

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСТЕКАНИЯ ТОКА МОЛНИИ ПО ЗУ ПС И ЭС

МАТВЕЕВ М.В., к.ф.-м.н., директор ООО «ЭЗПО»

КУЗНЕЦОВ М.Б., к.ф.-м.н., заместитель технического директора ООО «ЭЗПО»

В статье рассмотрена суть метода имитационного моделирования растекания тока молнии по заземляющим устройствам (ЗУ) ПС или ЭС, его особенности, достоинства и недостатки. Все рассматриваемое здесь может быть отнесено не только к импульсным характеристикам ЗУ при воздействии молниевых импульсов, но и к ВЧ-характеристикам, позволяющим понять поведение ЗУ при стекании ВЧ-составляющих токов КЗ.

В настоящее время параметры заземляющих устройств (ЗУ) электрических станций и подстанций (ЭС и ПС) на низких частотах довольно хорошо могут быть определены как экспериментальным (для существующих объектов), так и расчетным (для проектируемых ЭС и ПС) путем [1, 2, 3]. Но для решений проблем электромагнитной совместимости (ЭМС) вторичного оборудования (в первую очередь микропроцессорной аппаратуры РЗА, АСУ, АИИСКУЭ, связи) этого оказывается недостаточно. Зачастую ЗУ, удовлетворяющее требованиям НТД и ЭМС на промышленной частоте, не может обеспечить приемлемое уравнивание потенциалов на высокой частоте (ВЧ) или при молниевых импульсах. Причина – сильная частотная зависимость полного сопротивления протяженных заземлителей, образующих ЗУ (рис. 1). Поэтому необходимо иметь возможность определять характеристики ЗУ на высокой частоте для того, чтобы понимать, как именно такое ЗУ нужно корректировать или модернизировать по условиям ЭМС. В НТД (СО 34.35.311-2004), регламентирующих методы определения ЭМО на энергообъектах, описан метод имитационного моделирования процесса растекания тока молнии по ЗУ ПС или ЭС. Таким образом, определение импульсных (имеется в виду импульс тока молнии) характеристик ЗУ ПС или ЭС в настоящее время не только желательное, но и необходимое условие проведения экспериментального определения ЭМО на ЭС и ПС.

НТД ОБ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Для начала рассмотрим современную НТД. К настоящему времени только в двух действующих документах (РД 153-34.0-20.525-00 и СО 34.35.311-2004) описываются методы имитационного моделирования растекания тока молнии по ЗУ, и в одном документе указывается необходимость проведения таких измерений (СО 153-34.21.122-2003 [13]). Суть метода сводится к тому, чтобы определить разности потенциалов между различными точками при подаче импульса (аналогичного по форме

импульсу тока молнии) на заземление конструкции с молниеприемником.

В первом из этих документов указанный метод приведен в разделе, относящемся к определению параметров ЗУ опор ВЛ. Тем не менее, схема подключения прибора и выполнения измерения в РД153-34.0-20.525-00 приводится правильная и пригодная для использования не только для опор ВЛ, но и для любых молниеотводов. Однако особенности метода (например, расстояния между обследуемым объектом и выносным токовым зондом, расстояние между токовым и потенциальным зондом, и т.п.) в РД не нормируются. Более того,

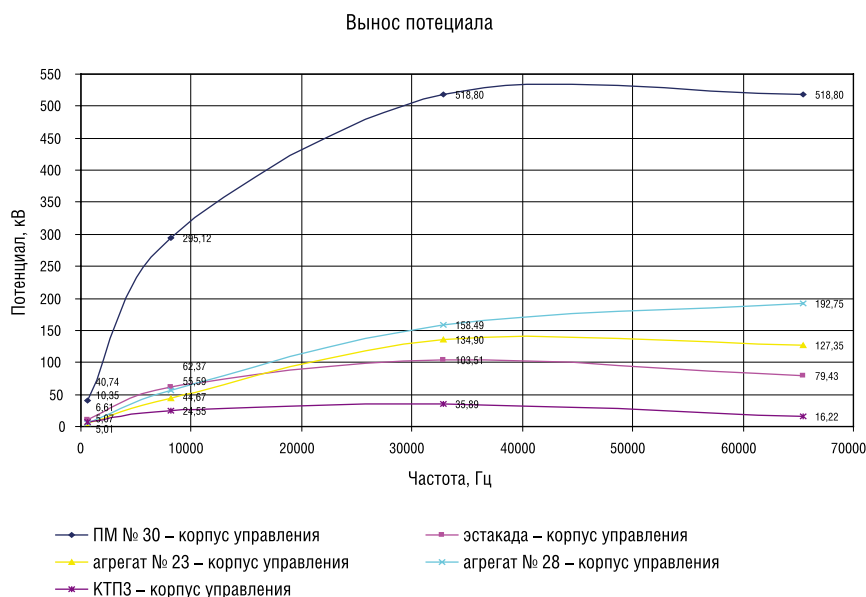


Рис. 1. Типичные кривые частотной зависимости потенциала на ЗУ различных заземлителей на реальном объекте (в пересчете на ток 100 кА)

