

Проблемы заземления электронной аппаратуры электроэнергетических объектов

**Заземление может и не быть решением;
скорее, оно может быть частью проблемы.**

Joffe E. B., Lock K. S.

Grounds for Grounding. A circuit-to-System Handbook

Заземление электронной аппаратуры в промышленности и в электроэнергетике рассматривается обычно как необходимое условие обеспечения ее работоспособности в условиях воздействия электромагнитных помех. Но так ли это на самом деле? Действительно ли общепринятые сегодня подходы к заземлению электронной аппаратуры позволяют решить проблемы электромагнитной совместимости? Оказывается, ответ на этот вопрос не однозначен, а существующая практика использования заземления противоречива по своей сути. Автором предлагается отличный от применяемого сегодня подход к проблеме заземления электронной аппаратуры, позволяющий избавиться от существующих противоречий.

Владимир ГУРЕВИЧ

Введение

В соответствии с нормативными документами, различают два вида заземления: защитное, выполняемое в целях электробезопасности, и функциональное, выполняемое для обеспечения работоспособности электроустановки (не в целях электробезопасности). Современные электронные устройства управления, защиты и автоматики, применяемые в электроэнергетике, имеют внутренние электронные цепи, полностью изолированные от всех внешних цепей. Например, микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ) содержат во входных аналоговых цепях внутренние трансформаторы тока и напряжения, изолирующие внутренние аналого-цифровые преобразователи от внешних цепей тока и напряжения. Логические входы МУРЗ выполнены на оптронах, с высоким уровнем изоляции входа от выхода. Выходные цепи МУРЗ выполнены на основе электромеханических реле, обеспечивающих изоляцию внутренней электронной схемы от внешних цепей. Внутренний импульсный источник питания МУРЗ содержит трансформатор, обеспечивающий гальваническую изоляцию внутренних элементов схемы от внешних цепей питания, да и сама эта цепь питания (постоянного тока) в большинстве случаев полностью изолирована от «земли».

Таким образом, с одной стороны, современные электронные устройства, применя-

емые в электроэнергетике, не требуют для своей работы наличия функционального заземления. С другой стороны, заземление электронной аппаратуры часто рассматривается как основная мера ее защиты от электромагнитных помех, то есть как обязательное условие нормального ее функционирования в реальных условиях эксплуатации при воздействии электромагнитных помех. Чего стоит одно лишь название публикации [1], ставящее знак равенства между электромагнитной совместимостью (Electromagnetic Compatibility, EMC) и заземлением для систем автоматики и управления. По свидетельству К. Армстронга [2], «в течение многих десятилетий существует огромное количество мифов вокруг термина «заземление», как при разработке схем, так и в вопросах электромагнитной совместимости». В этой связи проблемы заземления электронной аппаратуры требуют более подробного рассмотрения.

Типы электромагнитных помех

Рассмотрим отдельно четыре основных типа помех:

- кондуктивные;
- индуктивные;
- емкостные;
- электростатические.

Кондуктивные помехи распространяются при наличии непосредственного электриче-

ского контакта между электрическими цепями и делятся на два вида:

1. помехи типа «провод–земля», напряжение которых приложено между каждым из проводников и «землей», которые еще называются несимметричными, синфазными, общего вида;
2. помехи типа «провод–провод», напряжение которых приложено между отдельными электрическими цепями или между элементами одной и той же электрической цепи, которые еще называются симметричными, противофазными, дифференциальными.

Синфазные помехи, в отличие от дифференциальных, как правило, не приводят к сбоям в процессе работы электронного оборудования, но могут полностью вывести из строя такое оборудование из-за электрического пробоя внутренней изоляции (или *p-n*-переходов) в микросхемах и микропроцессорах. С другой стороны, если электронное оборудование полностью изолировано от «земли», то импульсные помехи и перенапряжения относительно земли (синфазные несимметричные помехи общего вида) никак не могут повлиять на это оборудование, подобно тому, как высокое напряжение относительно земли не мешает птицам спокойно сидеть на высоковольтных проводах. Дифференциальные же помехи вообще не имеют отношения к наличию или отсутствию заземления.

