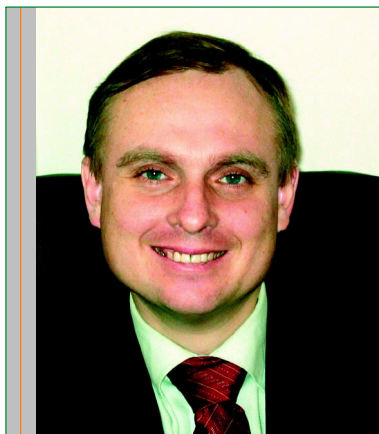


• **Каким должно быть заземление современной цифровой аппаратуры,** чувствительной к условиям электромагнитной обстановки (ЭМО) на объектах и достаточно ли выполнения тех требований, которые традиционно предъявляются к заземляющим устройствам, исходя из соображений безопасности персонала? Автор статьи предлагает разобраться в этих вопросах.



ЭМС ЦИФРОВОЙ АППАРАТУРЫ ДИКТУЕТ НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЗЕМЛЯЮЩИМ УСТРОЙСТВАМ

Михаил Матвеев,
к.ф.-м.н., ООО ЭЗОП –
«Электроэнергетика, Защита От Помех», г. Москва

Заземление – «больной» вопрос для разработчиков, проектировщиков, специалистов служб РЗА, АСУ ТП, связи, – практически для всех, кто связан с эксплуатацией современной электронной (цифровой) аппаратуры. По опыту, практически любые сбои или повреждения этой аппаратуры, причину которых не удастся выявить рутинными процедурами контроля и диагностики, рано или поздно начинают объяснять плохим заземлением (что, кстати, не всегда справедливо). Проводят стандартные замеры сопротивления заземляющего устройства, получают (особенно в городских условиях) укладываемую во все нормы величину и... загадка остается неразгаданной.

ОСОБЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЗЕМЛЕНИЮ ОБЪЕКТОВ С ЦИФРОВОЙ АППАРАТУРОЙ

Для чего и каким образом заземлять современную аппаратуру? Этот вопрос тесно связан с общей проблемой электромагнитной совместимости (ЭМС) аппаратуры и построенных на ее базе систем с электромагнитной обстановкой (ЭМО) на объектах. Насколько отличаются требования, предъявляемые к заземляющим устройствам по условиям ЭМС и условиям электробезопасности персонала? Так, существенные разности потенциалов между различными точками (например, корпусами соседних компьютеров) в случае одновременного прикосновения опасны для персонала. Та же разность потенциалов опасна и для аппаратуры, поскольку приложена к входам цепей, соединяющих эти компьютеры.

Обеспечение ЭМС аппаратуры имеет, однако, свою специфику. Так, проводные коммуникации аппаратуры могут связывать точки на расстоянии десятков и сотен метров, а для аппаратуры проводной связи – многих километров. Соответственно, требования к снижению перепадов потенциалов будут жестче и глобальней, поскольку роль играет перепад потенциала на территории всего объекта и даже между заземлениями соседних объектов.

При обследовании на одной из подстанций 500 кВ заземляющего устройства, спроектированного по условиям напряжения прикосновения, от измерительного прибора создавались две токовые петли, имитирующие протекание составляющих тока однофазного КЗ на землю (соответствующих подпитке места КЗ от собственных трансформаторов объекта и подпитке из энергосистемы). Измеренные потенциалы пересчитывались пропорционально реальным токам КЗ. Результат обескуражил: перепад потенциалов между различными

точками заземляющего устройства достигнет 5 кВ. Этот потенциал будет приложен к изоляции вторичных цепей и входам аппаратуры, что скорее всего, вызовет повреждение кабелей и аппаратуры.

Аналогичная ситуация возникает, когда территории предприятия и высоковольтной подстанции связаны оболочками кабелей и заземлителями. Типичный пример – компрессорная станция магистрального газопровода: в случае однофазного КЗ на территории питающей подстанции происходит вынос потенциала на заземления зданий и сооружений на территории КС. В результате, между заземлениями различных зданий и сооружений возникают разности потенциалов до нескольких кВ, прикладываемые в итоге к информационным цепям, объединяющим здания и сооружения объекта в единую сеть. Отметим, что, как правило, единой заземляющей сетки на территории подобных объектов нет.

