

Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Часть 1

Владимир ГУРЕВИЧ, к. т. н.
vladimir.gurevich@gmx.net

Объекты электроэнергетики являются мощными источниками электромагнитных излучений, буквально пронизывающих все прилегающее к ним пространство. Но эти объекты и сами подвергаются воздействию мощных внешних электромагнитных излучений. Еще каких-то 15–20 лет назад эти проблемы волновали лишь узкий круг теоретиков. Сегодня, в связи с расширяющимся применением в электроэнергетике высокочувствительных микроэлектронных и микропроцессорных устройств, все специалисты, работающие в электроэнергетике, а особенно специалисты в области релейной защиты и автоматики, должны обладать хотя бы базовыми знаниями об электромагнитной совместимости (ЭМС).

Отдельные вопросы воздействия электромагнитных излучений на микропроцессорные реле защиты (МУРЗ) и проблемы ЭМС уже неоднократно поднимались различными авторами на страницах нашего журнала. Автор попытался создать более полную картину проблемы электромагнитных воздействий на МУРЗ, а также приводит в своей статье новые данные, позволяющие специалистам-релейщикам лучше понять механизм таких воздействий и лучше осознать существующие проблемы и опасности. Статья состоит из трех частей. В первой части рассматриваются общие вопросы чувствительности МУРЗ к электромагнитным воздействиям, влияние грозовых разрядов и коммутационных процессов в высоковольтных аппаратах.

Чувствительность МУРЗ к электромагнитным воздействиям

Проблема электромагнитной совместимости электронной аппаратуры (ЭМС) возникла вместе с самой этой аппаратурой, поскольку одни ее узлы функционально построены таким образом, что являются приемниками электромагнитного излучения, тогда как другие — источниками излучения. Проблемы возникали как из-за взаимного влияния одних узлов на другие внутри аппаратуры, так и при воздействии на электронную аппаратуру внешних излучений различного происхождения. Десятилетиями проблемы ЭМС были прерогативой специалистов в области электроники, радиотехники и связи. Неожиданно, в последние 10–15 лет,

эта проблема стала весьма актуальной и в электроэнергетике.

Конечно, довольно значительные электромагнитные поля на объектах электроэнергетики существовали всегда. Однако применявшиеся десятилетиями устройства автоматики, управления и релейной защиты электромеханического типа были мало подвержены этим полям, и никаких особых проблем с ЭМС не возникало. Последние два десятилетия характеризуются интенсивным переходом от электромеханических к микропроцессорным устройствам релейной защиты (МУРЗ) и автоматики в электроэнергетике. Причем этот переход осуществляется не только по мере строительства новых подстанций и электростанций, но и путем замены старых электромеханических реле защиты (ЭМЗ) на подстанциях, построенных еще в те времена, когда никто даже не предполагал использование в них микропроцессорной техники. Суперсовременные МУРЗ оказались весьма чувствительны к электромагнитным помехам, поступающим «из воздуха», по цепям оперативного тока, цепям напряжения и от трансформаторов тока. Отмечались случаи ложного срабатывания МУРЗ даже от мобильного телефона [1].

Другие характерные примеры — случаи ложного срабатывания микропроцессорных устройств на действующих объектах «Мосэнерго», Очаковской и Zubовской подстанциях. Алгоритм работы защит нарушался из-за молнии, работающего поблизости экскаватора, электросварки и некоторых других помех. Во время ввода в действие Липецкой подстанции, руководство которой

потратило около полутора миллионов долларов на приобретение МУРЗ, проблемы с микропроцессорными устройствами полгода не позволяли запустить этот энергообъект. В итоге подстанцию запускали, используя комплект традиционных защит [2]. На практике приходилось сталкиваться со случаями, когда, например, короткие замыкания по стороне 110 кВ вызвали ложную работу защит по стороне 330 кВ, а помехи при коммутациях по одному классу напряжений проникали (через общие цепи оперативного тока) на входы аппаратуры РЗА, работающей по другому классу напряжения [3].