Что касается индуктивных помех, распространяющихся посредством электромагнитных полей, то, как известно, эффективная защита от помех такого типа осуществляется путем размещения чувствительной электронной аппаратуры внутри замкнутых металлических оболочек («клетка Фарадея»), роль которых призваны выполнять корпуса электронных приборов. Как известно, заземление «клетки Фарадея» никак не влияет на эффективность ослабления ею индуктивных помех.

С емкостными помехами дело обстоит несколько сложнее, поскольку помехи этого типа распространяются через емкостные связи между проходящими рядом проводниками, между близко расположенными металлическими корпусами, а также между перечисленными элементами и «землей». Заземление экранов проводов и металлических корпусов (впрочем, так же, как и снижение емкости) позволяет устранить емкостные помехи синфазного типа и практически не влияет на емкостные помехи дифференциального типа.

Статические помехи могут появляться в результате накопления статического заряда на изолированном от «земли» корпусе и возникающих в результате этого периодических пробоев на «землю». Заземление корпуса позволяет предотвратить накопление статического заряда. Однако для устранения электростатических (и даже частично емкостных) помех синфазного типа вовсе не требуется наличие низкоомного заземления, достаточно соединить корпус с системой заземления через высокоомный резистор, сопротивлением около 1 ГОм.

Совершенно очевидно также, что заземление корпуса МУРЗ никак не способно повлиять на помехи всех типов, проникающие на внутренние электронные элементы по кабелям и проводам, подключенным к МУРЗ. Тем не менее внутренняя «земля» электронной схемы во многих типах МУРЗ, выполняющая роль цепи «нулевого (опорного) потенциала», обычно конструктивно соединена с металлическим корпусом, а через него и со внешней системой заземления. Иногда, для чувствительной электроники, используют отдельный контур заземления, соединенный в одной точке с общим контуром заземления (Signal Reference Subsystem), что принципиально не меняет сущности заземления. При этом предполагается, что многочисленные электронные устройства, имеющие электрические и информационные связи между собой, будут обладать общим нулевым (опорным) потенциалом, предотвращающим сбой в работе высокочувствительной электроники из-за электромагнитных помех, создающих дополнительную разность потенциалов между цепями нулевого потенциала, если их не заземлить. Такая практика, по свидетельству [3], «обеспечивает опорный потенциал для релейной защиты и другого оборудования и помогает

защитить оборудование и персонал от мощных высокочастотных воздействий». Это общепринятый подход и общая практика обеспечения ЭМС электронной аппаратуры. Однако, как отмечается в [4], «множество проблем с электромагнитными помехами возникает по той причине, что разработчики считают заземление идеальным и не уделяют достаточно внимания реальным характеристикам систем заземления».

Проблемы конвенциональных систем заземления

Не является секретом, что потенциал системы заземления относительно «земли» может повышаться при разрядах молнии. Вместе с тем 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, удаленных друг от друга и поэтому заземленных 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 потенциала цепи «нулевого потенциала». Дело в том, что любая электронная схема содержит множество нелинейных элементов и элементов, обладающих емкостью и индуктивностью, соединенных 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, прикрепленными к пластине посредством пружин с различной жесткостью. При плавном подъеме этой пластины (то есть при плавном увеличении потенциальной энергии) потенциальная энергия всех установленных на ней элементов увеличивается синхронно. Но при резком подъеме пластины произойдет 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 раз-

ности между цепями «нулевого потенциала» различных устройств еще 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» (то есть условие «отсутствия даже малейшего электрического потенциала на корпусе» [5]) при попадании молнии, несмотря на все ухищрения и удорожание системы заземления.

По данным, представленным в [6], в ситуации, когда множество электрических аппаратов и отдельных электронных устройств расположены на значительном удалении друг от друга и заземлены в местах их расположения, неизбежно появление высокой разности потенциалов между точками заземления, которая при разрядах молнии может достигать до 10 кВ и более. Высокое напряжение между удаленными точками заземления возникает в результате падения напряжения на элементах системы заземления при протекании тока молнии через них, а также при протекании токов короткого замыкания. По свидетельству Дж. С. Витакера [7], «чем больше площадь территории защищаемого объекта, тем больший потенциал для проблем». В основополагающем стандарте на системы заземления для электронной аппаратуры [8] отмечается следующее: «При воздействии молнии или при аварийных ситуациях в энергосистеме разность потенциалов между электронным оборудованием и заземленными объектами может быть настолько существенной, что будет представлять угрозу электробезопасности или повреждения электронной аппаратуры».