ЗАЗЕМЛЕНИЕ И ПРОБЛЕМА ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ

Особенность современной аппаратуры – высокая чувствительность к импульсным помехам. Всем знакомо явление электростатического разряда. Но если для человека его воздействие сводится к неприятному кратковременному ощущению, воздействие электростатических потенциалов на аппаратуру часто приводит к сбоям в ее работе и даже физическому повреждению. Еще большую опасность для аппаратуры представляют импульсные помехи при молниевых разрядах, коммутациях высоковольтного и низковольтного оборудования и т.п. Возникает вопрос, в какой степени уровень импульсных помех зависит от состояния заземляющего устройства? Чтобы разобраться в этом, необходимо уяснить, что сопротивление заземляющего устройства *сильно зависит от частоты*.

На одном из объектов в г. Москве среди требований при выборе системы заземления аппаратуры связи было обеспечение высокой эффективности заземляющего устройства в широком диапазоне частот. Произвели замеры сопротивления растеканию по классической схеме «амперметр-вольтметр», но на разных частотах. Проверялось несколько металлоконструкций:

1. шина заземления в помещении (за стенкой помещения),
2. N-проводник («ноль») сети питания 0,4 кВ,
3. металлоконструкции, связанные с трубопроводом водоснабжения,
4. бывшее основание насоса (заглубленная в грунт металлоконструкция),
5. арматура здания.

Результаты приведены в виде диаграммы на рис. 1.

Видно, что сопротивление всех обследованных металлоконструкций (кроме основания насоса) на частоте 640 Гц (нижний диапазон) составляет менее 1 Ом и примерно одинаково. Это объясняется тем, что все они, в конечном итоге, связаны с единым «заземляющим устройством» города, образованным трубопроводами, оболочками кабелей, строительными металлоконструкциями и т.п. Единственное исключение – массивное металлическое основание насоса. Его сопротивление существенно больше – порядка 2 Ом и обеспечивается значительной площадью контакта с физической «землей».

С ростом частоты картина радикально меняется. Сопротивление N-проводника питания, например, резко увеличивается и составляет уже около 10 Ом на частоте порядка 50 кГц. Сопротивление остальных металлоконструкций (например, арматуры здания) растет медленнее и не превышает в итоге 5 Ом. Можно сделать вывод об отсутствии эффективной связи N-проводника с заземлением здания (т.н., «повторного заземления»). Участок N-проводника от питающей ТП до здания имеет длину порядка сотен метров, чем и объясняется быстрый рост сопротивления с ростом частоты. Остальные металлоконструкции связаны с физической «землей» в пределах здания, поэтому у них скорость нарастания сопротивления существенно меньше.

Наилучший результат показывает массивное металлическое основание насоса, представляющее собой фактически локальный заземлитель с чрезвычайно низким удельным сопротивлением. И это несмотря на то, что сопротивление этой конструкции на низких частотах было максимальным!

Зависимость сопротивления заземляющего устройства от частоты следует учитывать при стандартных замерах параметров заземляющих устройств. Дело в том, что большинство современных измерительных приборов используют частоты, отличные от 50 Гц, что позволяет «отстроиться» от помех на промышленной частоте и гармониках. Так, многие зарубежные приборы работают на частоте 128 Гц. Многочисленные измерения, производившиеся фирмой «ЭЗОП» и лично автором, показывают, что в некоторых случаях даже на этой частоте сопротивление увеличивается на 15–20% по сравнению с 50 Гц. Использование более высоких частот (порядка 200 Гц и выше) может приводить к ошибкам, превышающим 50%, что явно неприемлемо.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ СВЯЗАНЫ С УРОВНЕМ ПОМЕХ