Неправильная работа релейной защиты по причине недостаточной ЭМС, по данным «Мосэнерго», составляет до 10% от всех случаев ложной работы и касается в основном только реле на микроэлектронной и микропроцессорной элементной базе [4]. Столь высокий процент случаев неправильной работы по причине недостаточной ЭМС вызван тем, что чувствительность к электромагнитным помехам МУРЗ на несколько порядков выше, чем у традиционных электромеханических защит. Например, по данным [4], если для нарушения работы электромеханического реле требуется энергия 10^{-3} Дж, то для нарушения работы интегральных микросхем — всего 10^{-7} Дж. Разница составляет 4 порядка.

Степень повреждения зависит от устойчивости как каждого из компонентов схемы, так и от энергии мощной помехи в целом, которая может быть поглощена схемой без появления дефекта или отказа. Например, для электромагнитного реле с катушкой на напряжение 230 В переменного тока комму-

тационная помеха от индуктивной нагрузки с амплитудой 500 В хотя и является более чем двукратным перенапряжением, но вряд ли приведет к отказу реле в силу стойкости электромеханики к такого рода помехам и вследствие малой длительности такой помехи (в течение микросекунд). Иначе обстоит дело с микросхемой, питающейся от источника 5 В постоянного тока. Импульсная помеха с амплитудой 500 В в 100 раз превышает напряжение питания этого электронного компонента и приводит к неизбежному отказу и последующему разрушению устройства. Стойкость микросхем к перенапряжениям на несколько порядков ниже, чем стойкость электромагнитного реле [5].

Импульсные перенапряжения, возникающие при разрядах молний и при коммутации в силовых электроустановках, способны повреждать и разрушать как электронные устройства, так и целые системы. Многолетняя статистика подтверждает, что число таких повреждений удваивается каждые три-четыре года [5]. Эта статистика хорошо согласовывается с законом Мура [6], еще в 1965 году показавшем, что количество полупроводниковых компонентов в микрочипах удваивается примерно каждые два года. И такая тенденция сохраняется уже много лет. Если каких-то десять лет тому назад микросхемы так называемой транзисторно-транзисторной логики (TTL) содержали 10–20 элементов на квадратный миллиметр и имели типичное напряжение питания 5 В, то сегодня популярные микросхемы могут содержать почти сто CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) транзисторов на каждом квадратном миллиметре поверхности и имеют напряжение питания только 1,2 В. Новейшие технологии твердого тела, например, SOS (Silicon-On-Sapphire), поднимают плотность элементов до 500 на одном квадратном миллиметре поверхности [7]. Ясно, что для таких микросхем потребуется еще более низкое напряжение питания. При этом совершенно очевидно, что с повышением степени интеграции в микроэлектронике уменьшается устойчивость ее компонентов к высоковольтным импульсным перенапряжениям по причине уменьшения толщины изоляционных слоев и уменьшения рабочих напряжений полупроводниковых элементов.

Поскольку помехи, имеющие меньшую энергию, возникают чаще помех, имеющих большую энергию, наиболее частой реакцией МУРЗ на воздействие электромагнитных помех будет не разрушение устройства, а нарушение его работы или кратковременный сбой в работе с последующим восстановлением нарушенной функции (рис. 1).

Это означает, что сработавшее неправильно на подстанции МУРЗ покажет полностью исправную работу при его исследовании в лаборатории, и установить причину его ложного срабатывания на подстанции будет невозможно. Статистика, собранная предста-

