафиксированы и на космодроме Байконур. Причём речь идёт об аппаратуре поколения 60-х годов, выполненной на электромеханических элементах и на радиолампах, на порядки более устойчивых к воздействию ЭМИ ЯВ, чем современная микроэлектронная и микропроцессорная техника.

Деструктивное воздействие обоих типов ЭМИ на объекты аналогично и обусловлено двумя факторами: очень высокой амплитудой импульса напряжения, прикладываемого к объекту и большим импульсным током, протекающим через этот

объект со всем связанным с этими двумя факторами широким спектром вторичных опасных и разрушительных для электронной и электротехнической аппаратуры проявлений ЭМИ. Такая схожесть последствий деструктивного воздействия этих явлений на объекты привела к тому, что хорошо изученные и проверенные на практике методы и средства защиты от молнии стали распространять и на ЭМИ ЯВ. например, такие, как основополагающий принцип защиты от молнии — обязательное заземление объектов через минимально возможное сопротивление или использование разрядников и фильтров, отводящих энергию импульса на землю.

Но так ли это на самом деле? Действительно ли характеристики и свойства ЭМИМ и ЭМИ ЯВ настолько близки, что методы и средства защиты от них могут быть идентичными?

Основные отличия между ЭМИМ и ЭМИ ЯВ

ЭМИМ — это фактически точечный электрический пробой газового промежутка (воздуха) между двумя электродами, между которыми имеется высокая разность потенциалов: облаком и землёй (или с объектом, расположенным на земле и имеющим потенциал земли), рис. 1.

ЭМИ ЯВ — это объёмное электрическое поле охватывающее большую площадь и воздействующее на объекты на удалении в сотни и тысячи километров от эпицентра взрыва, обусловленное перемещением в пространстве огромного объёма заряженных частиц: электронов и ионов, образовавшихся в результате сложных физических процессов, возникающих при ядерном взрыве в атмосфере (рис. 1).

Причём структура этого поля очень неоднородная и условно подразделяется на три составляющие: E1, E2 и E3. E1 — очень короткий импульс электрического поля с длительностью 2/25 нс и с напряжённостью у поверхности земли, до-

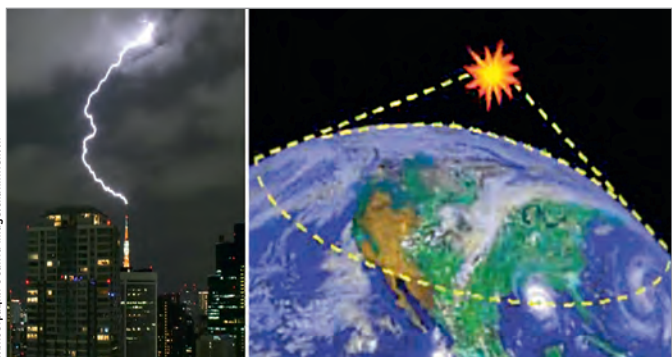


Рис. 1. Зона поражения молнии и ЭМИ ЯВ

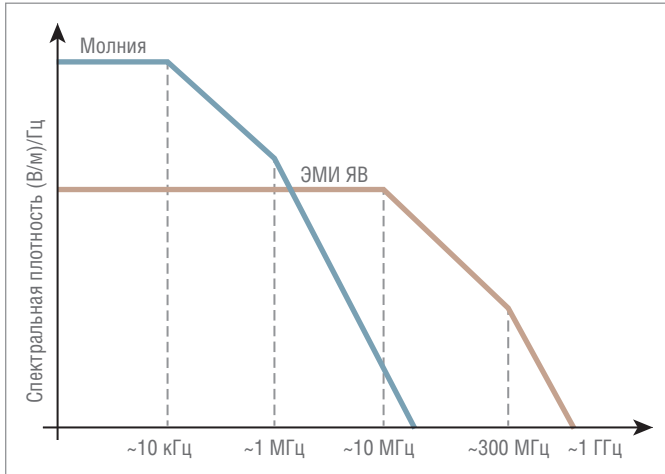


Рис. 2. Спектральная плотность энергии ЭМИ молнии и высотного ядерного взрыва

стигающей 50 кВ/м. E2 — более слабый импульс электрического поля, с длительностью в единицы-десятки миллисекунд. E3 — очень длинный импульс электрического поля низкого напряжения, связанный с процессами в ионосфере, который может длиться до нескольких минут и обуславливает появление значительных квазипостоянных токов в протяжённых электропроводящих средах, таких, как рельсы, трубы, кабели и провода.