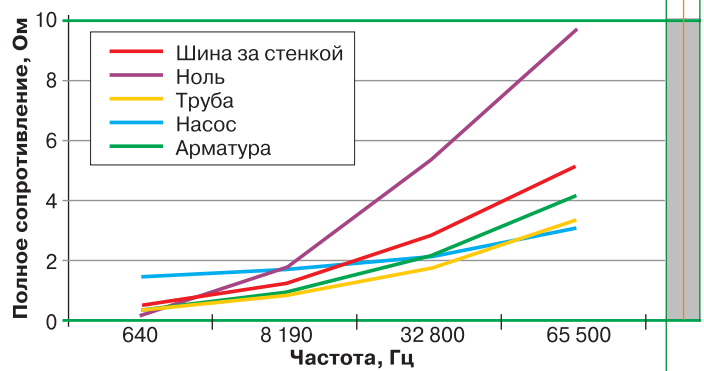
Одним из наиболее опасных источников мощных электромагнитных помех является импульсный ток молниевых разрядов [1]. При растекании тока молнии по заземляющему устройству происходит импульсный подъем потенциала этого устройства. Поскольку протекание тока молнии процесс сравнительно высокочастотный, все сказанное выше о частотных параметрах заземляющего устройства полностью относится и к процессу растекания тока молнии. За счет рассмотренного эффекта реальные величины потенциалов на двух заземляющих устройствах с одинаковым сопротивлением могут отличаться в несколько раз! Это говорит о необходимости обеспечивать приемлемые характеристики заземляющих устройств на высоких частотах.

Улучшение характеристик заземляющего устройства на высокой частоте имеет некоторые особенности. В частности, увеличивается важность вертикальных (глубинных) заземлителей. Этим объясняется рекомендация ПУЭ по установке вертикальных заземлителей вблизи объектов молниезащиты на ОРУ подстанции высокого напряжения. Несмотря на то, что на низкой частоте сопротивление вертикального заземлителя длиной 3–5 метров много больше, чем общего заземляющего контура ОРУ подстанции (типа «сетки»), при молниевом разряде роль локального заземлителя резко возрастает.

В качестве примера рассмотрим проектную схему заземляющего устройства подстанции (рис.2). На рисунке показаны графики изменения потенциала в зависимости от времени при молниевом разряде (ток 100 кА). Место разряда указано на схеме (соответствует месту установки одного из молниеприемников на объекте). В точке А (см. схему) рядом с заземлением молниеприемника возникает потенциал до 280 кВ по амплитуде. То есть импульсное сопротивление заземляющего устройства достигает 2,8 Ом, несмотря на то, что расчетное сопротивление заземляющей сетки на промышлен-

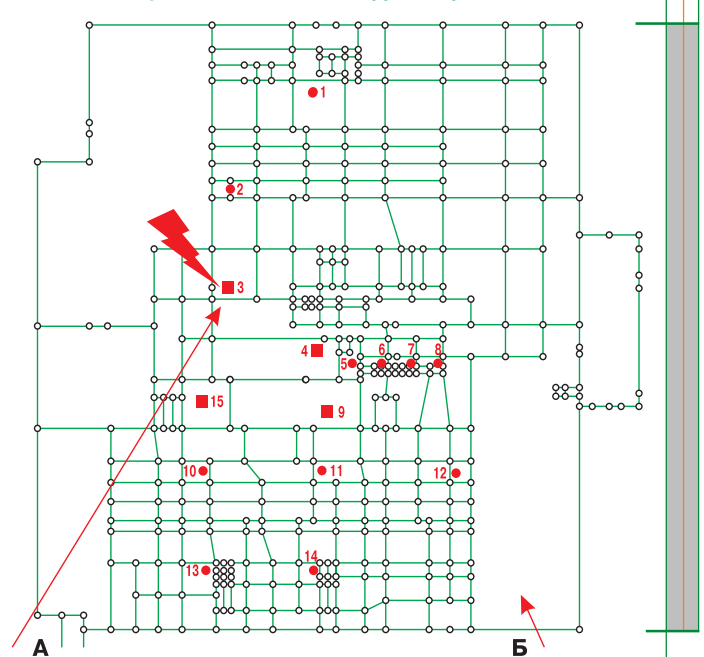
СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗУ НА ВЧ

РИС. 1



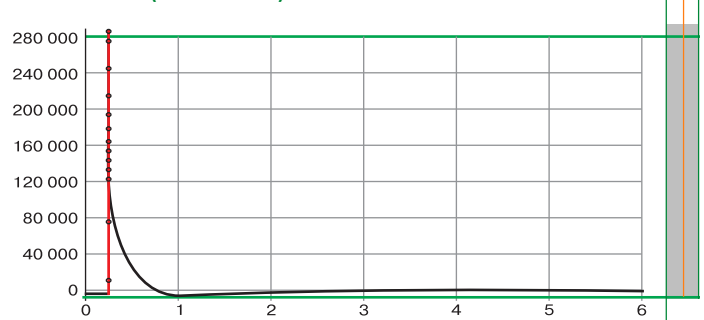
ПРОЕКТНАЯ СХЕМА ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПОДСТАНЦИИ