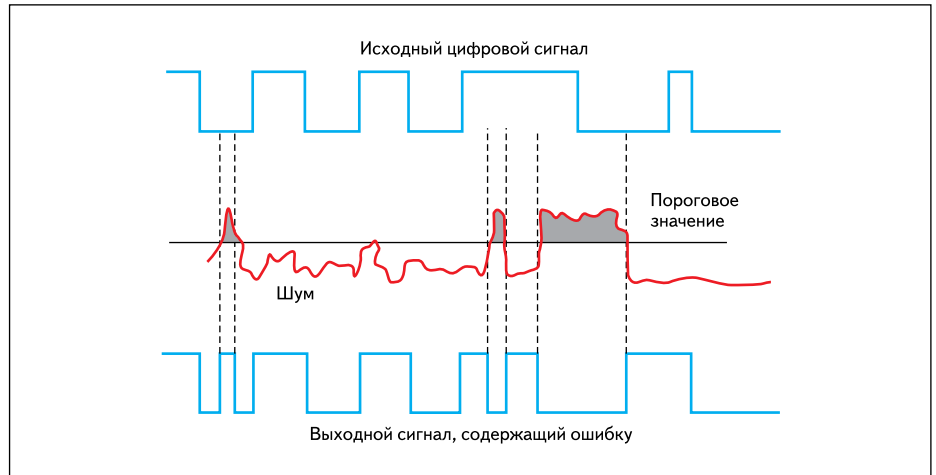


Рис. 1. Воздействие помехи малой энергии на работу цифрового устройства

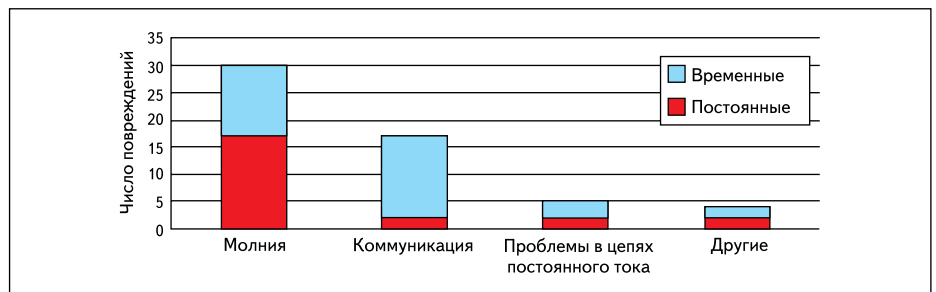


Рис. 2. Данные японских компаний-изготовителей по повреждаемости МУРЗ от электромагнитных воздействий

вителями крупнейших японских компаний-производителей, подтверждает эту особенность МУРЗ (рис. 2) [8].

На представленной диаграмме видно, что кратковременные неповторяющиеся нарушения функционирования (сбой в работе) МУРЗ являются преобладающими в большинстве случаев. Этот вывод подтверждается и данными, полученными другой группой исследователей [9]. Согласно их данным, нарушения функционирования такого рода составляют почти 70% от общего числа повреждений МУРЗ, причем до 80% этих сбоев происходит в интегральных микросхемах.

По свидетельству [4] и в практике ОАО «Мосэнерго» накопилось уже достаточно фактов негативного влияния электромагнитных помех на работу МУРЗ. Наиболее наглядно это показывает опыт включения МП защит фирмы Siemens на ТЭЦ-12 ОАО «Мосэнерго» по проекту, выполненному институтом «Атомэнергопроект». При проектировании никак не были учтены требования ЭМС. Вследствие помех только за период с августа по декабрь 1999 года было зарегистрировано более 400 ложных информационных сигналов по дискретным и аналоговым входам МУРЗ [4]. При этом следует иметь в виду, что цена каждого отказа МУРЗ раз в 10 выше, чем цена отказа одного электромеханического реле, вследствие концентрации большого количества функций в каждом МУРЗ.

Грозовые разряды

Грозовые разряды являются самым мощным источником импульсных воздействий на аппаратуру электростанций и подстанций. Каждую секунду около 50 молний ударяются в поверхность земли, и в среднем каждый ее квадратный километр молния поражает шесть раз за год. Напряжение молнии может составлять до ста миллионов вольт. В нормах строительства громоотводов принимают обычно ток молнии до 200 тысяч ампер при длительности порядка 1 мс, хотя практически ток молнии редко превышает 20–30 кА. Температура канала при главном разряде может превышать 25 000 °С. Длина канала молнии может быть от 1 до 10 км, диаметр — несколько сантиметров. При ударе молнии в молниезвод электрический ток (в виде импульса колоколообразной формы, рис. 3) поступает в землю и растекается в грунте во все стороны до нескольких десятков и даже сотен метров, причем из-за сопротивления грунта этот ток создает на нем падение напряжения. Поскольку наибольшее сопротивление оказывают слои почвы, лежащие вблизи места вхождения тока в землю, то именно здесь наблюдается самое высокое напряжение. По мере удаления от этой точки сопротивление прохождению тока уменьшается, при этом снижается и напряжение (рис. 3).