Наиболее мощным, разрушительным и сложным с точки зрения защиты от него является импульс E1 с его вертикальной и горизонтальной составляющими, поэтому в дальнейшем под ЭМИ ЯВ будем понимать импульс E1.

ЭМИ ЯВ имеет гораздо меньшую энергию, чем ЭМИМ (рис. 2) и существенно меньшую длительность импульса (рис. 3), но из-за охвата огромной площади и одновременного воздействия на тысячи объектов, является гораздо более опасным, чем ЭМИМ.

Как отмечалось ранее, ЭМИМ и ЭМИ ЯВ распространяются в пространстве и достигают поверхности земли совершенно разными способами. Если с распространением ЭМИМ по ионизированному каналу в виде единичного или даже разветвлённого шнура всё более или менее понятно, то с ЭМИ ЯВ всё обстоит намного сложнее. Во-первых, форма электрического поля ЭМИ ЯВ у поверхности Земли формируется под влиянием магнитного поля Земли и является достаточно неоднородной. Во-вторых, электромагнитная волна достигает поверхности Земли под определённым углом и поэтому электрическое поле у поверхности Земли имеет вертикальную и горизонтальную составляющие. В-третьих, часть электромагнитной энергии, падающей под углом на поверхность Земли, отражается от неё и может суммироваться с энергией, падающей на Землю.

Уже из одного лишь рассмотрения этих различий между ЭМИМ и ЭМИ ЯВ возникает предположение о совершенно различном их воздействии на объекты, находящиеся на поверхности Земли.

Действительно, если взять, например, металлический штырь длиной 10 метров, один конец его забить вертикально в землю и разместить на этом штыре датчик тока, то при попадании молнии в верхний свободный конец этого штыря, датчик зарегистрирует протекание по штырю импульса тока большой амплитуды, поскольку заземлённый конец штыря имеет нулевой (условно) потенциал, а верхний конец приобретает высокий относительно земли потенциал молнии.

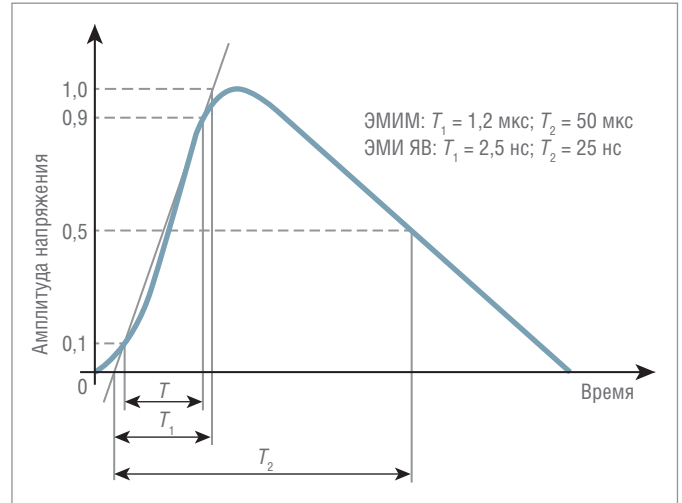


Рис. 3. Различия во временных параметрах ЭМИМ и ЭМИ ЯВ

Если же нижний конец такого же штыря хорошо изолировать от поверхности земли и установить так же вертикально, то в этом случае в штыре не будет никакого тока, даже если предположить, что молния попала в него, поскольку отсутствует разность потенциалов между концами штыря (различными ёмкостями концов штыря относительно земли можно пренебречь ввиду их малости).