Из всего вышесказанного следует, что в любом случае низкоомное заземление корпусов большинства типов современной чувствительной электронной аппаратуры управления, автоматики и защиты приводит к возрастанию опасности сбоев в ее работе. И это при протекании тока молнии через систему заземления под действием обычных разрядов молнии. Но разряды молнии — не единственный источник мощных электромагнитных воздействий на электронные устройства.

В последнее время стала актуальной проблема защиты электроэнергетических систем от так называемых преднамеренных дистанционных деструктивных воздействий [9], наиболее мощным из которых является электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ). При этом характер воздействия ЭМИ ЯВ на систему заземления существенно отличается от воздействия разряда молнии «по спектральной плотности энергии, переднему фронту импульса, уровню токов, повторяемости импульсов и покрываемой зоне действия» [10].

Во-первых, разряд молнии — это точечное воздействие на систему заземления, в то время как составляющая Е1 ЭМИ ЯВ создает у поверхности земли импульс распределенного электрического поля с напряженностью, достигающей до 50 кВ/м. Это поле имеет вертикальную и горизонтальную составляющие и охватывает очень большую площадь (сотни и тысячи квадратных километров).

Во-вторых, параметры составляющей Е1 ЭМИ ЯВ (2/50 нс) существенно отличаются от параметров грозового импульса (1,2/50 мкс).

В-третьих, если при попадании молнии в молниеотвод и систему заземления ставится задача снизить до минимума сопротивление элементов системы заземления с тем, чтобы снизить падение напряжения на токопроводящих элементах при протекании через них тока молнии, то в случае ЭМИ ЯВ импульс высокого напряжения прикладывается одновременно ко всем элементам системы заземления, выполняющим роль огромной антенны, поглощающей энергию с большой площади. Чем меньше сопротивление элементов этой антенны и чем больше ее размеры, тем выше ее абсорбционная способность и тем большая часть энергии доставляется напрямую к аппаратуре, подключенной к этой «антенне». Речь идет об импульсном напряжении с амплитудой в сотни киловольт.

О наличии существенных отличий между молнией и ЭМИ ЯВ упоминается также в ряде других источников. Например, в [11] прямо говорится о том, что «заземление» обычно трактуется как часть цепи, имеющей относительно низкое полное сопротивление по отношению к локальной поверхности земли. Для защиты от ЭМИ ЯВ обычная система заземления, которая соответствует этому определению, может, однако, не быть оптимальной, а может быть намного хуже,

чем даже отсутствие заземления». В [12] отмечается, что «технические средства, используемые для защиты оборудования от импульсов молнии с пологим передним фронтом, не являются достаточно эффективными для защиты от импульсов ЭМИ ЯВ с крутым передним фронтом». В [13] указано, что «в идеале заземление должно поддерживать единый потенциал всех компонентов системы. На практике, однако, ввиду возможных петель индуктивности, емкостных связей, сопротивления элементов присоединения к заземлению, наводок на заземлении, как на антенне, и других явлений, высокие потенциалы могут появиться в системе заземления. Поэтому правильный выбор концепции системы заземления очень важен в философии защиты от ЭМИ ЯВ». К сожалению, далее констатации факта и в этом документе дело не пошло, и никаких специальных систем заземления, способных разрешить противоречие между необходимостью иметь заземление и опасностью, которую представляет собой система заземления при воздействии ЭМИ ЯВ, не предлагается. Еще более категорично звучит утверждение авторов [14], прямо указывающих на отрицательное влияние заземления на работу электронной аппаратуры: «Если не принять специальных мер, оба типа заземлителей — и внутренний, и наружный — могут стать главными источниками наводок, вызванных ЭМИ. Наружные заземлители вообще не могут служить в качестве «отводов» для ЭМИ, поскольку последний широко распределен в пространстве и глубоко проникает в землю. При этом отсутствие замкнутого контура наружного заземления еще не исключает возможности появления наводок от ЭМИ». Аналогичный по своей сущности вывод приводится также и в [10]: «ЭМИ ЯВ может индуцировать очень большие токи и напряжения в «антенну», образованную системой заземления.

Эти токи и напряжения системы заземления представляют собой серьезный риск повреждения электронных компонентов...».