РИС. 2



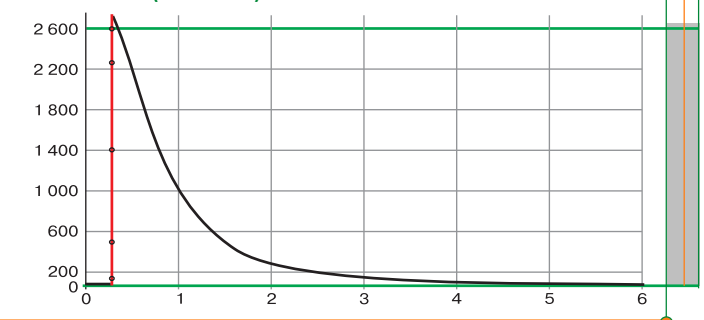
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПО ВРЕМЕНИ (УЗЕЛ №302)

РИС.3А



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПО ВРЕМЕНИ (УЗЕЛ №8)

РИС.3Б



ной частоте – менее 0,5 Ом. Интересно, что в удаленной от места молниевых разрядов зоне (точка Б) потенциал будет менее 3 кВ, т.е. заземляющая сетка подстанции не обеспечивает, вообще говоря, выравнивание потенциала по территории объекта. (Расчеты проводились с помощью программного обеспечения «Контур»).

В этих условиях установка нескольких вертикальных или глубинных заземлителей вблизи от заземления молниеприемника обеспечит значительное снижение импульсных потенциалов на территории объекта. Допустим общее сопротивление установленных вертикальных заземлителей – 2 Ом, что достижимо, скажем, при использовании современных технологий установок составных глубинных заземлителей (Galmar и аналогичные). В таком случае общий уровень молниевых потенциалов на объекте снизится приблизительно в 2 раза, поскольку индуктивное сопротивление установленных глубинных заземлителей минимально, а «включаются» они, фактически параллельно импульсному сопротивлению заземляющей сетки в целом.

Что же касается выравнивания потенциалов, то чем выше частота, тем чаще должна быть предназначенная для выравнивания потенциалов сетка [2].

Следует отметить, что не всегда уровень импульсных помех напрямую связан с характеристиками заземляющего устройства. Приходилось сталкиваться со случаями массового повреждения электронных блоков АСУ ТП помехами, генерируемыми при работе контакторов. Происходило это, несмотря на хорошее состояние заземляющего устройства, выполненного по зарубежному проекту с применением медных заземляющих проводников и заземлителей. Согласно классической теории [2, 3] проникновение помех через общие цепи заземления является лишь одним из возможных сценариев влияния на чувствительную аппаратуру.

ТОКИ В ЗАЗЕМЛЯЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ – ИСТОЧНИК ОПАСНЫХ ПОЛЕЙ И ПОМЕХ

Отмечу еще один момент, связанный с влиянием токов, протекающих по элементам системы заземления. Например, при протекании по заземляющему проводнику тока молнии, происходит генерация импульсного электромагнитного поля. Как показывает опыт обследования ряда объектов (в том числе, с применением методов имитационного моделирования), напряженность импульсного магнитного поля может превышать 1 кА/м внутри помещения даже на существенном удалении от проводника, по которому протекает ток молнии. Такой уровень поля опасен как для аппаратуры, так и для цепей обмена информацией, в которых могут создаваться наводки, превышающие уровни устойчивости аппаратуры, непосредственно подключаемой к данным цепям. Ситуация часто осложняется тем, что пути протекания тока молнии с основания молниеприемников неизвестны. Так, в здании протекание токов может происходить по специально выделенным заземляющим проводникам, несущим металлоконструкциям, оболочкам кабелей с антенно-мачтовых устройств и даже РЕ- и N- проводникам системы питания потребителей.

На распределенных объектах (подстанциях, промпредприятиях, газо- и нефтеперекачивающих станциях) большую опасность представляет растекание тока молнии по кабельным каналам и лоткам. Нередко это вызвано непродуманными проектными решениями (в частности, типичным является стекание токов молнии в кабельные каналы через цепи питания прожекторов на мачтах освещения).