При воздействии на такой же изолированный штырь ЭМИ ЯВ между концами штыря возникнет высокая разность потенциалов (теоретически, десятки киловольт) и датчик тока зафиксирует протекание через штырь импульса тока достаточно большой амплитуды. Более того, высокая разность потенциалов возникнет между концами штыря даже если расположить его горизонтально поверхности земли. Что изменится, если один конец такого горизонтального штыря заземлить? Участие земли может несколько усложнить картину, поскольку ЭМИ ЯВ проникает в грунт и создаёт в нём разность потенциалов. Этот эффект учитывают в моделях высоковольтных линий электропередач (ЛЭП) с заземлённой нейтралью при изучении воздействия на них ЭМИ ЯВ. В такой модели напряжение на открытом конце линии относительно земли будет зависеть от высоты проводов ЛЭП над землёй, их протяжённости и проводимости грунта [1]. Однако такая модель не соответствует рассматриваемому примеру, в котором заземление одного конца штыря не может повлиять на разность потенциалов между ними. Такой же эффект даст заземление отдельного электронного объекта, например, электронного прибора, установленного в шкафу управления, размещённого в зале управления энергообъекта с подключёнными к нему полностью изолированными контрольными кабелями. Разность потенциалов, возникающая на концах этих кабелей под действием ЭМИ ЯВ и приложенная ко входам электронного прибора, не имеет никакого отношения к земле и её потенциалу (если пренебречь ёмкостями на землю). Иными словами, такой кабель с разностью потенциалов на концах будет работать как источник импульсного напряжения, изолированный от земли, примерно, как заряженный аккумулятор, в изолированном корпусе. Что произойдёт при заземлении одного из полюсов аккумулятора? А ровным счётом ничего, ни с аккумулятором, ни с изолированным потребителем, получающим питание от этого аккумулятора. Так почему же что-то должно измениться при заземлении объекта, подвергнутого воздействию ЭМИ ЯВ? Это очень важный, принципиальный вопрос, от которого напрямую зависит эф-



Иллюстрация с сайта defektant.livjournal.com

Иллюстрация с сайта zener-ibide

Рис. 4. Двухэлектродные стационарные испытательные стенды, предназначенные для испытания относительно крупных объектов на устойчивость к воздействию ЭМИ ЯВ

фективность защиты оборудования от ЭМИ ЯВ. В соответствии с [2]: «Составляющая E1 ЭМИ ЯВ эффективно взаимодействует также и с короткими кабелями (1–10 метров), присоединёнными к оборудованию (цепи питания и управления) и может наводить в них значительные напряжения и токи, которые будут подведены вовнутрь оборудования». Как можно видеть, в этой цитате нет вообще упоминания о заземлении.

К сожалению, достаточно сложно экспериментально проверить влияние заземления на группу шкафов с электронной аппаратурой, соединённых между собой контрольными кабелями, на крупных стационарных испытательных стендах, моделирующих ЭМИ ЯВ. Такие стенды содержат мощный импульсный генератор Маркса, выход которого подключён к двум электродам. Один из этих электродов выполнен в виде заземлённой металлической сетки в основании стенда, а второй — также в виде металлической сетки, расположенной на изоляторах над первой сеткой на высоте 5–20 м (рис. 4). Тестовый импульс высокого напряжения прикладывается с выхода генератора между этими двумя электродами, то есть между землёй и верхним электродом. В такой схеме испытаний хорошее заземление экранов и металлических оболочек шкафов испытываемого оборудования всегда будет выполнять роль эффективного средства защиты от ЭМИ ЯВ. Такая модель больше подходит для испытания на воздействие молнии, чем на воздействие ЭМИ ЯВ.

ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ КАК ОСНОВНОЕ СРЕДСТВО ЗАЩИТЫ ОТ ЭМИ ЯВ

Необходимость обязательного заземления всех видов электронного и электротехнического оборудования обосновывается как основное средство защиты от ЭМИ ЯВ во всех без исключения стандартах, как гражданских, так и военных, во

всех наставлениях и рекомендациях. Но почему, если система заземления не является для ЭМИ ЯВ, в отличие от разряда молнии, противоположным электродом с противоположным потенциалом, а объёмный заряд, образованный ЭМИ ЯВ у поверхности земли, не имеет отношения к электрическому заряду земли? В соответствии с [3]: «Причины для заземления различны, и было бы слишком самонадеянным пытаться точно установить правила заземления без учёта этих причин и целей. Эти причины и цели обычно основаны на необходимости функционального заземления аппаратуры и безопасности персонала. В проекте системы заземления может быть добавлен ещё один аспект — устойчивость к ЭМИ ЯВ, но причины и цели заземления остаются при этом неизменными. Основная цель заземления электронной аппаратуры состоит в том, чтобы установить устойчивый опорный потенциал, относительно которого формируются напряжения питания и управляющих сигналов».

Именно такие соображения и являются причиной стандартных рекомендаций о стандартных методах заземления во всех документах, имеющих отношение к ЭМИ ЯВ. Однако функциональное заземление электронной аппаратуры и заземление с целью обеспечения безопасности может быть выполнено и на иных принципах, без прямого жёсткого заземления [4–6].