Противоречивость ситуации в этом вопросе ярко отражена в фундаментальном труде [15] объемом свыше тысячи страниц. Само за себя говорит уже одно только название раздела 4.1.1: «Заземление может и не быть решением; скорее оно может быть частью проблемы». А на стр. 935 приведены два противоречащих один другому тезиса:

1. «Целью заземления является перенаправление наведенных ЭМИ ЯВ токов в землю».
2. «Первичным эффектом ЭМИ ЯВ является наведение высоких напряжений или токов во всех протяженных системах и проводниках, таких как линии электропередачи, кабели, антенны, а также системы заземления».

Из первого тезиса следует, что система заземления является приемной емкостью, поглощающей энергию ЭМИ ЯВ, а из второго — что система заземления является источником высокого напряжения, подводящим энергию ЭМИ ЯВ к заземленной аппаратуре.

Еще одной проблемой, связанной с заземлением, являются фильтры, предназначенные для защиты чувствительных входов и цепей питания электронной аппаратуры (рис. 1). Как видно по этому рисунку, синфазные несимметричные фильтры, которые иногда называют однолинейными (single line), проще дифференциальных симметричных (их иногда называют двухлинейными — two line), содержат меньше элементов, меньше по размерам и дешевле. По этой причине большинство производителей предпочитают выпускать именно синфазные несимметричные фильтры для защиты от ЭМИ ЯВ. Другие типы фильтров вообще даже не рассматриваются в документе [16], посвященном анализу различных типов фильтров, предназначенных для защиты оборудования от ЭМИ ЯВ.

Как следует из рис. 1, фильтры такого типа ослабляют сигнал, поступающий на их вход, за счет внесения потерь последовательно включенными индуктивностями и шунтирования импульсного сигнала на землю конденсаторами. «Земля», подключаемая через расположенную на корпусе клемму, является обязательным условием работоспособности фильтра. Поскольку эта клемма не изолирована от корпуса, то часто сам корпус является общим электродом заземления (рис. 2).

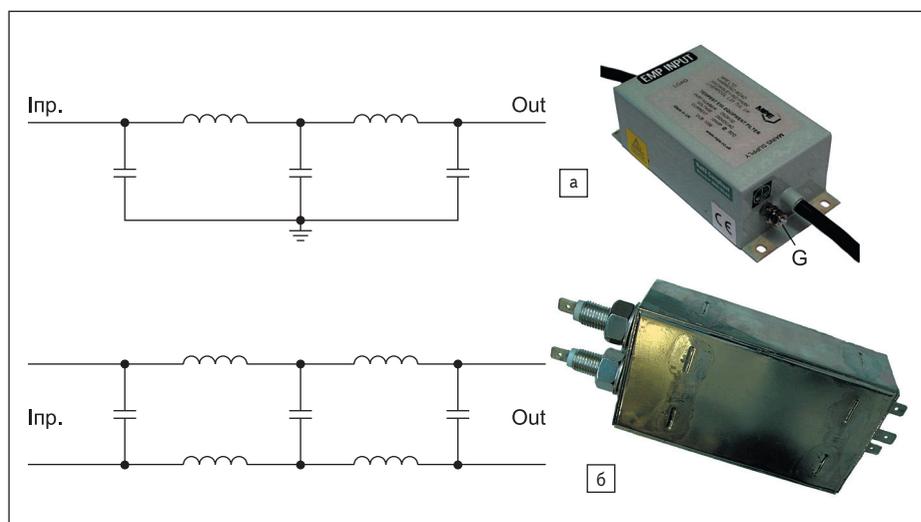


Рис. 1. Упрощенные схемы и внешний вид LC-фильтров, предназначенных для защиты от ЭМИ ЯВ:
а) синфазного несимметричного с общим проводом (asymmetrical common mode filters);
б) симметричного дифференциального (symmetrical differential mode filters)