Аналогичная ситуация может возникать не только при молниевом разряде. На многих высоковольтных подстанциях конструкция заземляющего устройства такова, что протекание значительной части тока КЗ в сети 110 кВ и выше (с заземленной нейтралью) происходит через здание ОПУ. Это может приводить к нежелательному влиянию поля на размещенную там аппаратуру.

Самостоятельной и сложной проблемой является постоянное протекание токов по заземляющему устройству (т.н. «токи утечки» [4]). Обычно это связано с ошибками в организации систем заземления и питания (0,4 кВ). Среди порожденных токами утечки нежелательных последствий – повышенный уровень магнитных полей, влияющих на мониторы компьютеров на базе ЭЛТ, «зашумление» цепей связи, электрокоррозия и т.п.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЦИФРОВОЙ АППАРАТУРЫ

В международной практике существует достаточно большой объем технической литературы, посвященной вопросам питания и заземления цифровой аппаратуры (достаточно упомянуть, например, [3]). В России в последнее десятилетие также наметился положительный сдвиг в сторону осознания проблемы ЭМС и отражения ее в технической литературе и нормативно-технической документации. Так, например, пионерской работой было появление в 1993 г. «Методических указаний по защите вторичных цепей электрических станций и подстанций от импульсных помех» [5]. В только что вышедшей новой инструкции по молниезащите зданий и сооружений [6], в отличие от предыдущей редакции, уделяется существенное внимание защите цифровой аппаратуры от сбоев и повреждений при молниевом разряде. Многие пункты этого документа отражают требования международных стандартов в области молниезащиты (IEC 61312, 61024). Существуют и другие документы (в частности, системы ГОСТ Р). Их внедрение в практику проектирования позволит снизить количество проблем ЭМС, возникающих в процессе эксплуатации объектов. Следует, правда, отметить, что имеющиеся в литературе данные часто разрозненны и противоречивы.

Большинство находящихся в эксплуатации объектов спроектировано по устаревшим нормам и не соответствует современным требованиям. Поэтому перед реконструкцией ответственных энергетических и промышленных объектов необходимо проводить их обследование (технический аудит). Опыт показывает, что необходимая часть такого обследования – оценка электромагнитной обстановки, включающая проверку соответствия требованиям ЭМС существующих заземляющих устройств [1].

Что касается новых объектов, то здесь, в первую очередь необходимо обеспечить выполнение требований современной нормативной и технической документации. К сожалению, приходится сталкиваться с тем, что при проектировании новых энергообъектов не всегда следуют даже методическим указаниям [5].

В то же время, учет требований ЭМС при проектировании заземляющих устройств и молниезащиты – весьма нетривиальная задача. Например, расчет зон защиты от вторичных воздействий молнии в соответствии с [6] требует знания реальной картины распределения токов и потенциалов по элементам заземляющего устройства объекта при молниевом разряде. В связи с этим было бы целесообразно применять на стадии проектирования расчетные методики для оценки характеристик заземляющего устройства. Использование методов математического моделирования и вычислительных ресурсов современных компьютеров позволяет отказаться от эквипотенциальной модели заземляющего устройства и производить корректные расчеты на частотах от 0 до нескольких МГц.

Оптимизация заземляющего устройства по условиям ЭМС ни в коем случае не должна противоречить условиям обеспечения электробезопасности персонала. Поэтому следует с осторожностью относиться к схемам, подразумевающим организацию «отдельной, чистой земли». Искусство проектирования и состоит в организации «компромиссного» варианта, удовлетворяющего всем важнейшим требованиям. Безопасность персонала и надежность работы критически важной аппаратуры, безусловно, относятся как раз к таким требованиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев М.В. Электромагнитная обстановка на объектах определяет ЭМС цифровой аппаратуры// Новости Электротехники. – 2002. – №1(13), 2(14).
2. Шваб А.И. Электромагнитная совместимость. – М.: Энергоатомиздат, 1995.
3. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment. IEEE Std 1100-1999.
4. Петухов В.С., Соколов В.А., Меркулов А.В., Красилов И.А. Токи утечки в электроустановках зданий// Новости Электротехники. – 2003. – №5 (23). – С. 93-97.
5. Методические указания по защите вторичных цепей электрических станций и подстанций от импульсных помех. РД 34.20.116-93. М. РАО «ЕЭС России», 1993
6. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. М.: МЭИ, 2004