Для снижения потенциала, наводимого при протекании тока молнии в грунте,

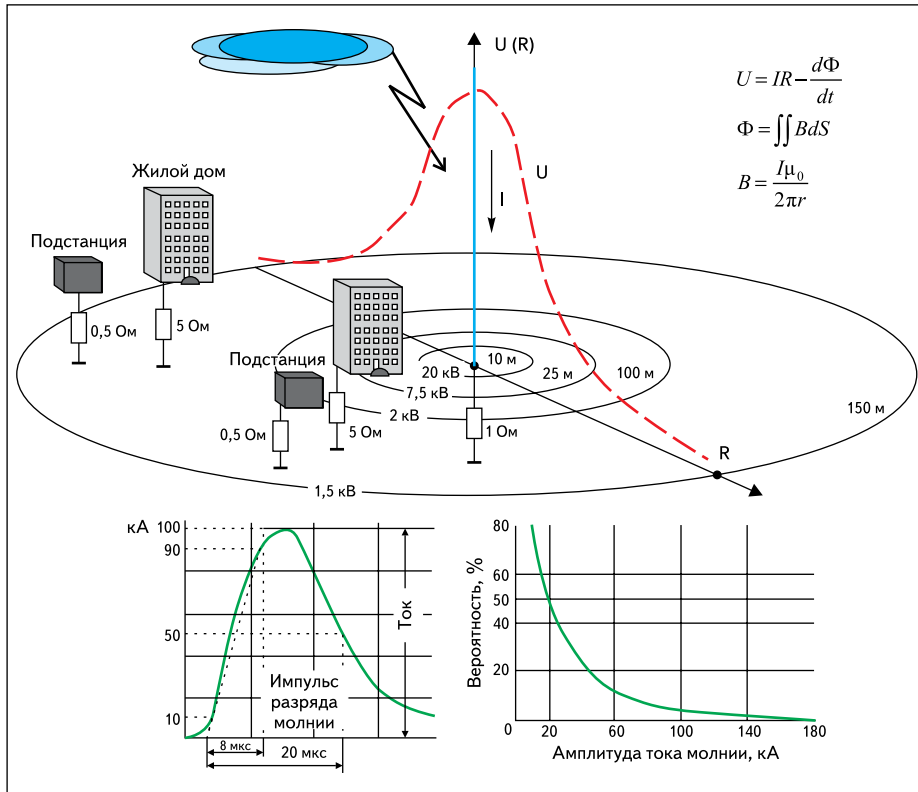


Рис. 3. Процессы, происходящие при попадании молнии в молниеотвод

сопротивление растеканию тока в зоне расположения жилых и промышленных зданий и сооружений уменьшают с помощью металлической сетки достаточно большой площади, размещенной в грунте под фундаментом зданий. Однако сопротивление таких заземляющих систем все еще весьма далеко от нуля (рис. 3), и поэтому даже остаточные импульсные потенциалы, наведенные в заземляющей системе и проникающие по кабелям на входы электронной аппаратуры, представляют для нее серьезную опасность. Помехи такого рода называются кондуктивными. Кроме помех такого вида, импульс сильного тока, проходящий по молниеотводу, создает и помехи в виде электромагнитных полей, воздействующих на все близко расположенные проводники. Такое воздействие называется индуктивным. Существуют еще и емкостные наводки, при которых короткие (то есть высокочастотные) импульсы перенапряжения из высоковольтных линий электропередач попадают в низковольтные цепи через емкостные связи между обмотками трансформаторов.