Рис. 2. Фильтры ЭМИ ЯВ с корпусом, выполняющим роль электрода заземления

Таким образом, эти фильтры построены так, чтобы отводить энергию, попадающую на их входы, в область нулевого потенциала, в качестве которой автоматически подразумевается система заземления, но которая таковой вовсе не является. Остается только догадываться, как поведет себя такой фильтр при одновременном появлении высокого потенциала и на его входе, и на общем электроде заземления (вместо нулевого потенциала). Во всяком случае, работать корректно в таком режиме он явно не будет. По свидетельству [17], такие фильтры далеко не всегда имеют приемлемые характеристики и не рекомендуются для защиты от ЭМИ ЯВ. Возможно, именно по этой причине некоторые производители фильтров просто не указывают их вид в своих технических проспектах, а некоторые — хотя и указывают, но создают при этом такую путаницу, в которой неспециалисту в области фильтров очень трудно разобраться. Например, в проспекте известной английской компании MPE приведены описания «двухфазных» для переменного тока и «двухлинейных» для постоянного тока фильтров, предназначенных для использования в изолированных от «земли» сетях, но при этом приведены характеристики асимметричных фильтров.

Заземление типа «плавающая земля»

Если заземление создает так много проблем, может быть, электронную аппаратуру вообще лучше не заземлять? Ведь неспроста в отчете специализированной рабочей группы С4.206 СИГРЭ, посвященной защите электронного оборудования энергосистем от преднамеренных электромагнитных воздействий [18], заземление электронной аппаратуры вообще не рассматривается. Такой вариант заземления (вернее, «незаземления») рассматривается в технической литературе под названием «плавающей земли» (floating ground) — например в базовом американском военном стандарте на системы заземления MIL-HDBK-419A [19], откуда он перекочевал и в другие военные стандарты и наставления, например в [13]. Об этом варианте заземления в документах [19] и [13] говорится следующее: «Эффективность плавающей земли зависит от степени ее реальной изоляции от расположенных вблизи электропроводящих частей оборудования, то есть, чтобы быть эффективной, плавающая земля должна реально «парить в воздухе». На объектах большой площади часто бывает трудно создать такую полностью изолированную систему, но даже если такая система и была создана, очень трудно ее сохранить. В дополнение к этому плавающая земля имеет и другие ограничения. Например, статический заряд, часто накапливающийся в изолированных электронных цепях, может при разряде представлять серьезную опасность, особенно

если такие цепи расположены вблизи высоковольтных линий электропередачи. Поэтому большинство видов современного электронного оборудования, питающегося от внешних источников питания, имеет нулевой опорный потенциал в виде заземления. Еще одной проблемой плавающей земли является опасность выноса высокого потенциала на электронные цепи при повреждениях в силовых цепях, а также при воздействии разряда молнии. Не будучи соединенными в единое целое, части конструкции могут приобрести высокую разность потенциалов, сопровождающуюся пробоем и электрической дугой».

В противоположность этим утверждениям, специалисты фирмы Associated Power Technologies (APT), одного из лидирующих производителей мощных источников питания, считают [20], что: «Системы заземления являются источником целого набора проблем... Темная сторона систем заземления заключается в том, что они могут прервать функционирование электронной системы... Небольшие контуры заземления инжектируют шум в электронные системы и приводят к прерыванию или нарушениям связи в каналах передачи данных, таких как интерфейсы RS-232 или GPIB. Большие контуры заземления могут повредить электронное оборудование и даже могут представлять опасность с точки зрения техники безопасности при протекании через них больших токов». На основании проведенного в [20] анализа эти специалисты приходят к выводу о предпочтительности «плавающей земли» для электронных систем, подчеркивая, что такой подход является стандартом для продукции, выпускаемой этой компанией.

Так какой же выход из этой противоречивой ситуации?

Решение проблемы: «специальная плавающая земля»

Решением проблемы, по нашему мнению, может быть использование специальной (усовершенствованной) «плавающей земли», то есть локальной области общего потенциала (местной «земли»), образованной, например, специальной медной шиной (3), расположенной на изоляторах в металлическом шкафу (1) с установленной электронной аппаратурой (2) (рис. 3). Изолированные (с минимальной емкостью от шкафа) с помощью изоляторов (4) отдельные корпуса каждого электронного устройства (2) должны быть соединены с этой медной шиной (3). Медные шины различных шкафов, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга в одном помещении, должны быть соединены вместе внешней медной шиной, расположенной коаксиально в экранированном кожухе (5) (рис. 4).

Локальная область нулевого потенциала должна быть соединена со внешней системой заземления лишь через высоковольтный высокоомный резистор (8) (рис. 5) сопротивлением 1 ГОм, препятствующий накоплению статического заряда на корпусах электронных устройств.