Вместе с тем совершенно очевидно, что разветвлённая и распределённая по большой площади система заземления играет роль огромной антенны для ЭМИ ЯВ, поглощающей энергию с большой площади и доставляющей её через цепи заземления прямо к чувствительной электронной аппаратуре. Конечно, эта энергия будет ослаблена частично электропроводным грунтом, но даже той её части, которая проникнет в систему заземления, будет вполне достаточно для того, чтобы привести к опасному подъёму потенциала непосредственно в электронных цепях высокочувствительной микропроцессорной аппаратуры (например, микропроцессорных устройств релейной защиты — МУРЗ):

- «Расчёты наводок от ЭМИ ЯВ на горизонтальные проводники, расположенные в грунте на территории подстанции, дают значения в 10 кВ, а в некоторых случаях они могут достигать и 20 кВ» [2];
- «Под заземлением обычно понимают часть цепи, имеющей относительно низкое полное сопротивление по отношению к местной поверхности земли. Реальные системы заземления, подпадающие под это определение, однако, могут быть далеко не оптимальными и поэтому могут быть более вредными с точки зрения защиты от ЭМИ ЯВ, чем вообще отсутствие заземления» [7];
- «Система заземления может рассматриваться как потенциально опасная часть, способствующая проникновению помехи от ЭМИ ЯВ в защищённую систему» [8];
- «Множество элементов оборудования могут эффективно работать как поглощающие и передающие энергию ЭМИ ЯВ, например, такие, как системы электропитания, телефонные линии, антенны, расположенные в земле кабели, а также системы заземления» [9].

Во многих источниках содержатся и прямо противоположные высказывания по поводу заземления:

- «Первичный эффект ЭМИ ЯВ — это возникновение значительных напряжений и токов в протяжённых электропроводящих структурах, таких как линии электропитания, кабели в земле, антенны, а также системы заземления» (стр. 935)... — И далее, на той же самой странице: «Основной це-

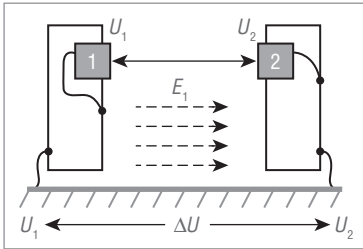


Рис. 5. Принцип воздействия составляющей E_1 ЭМИ ЯВ на заземлённую электронную аппаратуру

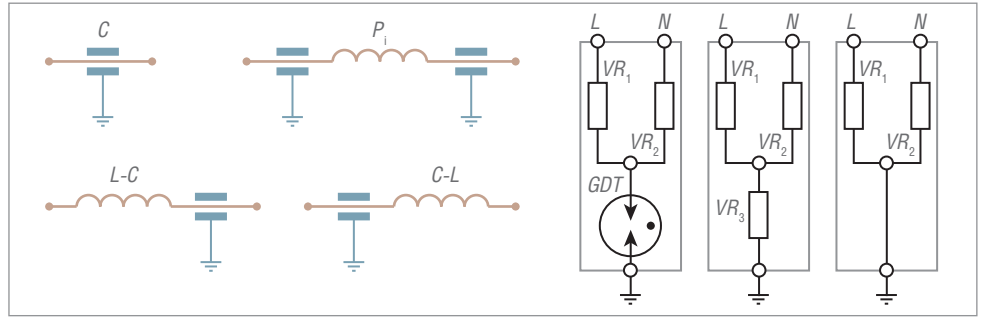


Рис. 6. Упрощённые схемы различных типов LC-фильтров ЭМИ ЯВ с элементами защиты от импульсных перенапряжений

лю системы заземления является перенаправление токов, индуцированных ЭМИ ЯВ, в землю» [10];

- «Заземление не обеспечивает непосредственную защиту от ЭМИ ЯВ (стр. 5-3)... – и далее: «Заземление требуется для защиты от ЭМИ ЯВ» (стр. 5-5) [9].

Какие же выводы можно сделать из таких противоречивых высказываний?