В процессе распространения помехи имеет место многократное превращение одного его вида в другой, поэтому такое деление весьма условно, особенно когда речь идет о высокочастотных процессах. (Импульс разрядного тока молнии с достаточно крутыми фронтами — 8 и 20 мкс (рис. 3) — можно рассматривать именно как такой высокочастотный процесс.) Поэтому строгий анализ растекания тока в земле через заземляющие устройства требу-

ет учета обеих этих составляющих. Более того, попав в электронную аппаратуру посредством электромагнитного поля или по проводам, помеха претерпевает многочисленные превращения уже внутри этой аппаратуры из-за наличия паразитных емкостных и индуктивных связей между отдельными элементами или между различными узлами аппаратуры. При этом высокочастотная составляющая помехи может проникать вглубь аппаратуры, в обход установленных фильтров и защитных элементов.

Еще один путь для проникновения помехи от разряда молнии — протекание токов по заземленному металлическому корпусу МУРЗ и заземленным экранам многочисленных кабелей, подключенных к нему. Все это говорит о том, что обеспечить должный уровень защиты от электромагнитных помех электронной аппаратуры очень и очень непросто. Особенно сложно это сделать на старых подстанциях, системы заземления которых проектировались для работы с электромеханической защитой, значительно более устойчивой к электромагнитным воздействиям, чем микропроцессорная. А если учесть, что опасные подъемы потенциала в цепях заземления возникают не только при ударах молнии, но и при аварийных коротких замыканиях в электрических сетях, то проблема станет еще более сложной. В некоторых случаях для предотвращения такого подъема потенциала в цепях электронной аппаратуры контуры заземления силового оборудования и электронной аппаратуры

делают отдельными. Однако на реально существующих подстанциях выполнить такое разделение нереально.

По нашему мнению, только комплексное решение проблемы позволит избежать влияния мощных электромагнитных помех на МУРЗ. Это решение должно включать в себя:

- использование МУРЗ только на подстанциях, спроектированных и построенных с учетом самых современных требований к электромагнитной совместимости и рассчитанных на эксплуатацию высокочувствительной электронной аппаратуры;
- совершенствование конструкции самих МУРЗ;
- размещение МУРЗ в металлических шкафах, специально предназначенных для защиты электронного оборудования и снабженных фильтрами на всех кабелях, входящих в шкаф.

Коммутационные процессы и электромагнитные поля от работающего оборудования

Коммутационные процессы и электромагнитные поля от работающего электрооборудования — это второй по степени влияния источник импульсных помех, воздействующий на МУРЗ в обычных условиях эксплуатации. Источниками коммутационных помех в электроэнергетике являются, как правило, высоковольтные выключатели и разъединители, низковольтные реле и контакторы, управляемые батареи конденсаторов. Мощные преобразователи частоты электроприводов, коронный разряд, электроискровые технологии считаются источниками электромагнитных излучений, опасных для электронной аппаратуры. При этом пути проникновения помех в МУРЗ могут быть разными: от прямых индуктированных наводок на низковольтные провода и кабели вторичных цепей подстанций (рис. 4) [10] до импульсных и высокочастотных перенапряжений, возникающих во вторичных обмотках трансформаторов тока и напряжения (рис. 5–7).

Чем меньше время горения дуги при размыкании высоковольтной цепи коммутационным аппаратом, тем большую амплитуду имеют наведенные перенапряжения во вторичных цепях. Поэтому самые большие перенапряжения дают вакуумные выключатели, за ними следуют элегазовые и масляные, а замыкают этот ряд воздушные выключатели. Этим обусловлена и разница в количестве повреждений МУРЗ, возникающих при работе выключателей и разъединителей с элегазовой и воздушной изоляцией (рис. 8) [8]. Следует отметить, что высоковольтные помехи могут наводиться в контрольных кабелях также при коммутации низковольтных цепей, особенно тех, что содержат индуктивности. При этом характер коммутационного переходного процесса зависит от большого