Передача информации между электронными устройствами, расположенными на удалении друг от друга в различных помещениях, должна осуществляться посредством оптического волокна, а передача дискретных команд и сигналов типа «включить–отключить» между такими удаленными объектами должна осуществляться посредством специальных изолирующих интерфейсов (быстродействующих герконо-вых реле с высоковольтной изоляцией входа от выхода — геркотронов), рис. 6 [21].

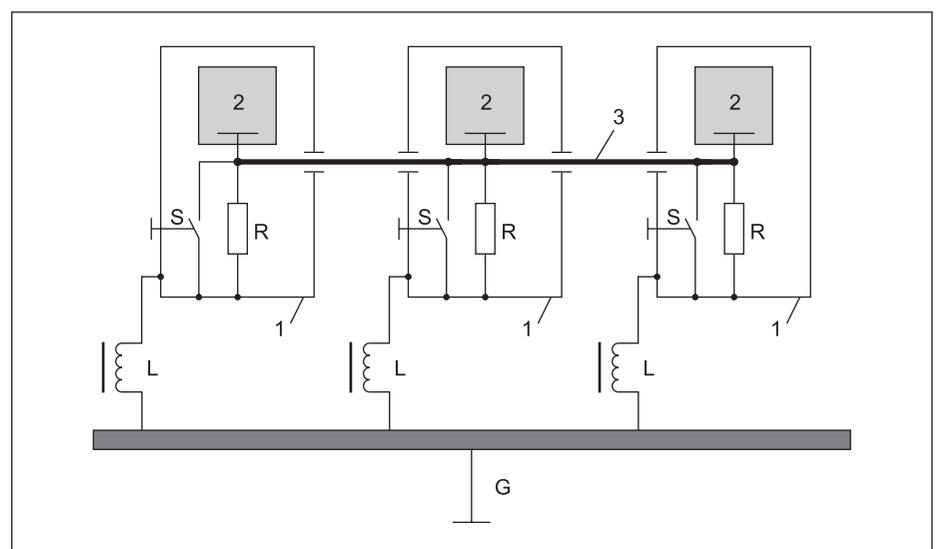


Рис. 3. Предлагаемая система заземления — «специальная плавающая земля»:

- 1 — металлические шкафы с электронной аппаратурой; 2 — электронные приборы;
- 3 — медная шина, образующая изолированную локальную область общего потенциала (местная «земля»);
- R — высокоомные высоковольтные резисторы (1 ГОм); S — рубильник, с электроблокировкой двери шкафа;
- L — дроссель; G — система заземления энергетического объекта

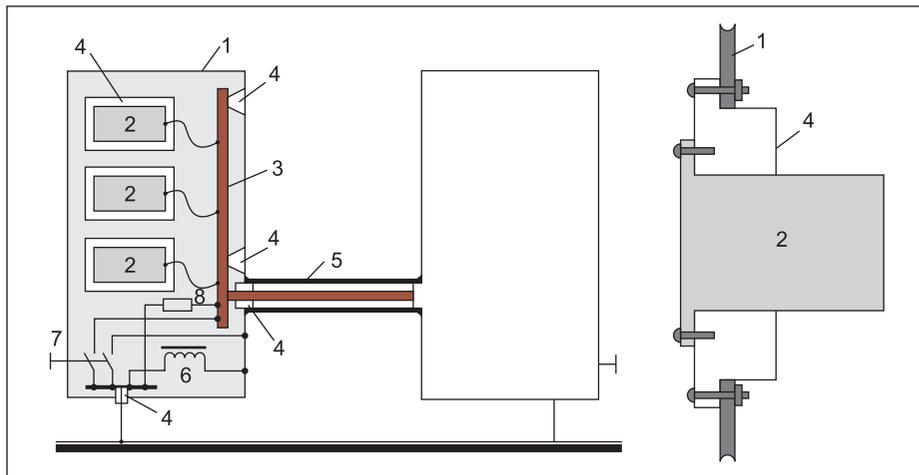


Рис. 4. Пример реализации системы заземления «специальная плавающая земля»:
1 — металлоконструкция шкафа; 2 — электронное устройство, например МУРЗ;
3 — медная шина, образующая локальную область нулевого потенциала; 4 — изоляторы;
5 — кожух-экран; 6 — дроссель; 7 — рубильник; 8 — высоковольтный высокомегаомный резистор