Большинство отдельных печатных плат электронной аппаратуры имеет свою собственную землю – систему печатных проводников с так называемым нулевым, или опорным потенциалом, относительно которого образуются все другие напряжения, используемые для работы аппаратуры. Эта внутренняя земля, как правило, соединяется с металлическим корпусом, а он, в свою очередь, с внешней системой заземления. Известно, что потенциал системы заземления может существенно повышаться и при обычных ударах молнии, однако считается, что если между всеми электронными устройствами будет сохраняться общий потенциал системы заземления, то есть не будет возникать разность потенциалов между цепями нулевого потенциала различных устройств, то это повышение общего потенциала и отличие его от нуля, происходящее одновременно во всех устройствах, не способно вызвать нарушения в работе этих устройств. На этом предположении основана вся теория заземления, предписывающая сохранять минимальными сопротивления элементов системы заземления, применять эквипотенциальные поверхности и тому подобные меры, направленные на то, чтобы предотвратить возможность появления разности потенциалов между цепями нулевого потенциала различных устройств, удалённых друг от друга и поэтому заземлённых в разных точках, но имеющих электрические и информационные связи между собой. При этом не рассматривается вопрос о том, что происходит в отдельно взятом электронном устройстве при повышении его нулевого потенциала. Дело в том, что любая электронная схема содержит множество нелинейных элементов и элементов, обладающих ёмкостью и индуктивностью, соединённых с цепью нулевого потенциала, поэтому при импульсном повышении потенциала этой цепи напряжения в различных точках электронной схемы не возрастут полностью синхронно. Это можно наглядно представить, как пластину с установленными на ней грузами с разной массой, прикреплёнными к пластине посредством пружин с различной жёсткостью. При плавном подъёме этой пластины (то есть при плавном увеличении потенциальной энергии) потенциальная энергия всех установленных на ней элементов увеличивается синхронно. Но при резком подъёме пластины произойдёт несинхронное изменение положения и потенциальной энергии элементов, а если они были при этом механически соединены между собой, то возможно даже разрушение этих соединений.

То есть даже наличие эквипотенциальной поверхности и сохранение нулевой разности между цепями нулевого потенциала различных устройств ещё не гарантирует отсутствие сбоев в работе высокочувствительной электронной аппаратуры. В реальных же условиях эксплуатации электронной аппаратуры, расположенной на объектах большой площади, очень сложно, а иногда и вообще невозможно обеспечить условие сохранения нулевой разности потенциалов между цепями нулевого потенциала, особенно в случае, когда система заземления работает как антенна (рис. 5). Такая ситуация характерна для территорий крупных энергетических и промышленных предприятий, таких как электростанции и подстанции, нефтеперерабатывающие комплексы и др.

УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ЭМИ ЯВ

Устройства защиты от импульсных перенапряжений, предназначенные для защиты от ЭМИ ЯВ, включаются обычно между защищаемыми цепями и системой заземления. Фильтры, специально предназначенные для защиты от ЭМИ ЯВ, содержат элементы, отводящие энергию импульса со входов на землю (рис. 6).

Ещё одна проблема – различие в параметрах фильтров для импульса, приложенного между входом и землёй, по сравнению с импульсом, приложенным между отдельными входами (рис. 7). При этом основная защита предусмотрена как раз между каждым входом и землёй. А многие конструкции фильтров вообще выполнены с одним входным выводом, одним выходным выводом и заземлённым корпусом (рис. 8), то есть предназначены для защиты чувствительных входов аппаратуры только от импульсов, имеющих повышенную амплитуду относительно земли и обеспечивают отвод энергии только со входа на землю.

Но если система заземления не является областью обратного или нулевого потенциала для ЭМИ ЯВ, то куда же будет отводиться энергия импульса? И если одновременно с импульсом

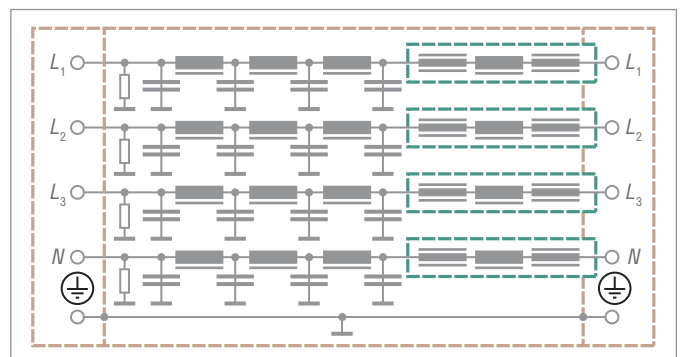


Рис. 7. Трёхфазный фильтр ЭМИ ЯВ с варисторами, включёнными между входами и землёй в дополнение к конденсаторам