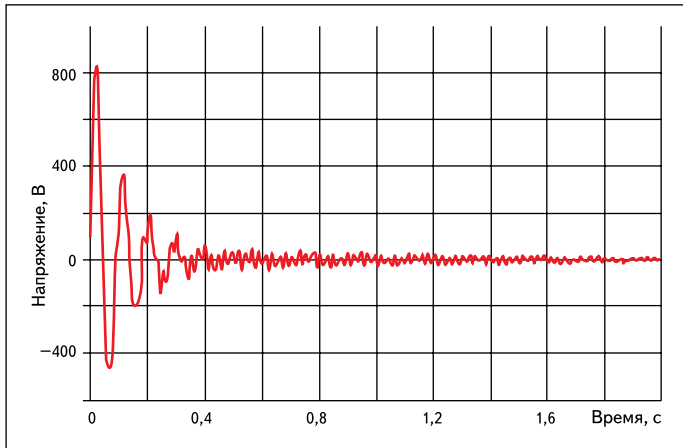


Рис. 4. Напряжение относительно «земли», наведенное в низковольтном контрольном кабеле в результате коммутационного процесса в высоковольтной цепи

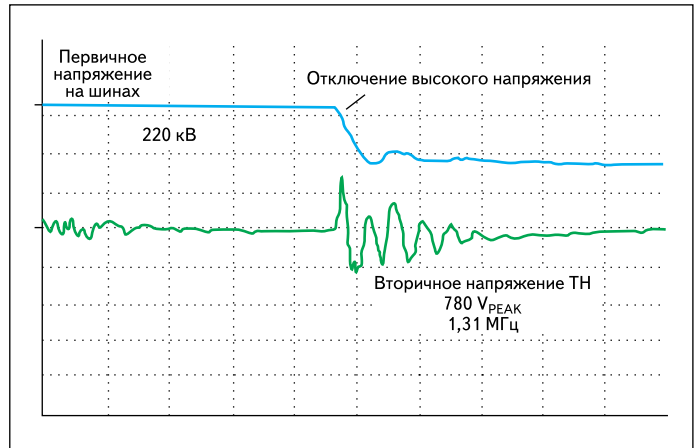


Рис. 6. Импульсные коммутационные перенапряжения во вторичной цепи трансформатора напряжения при работе воздушного разъединителя 220 кВ [12]

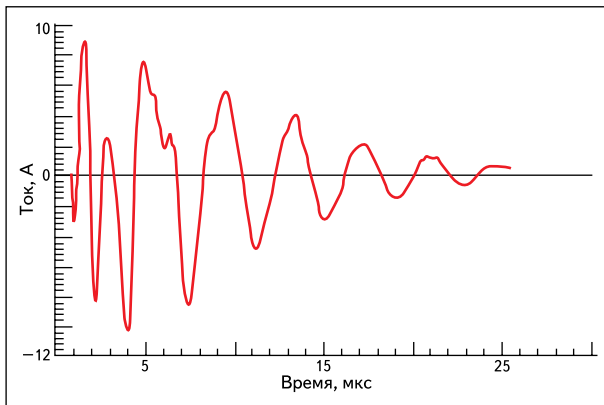


Рис. 5. Ток, наведенный во вторичной обмотке трансформатора тока при коммутации воздушного выключателя напряжением 500 кВ [11]

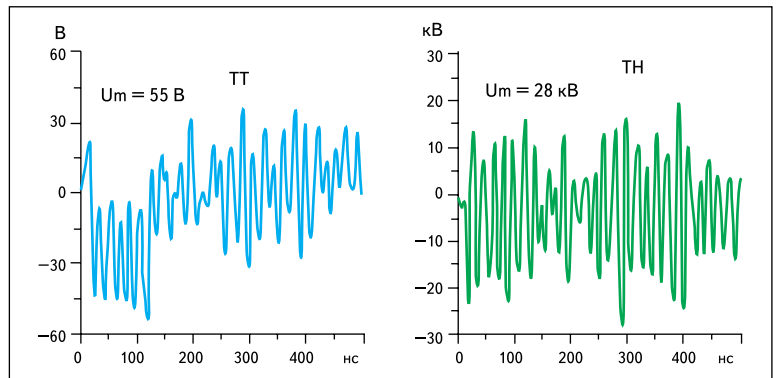


Рис. 7. Высокочастотные помехи на куске провода длиной 1 м, подключенного к вторичным цепям трансформаторов тока и напряжения, при коммутационных процессах в элегазе при напряжении 245 кВ [13]