Как было показано выше, большинству современных электронных устройств не требуется наличие функционального заземления, поэтому предложенное выше решение не будет влиять на работоспособность электрон-

ной аппаратуры. Что касается защитного заземления, роль которого в данной концепции сводится к обеспечению безопасности персонала при возникновении внутреннего повреждения аппаратуры или кабелей в шка-



Рис. 5. Высоковольтные высокомегаомные резисторы



Рис. 6. Высоковольтные изолирующие интерфейсы на рабочие напряжения между входом и выходом 10, 20, 50 и 70 кВ [21]

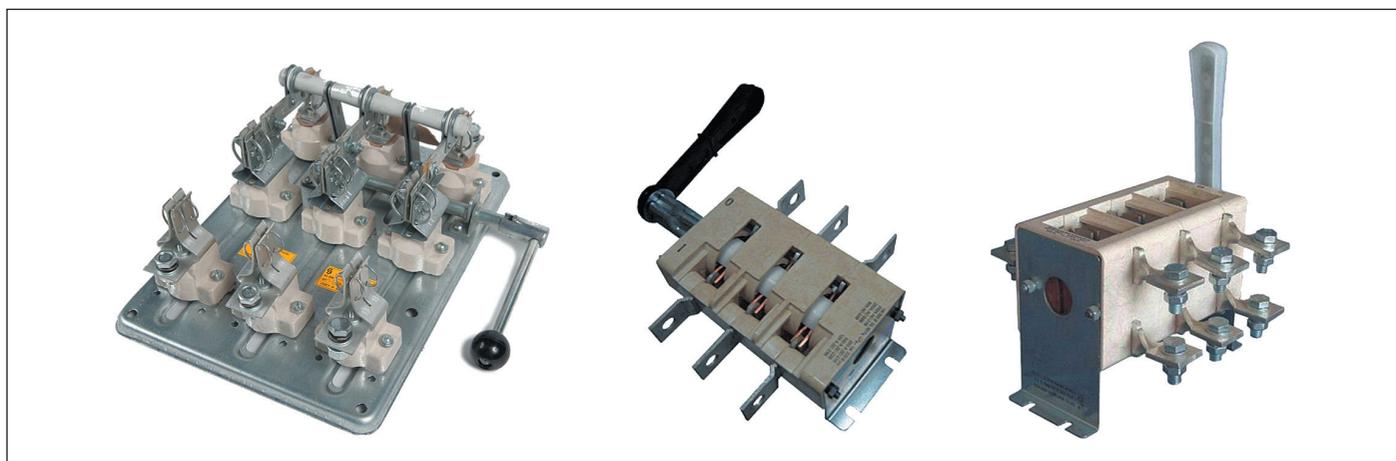


Рис. 8. Мощные трехполюсные рубильники с видимым разрывом цепей

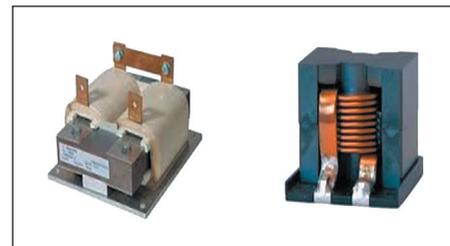


Рис. 7. Мощные высокочастотные дроссели

фу, сопровождающегося повреждением изоляции и выносом опасного потенциала, то эта проблема может быть решена несколькими мерами.

Во-первых, сам металлический шкаф может быть заземлен через мощный высокочастотный дроссель, намотанный медной шиной, обладающий очень низким сопротивлением для постоянного тока и тока частотой 50 Гц, но обладающий высоким сопротивлением для грозового импульса и особенно высоким для очень короткого импульса ЭМИ ЯВ (рис. 7).

Во-вторых, шкаф должен быть снабжен трехфазным рубильником с мощными контактами и рукояткой, выведенной из шкафа (рис. 8), который замыкается на время работ,

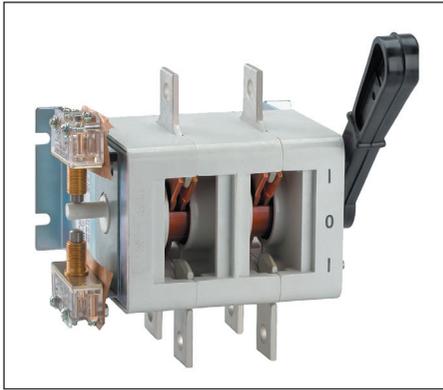


Рис. 9. Двухполюсный рубильник с блок-контактом

проводимых персоналом с оборудованием, находящимся внутри шкафа.