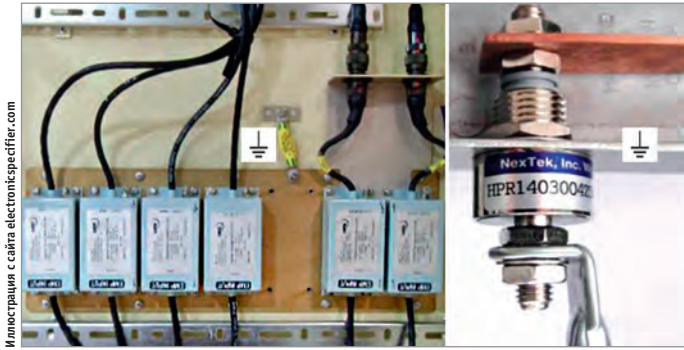


Рис. 8. Фильтры, предназначенные для защиты от импульсов ЭМИ ЯВ, приложенных ко входам аппаратуры относительно земли

высокого напряжения на входе фильтра или устройства защиты от перенапряжений возникнет такой же импульс и на электроде заземления, то как этот фильтр сможет ослабить ЭМИ ЯВ?

Вопросы, на которые пока нет ответа, поэтому автор призывает специалистов к широкому обсуждению данной проблемы.

Выводы

Использование заземления электронной и электротехнической аппаратуры как основного средства защиты от ЭМИ ЯВ представляется не только весьма сомнительным, но и опасным, поскольку вместо ослабляющего воздействия на ЭМИ ЯВ заземление может лишь усилить его деструктивное влияние на аппаратуру. Однако, поскольку такое заземление предусмотрено во всех нормативных документах, требуется широкое обсуждение этой проблемы среди специалистов. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Scharfman W.E., Vance E.F. Electromagnetic Pulse Coupling and Propagation to Power Lines: Theory and Experiments : Final report AFWL-TR-73-287. — Menlo Park : Stanford Research Institute, 1974.
2. High-Impact, Low-Frequency Event Risk to the North American Bulk Power System. A Jointly-Commissioned Report of North American Electric Reliability Corp. and the U.S. Department of Energy, November 2009 Workshop. — NERC, 2010.
3. Vance E. F. Electromagnetic-Pulse Handbook for Electric Power Systems ^ Report AD-A009 228. — Menlo Park : Stanford Research Institute, 1975.
4. Гуревич В.И. К вопросу о функциональном заземлении микропроцессорных устройств релейной защиты // Релейная защита и автоматизация. — 2015. — № 3.
5. Гуревич В.И. Нужно ли заземлять микропроцессорные устройства релейной защиты? // Автоматизация и ИТ в энергетике. — 2016. — № 6.
6. Гуревич В.И. Проблемы заземления электронной аппаратуры электроэнергетических объектов // Компоненты и технологии. — 2017. — № 4.
7. The Effects of Nuclear Weapons. — The U. S. Department of Defense and the Energy Research and Development Administration, 1977.
8. Vance E. F. The Nuclear Electromagnetic Pulse // Handbook of Electromagnetic Compatibility. — Academic Press, 2013.
9. Grounding and Bonding in Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (C4ISR) Facilities : TM 5-690. — Washington, DC : Headquarters, Department of the Army, 2002.
10. Joffe E.B., Lock K.-S. Grounds for Grounding: A Circuit-to-System Handbook. — Wiley, 2010.

E-mail: vladimir.gurevich@gmx.net

СВЕРХТОНКИЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ НА DIN-РЕЙКУ



- Выходные мощности 30, 50 и 70 Вт
- Размер передней панели на 44% меньше, чем у аналогов
- Выходные напряжения от 5 до 48 В
- КПД до 89% (для серии DPC70)
- Полная выходная мощность обеспечивается в диапазоне входного напряжения 100–264 В
- Потребляемая мощность в режиме холостого хода < 0,3 Вт (серии DPC30 и DPC50)
- Светодиодный индикатор включения выходного напряжения
- Полный комплект защит
- Широкий диапазон регулировки выходного напряжения
- Диапазон рабочих температур от – 25 до +70 °С

PROSOFT®
WWW.PROSOFT.RU

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

МОСКВА
(495) 234-0636
info@prosoft.ru

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
(812) 448-0444
info@spb.prosoft.ru

ЕКАТЕРИНБУРГ
(343) 376-2820
info@prosoftsystems.ru



Реклама