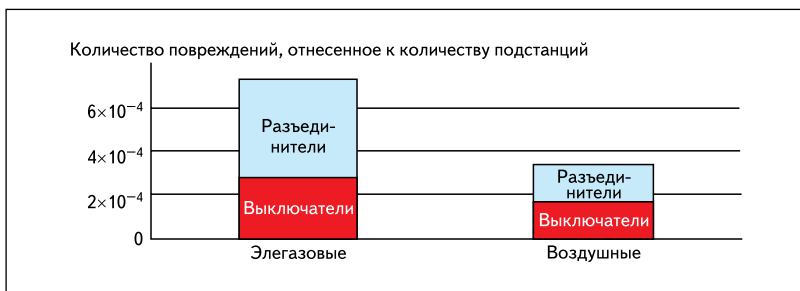


Рис. 8. Относительное количество повреждений МУРЗ от перенапряжений, возникающих при работе выключателей и разъединителей с элегазовой и воздушной изоляцией

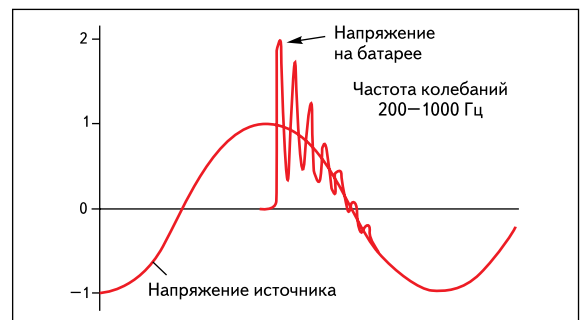


Рис. 9. Перенапряжения при коммутации конденсаторных батарей

количества факторов, и поэтому наведенные напряжения могут сильно отличаться даже на одной и той же подстанции. Теоретические расчеты таких перенапряжений связаны с большими трудностями, поэтому наиболее простой способ — непосредственные замеры.

Значительные перенапряжения, трансформируемые во вторичные цепи, возникают также при коммутации батарей конденсаторов (рис. 9).

Эффективной мерой борьбы с наведенными перенапряжениями на входах электронной аппаратуры и на ее зажимах питания является широкое использование элементов

с нелинейной характеристикой: газовых разрядников, варисторов, специальных полупроводниковых элементов на основе стабилитронов и других устройств, включаемых параллельно защищаемому объекту (например, параллельно входу МУРЗ) и между каждой клеммой этого объекта и «землей». Наилучшими характеристиками обладают на данный момент резисторы с нелинейной характеристикой, выполненные из прессованного порошка оксида цинка ZnO (реже — из карбида кремния, титаната бария и других материалов), — варисторы, которые и получили наибольшее распространение.

Выпускаются они сегодня в огромных количествах: без корпусов, в корпусах различных типов, часто снабжаются всякими вспомогательными элементами (предохранителями, сигнальными флажками и т. п.). Варисторы должны быть правильно выбраны. К сожалению, часто приходится наблюдать ситуацию, при которой варисторы даже в аппаратуре ведущих мировых производителей выбраны неверно и, фактически, никакими защитными функциями не обладают. Поскольку вольт-амперная характеристика (ВАХ) варистора далеко не идеальна (рис. 10), правильно выбрать его не так-то просто.