Один контакт используется для соединения изолированной внутренней медной шины с внешней системой заземления, второй — для прямого соединения шкафа с внешней системой заземления, третий — для отключения блокировки двери шкафа, позволяющей открыть дверь только после замыкания рубильника. Возможно также использование для этих целей двухполюсного рубильника с дополнительным блок-контактом (рис. 9).

В дополнение ко всему, если есть такая необходимость, может быть использовано переносное заземление, накладываемое на изолированную внутреннюю медную шину при работах внутри шкафа, однако, по нашему мнению, такая мера является уже излишней.

Заключение

Предложенное техническое решение позволяет освободить от присущих ему недостатков заземление типа «плавающая земля»,

что открывает возможность его широкого применения в электроэнергетике с целью повышения устойчивости электронной аппаратуры к мощным электромагнитным помехам естественного и искусственного происхождения. ■

Литература

1. Barreto R. M. EMC = Grounding on Automation and Control Systems. Applications to Eliminate Electromagnetic Interference in Industrial Plants // Interference Technology. March 19, 2013.
2. Armstrong K. Planes Need to be Grounded to Something? // Interference Technology. July 1, 2013.
3. Report ORNL/Sub/83-43374/2. Impact of Nominal Nuclear Electromagnetic Pulse on Electric Power Systems. Oak Ridge National Laboratory. 1991.
4. Duff W. G. Designing Electronic Systems for EMC: Grounding for the Control of EMI // Interference Technology. November 6, 2011.
5. IEC 60364-7-707: 1984. Electrical installations of buildings — Requirements for special installations or locations — Earthing requirements for the installation of data processing equipment.
6. Кузнецов М. Б., Матвеев М. В. Защита от вторичных проявлений молнии и обеспечение ЭМС МП аппаратуры на объектах нефтегазовой отрасли // Энергоэксперт. 2007. № 2.
7. Whitaker J. C. Electronic Systems Maintenance Handbook. Second Edition. CRC Press (Taylor & Francis Group), Boca Raton — New York — London. 2001.
8. IEEE Std. 1100-2005. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment. 2005.
9. Гуревич В. И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса. М.: Инфра-Инженерия, 2016.
10. Pamphlet No. 1110-3-2 Electromagnetic Pulse (EMP) and Tempest Protection for Facilities. Engineering and Design. Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers. 1990.
11. The Effects of Nuclear Weapons. U. S. Department of Defense and Energy Research & Development Administration. 1977.
12. AD-A009 228 Electromagnetic-Pulse Handbook for Electric Power Systems. Stanford Research Institute. 1975.
13. TM 5-690 Grounding and Bonding in Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (C4ISR) Facilities. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 2002.
14. Ricketts L. W., Bridges J. E., Miletta J. EMP Radiation and Protective Techniques. Wiley, New York — London — Sydney — Toronto. 1976.
15. Joffe E. B., Lock K. S. Grounds for Grounding. A circuit-to-System Handbook. IEEE Press, Wiley. 2010.
16. Report No. HDL-TM-81-9. Application of Filters for High-Altitude Electromagnetic Pulse Protection. U. S. Army Electronics Research and Development Command, Harry Diamond Laboratories. 1981.
17. Longoria S. N. Facility Power Filters: Symmetric vs. Asymmetric Performance // In Compliance. Sept., 2013.
18. Protection of High Voltage Power Network Control Electronics Against Intentional Electromagnetic Interferences (IEMI). Report WG C4.206 CIGRE. 2014.
19. MIL-HDBK-419A Grounding, Bonding and Shielding for Electronic Equipment and Facilities. U. S. Department of Defense. 1987.
20. To Float or Not to Float? Analysis of a Floating vs. Grounded Output. Associated Power Technologies Inc. www.aptsources.com/resources/pdf/Floating%20Output.pdf
21. Gurevich V. Protection Devices and Systems for High-Voltage Applications. Marcel Dekker, New York — Basel. 2003.