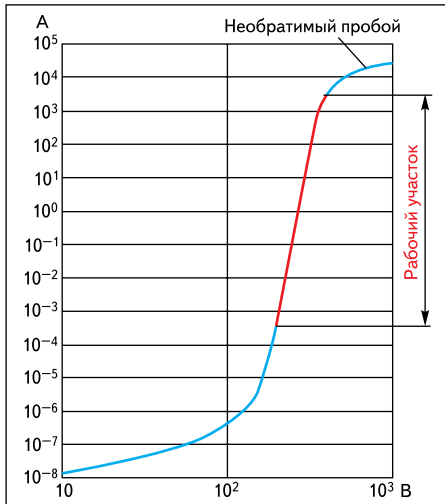


Рис. 10. Типовая ВАХ оксидноцинкового варистора

С одной стороны, варистор не должен пропускать через себя ток более 1 мА (стандартное значение для современных варисторов западного производства) при максимальном рабочем напряжении (иначе он просто перегреется и сгорит), с другой — его напряжение срабатывания (clamping voltage) должно быть заметно меньше напряжения, выдерживаемого электронными компонентами защищаемого оборудования (в противном случае не варистор будет защищать электронные компоненты, а эти компоненты будут «защищать» варистор). Из-за несовершенства ВАХ варисторов для выполнения этих условий максимальное выдерживаемое напряжение электронных компонентов, предназначенных для работы в сети 220 В, должно быть не ме-

нее 1000 В. Однако, во-первых, электронные компоненты на такое напряжение значительно дороже, чем низковольтные, а во-вторых, их другие характеристики хуже. Например, транзисторы на напряжение 1000–1200 В имеют значительно меньший коэффициент усиления и значительно большее падение напряжения в открытом состоянии, чем такие же транзисторы на напряжение 400–500 В. Поэтому довольно часто приходится встречать, например, в источниках питания МУРЗ, регистраторов аварийных режимов и в другой электронной аппаратуре ведущих мировых производителей транзисторы с максимальным выдерживаемым напряжением 500 В, работающие непосредственно в цепи 220–250 В. Обеспечить защиту электронных компонентов варисторами при таком соотношении рабочего и максимально выдерживаемого напряжения просто невозможно. ■

Литература

1. Шалин А. И. Об эффективности новых устройств РЗА // Энергетика и промышленность России. 2006. № 1 (65).
2. Прохорова А. Интеллект — наше главное конкурентное преимущество (интервью с генеральным директором ОАО ЧЭАЗ М. А. Шурдовым) // Оборудование, рынок, предложения, цены. 2003. № 4.
3. Кузнецов М., Кунгуров Д., Матвеев М., Тарасов В. Входные цепи устройств РЗА. Проблемы защиты от мощных импульсных перенапряжений // Новости электротехники. 2006. № 6 (42).
4. Борисов Р. Невнимание к проблеме ЭМС может обернуться катастрофой // Новости электротехники. 2001. № 6 (12).

5. Иванов П. Trabtech — технология для защиты электрооборудования от импульсных перенапряжений // Компоненты и технологии. 2003. № 6.
6. Moore G. E. Cramming more components onto integrated circuits // Electronics. Vol. 38. No. 8. 1965.
7. Nailen R. L. How to Combat Power Line Pollution // Electrical Apparatus. December 1984.
8. Matsumoto T., Kurosawa Y., Usui M., Yamashita K., Tanaka T. Experience of Numerical Protective Relays Operating in an Environment with High-Frequency Switching Surge in Japan // IEEE Transactions On Power Delivery. Vol. 21. No. 1. 2006.
9. Matsuda T., Kobayashi J., Itoh H., Tanigushi T., Seo K., Hatata M., Andow F. Experience with Maintenance and Improvement in Reliability of Microprocessor-Based Digital Protection Equipment for Power Transmission Systems // SIGRE Session, Paris. 30 August – 5 September 1992.
10. Sowa A. W., Wiater J. Overvoltages in Protective and Control Circuits due to Switching Transient in High Voltage Substation // Electrical Department. Bialystok Technical University, Poland. 2007.
11. Wiggins C. M., Thomas D. E., Nickel F. S., Wright S. E., Salas T. M. Transient Electromagnetic Interference in Substations // IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 9. No. 4. 1994.
12. Carsimanovic S., Bajramovic Z., Ljevak M., Veledar M., Halilhodzik N. Current Switching with High Voltage Air Disconnectors // International Conference on Power Systems Transients (IPST'05). Montreal, Canada. 19–23 June, 2005.
13. Mohana Rao M., Joy Thomas M., Singh B. P. Transients Induced on Control Cables and Secondary Circuit of Instrument Transformers in a GIS During Switching Operations // IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 22. No. 3. July, 2007.