для имитационных измерений предлагается использовать прибор ИК-1, характеристики которого не вполне соответствуют требованиям для проведения имитационных измерений. Так, длительность фронта импульса этого генератора составляет 8–1,6 мкс, длительность самого импульса – 20–4 мкс [9]. Значит, на выходе генератора будет возникать импульс с формой 8/20 мкс. Такой импульс тока молнии не соответствует общепринятой НТД в области молниезащиты (IEC 62305, СО 153-34.21.122-2003, согласно которым принимается импульс 10/350 мкс или 0.25/100 мкс [10, 13]). Импульс 8/20 является импульсом напряжения, который может возникнуть на заземлении при протекании через него тока с формой импульса 10/350 мкс. Что же касается СО 34.35.311-2004, то здесь нет четкого нормирования параметров испытательного импульса генератора. В документе указано, что измерения необходимо проводить генератором, выдающим импульсы тока, по форме соответствующие стандарту 10/350 мкс (первый импульс молнии) или 0.25/100 мкс (второй и последующие импульсы молнии). Однако требования к генератору (приводимые в СО 34.35.311-2004) все еще довольно расплывчаты: «генератор импульсных токов должен обеспечить при выходном напряжении не менее 200 В импульсы тока, как минимум с двумя значениями времени фронта импульса, отличающимися более чем в 3 раза в диапазоне времени от 0,25 до 10 мкс». Если следовать таким требованиям, можно использовать генератор с временем фронта импульса, например, 0,5 и 2 мкс – что будет абсолютно не соответствовать ни первому, ни последующим импульсам молнии (для форм импульсов, принятых в самом же СО 34.35.311-2004), однако будет удовлетворять требованию, содержащемуся в приведенной цитате. Разумеется, параметры молниевых импульсов в реальности также могут сильно отличаться от «эталонных». Тем не менее, представляется, что проведение диагностических измерений должно давать вполне однозначный ответ на вопрос относительно пригодности/непригодности системы защиты от вторичных проявлений молниевых разрядов на объекте. В данном случае отсутствие четкости определения диа-

гностических процедур может привести к тому, что, например, две различные измерительные лаборатории могут получить кардинально противоположные результаты по одному и тому же объекту – причем обе останутся при этом в рамках требований действующей НТД!

В СО 34.35.311-2004 рекомендуется определять напряжения, наводимые в кабелях вторичной коммутации при ударах молнии в молниеотводы, расположенные вблизи трасс прокладки кабелей или в молниеприемники зданий, а также определять «возможность обратного перекрытия изоляции кабелей вторичных цепей» (путем измерения распределения потенциалов по земле при имитации удара молнии в молниеприемник). Несомненно, и уровень наводок в кабелях, и возможность «обратного перекрытия» необходимо знать при определении ЭМО. Однако на подавляющем большинстве энергообъектов наибольшую опасность для вторичного оборудования (среди всех факторов, вызванных ударом молнии) будут представлять разности потенциалов, возникающие между элементами ЗУ, и вызванные ими помехи, воздействующие на МП аппаратуру по входам цепей, заземленных на ОРУ (например, цепей измерительных трансформаторов). На практике именно этот случай является самым опасным. Более того, рассматривать наводки и разности потенциалов по отдельности представляется необоснованным. При молниевом разряде на входы МП аппаратуры и изоляции кабелей будет воздействовать именно совокупность факторов, обусловленная влиянием «наводок» совместно с разностями потенциалов в пределах ЗУ.

Таким образом, мы видим, что НТД по обсуждаемой тематике в настоящее время нуждаются в основательной доработке и корректировке. В частности, что касается имитационных измерений, указанные НТД могут быть исправлены и дополнены с учетом накопленного к настоящему времени опыта проведения таких работ (см. ниже).

ЧТО И ЗАЧЕМ НЕОБХОДИМО ИЗМЕРЯТЬ

Рассмотрим подробнее влияние тока молнии на МП аппаратуру и ее цепи. При ударе молнии в молниеприемник по элементам ЗУ объекта будут проте-

кать импульсные токи. Между различными точками ЗУ объекта (например, ЭС или ПС) возникнут импульсные разности потенциалов.

Пробой изоляции вторичных цепей могут вызвать перенапряжения, возникающие между:

- основанием конструкции с молниеприемником и проводящими конструкциями кабельных трасс, с последующим обратным перекрытием на жилы кабелей;
- проводящими частями кабельных конструкций (шинами уравнивания потенциалов – ШУП в кабельных лотках/тоннелях) и жилами кабелей;
- проводящими частями клеммных шкафов, куда заходят кабели (как на ОРУ так и в ОПУ) и жилами кабелей, выведенными на клеммники;
- грунтом в местах прокладки кабелей и жилами кабелей (в случае прокладки непосредственно в грунте).

Повреждение МП аппаратуры могут вызвать помехи, приходящие на входы аппаратуры. Уровни этих помех определяются совместно гальваническим, индуктивным и емкостным взаимодействием жил кабеля с источником помехи, наличием тех или иных экранирующих конструкций, а также ослаблением волны перенапряжения при распространении вдоль кабельной трассы.

Повреждение МП аппаратуры может быть также следствием пробоя изоляции вторичных цепей, который сам по себе следует рассматривать как недопустимое событие.

Отдельно следует отметить, что использование экранированных кабелей с заземленными с двух сторон экранами позволяет эффективно уменьшить разность потенциалов, приложенную к изоляции вторичных цепей и входам МП аппаратуры. Коэффициенты ослабления зависят от множества факторов (переходного сопротивления заземления экранов, удельного сопротивления грунта, типа и состояния кабельных конструкций, состояния заземляющего устройства объекта и др.). Реальный коэффициент ослабления может значительно отличаться от теоретического значения. Поэтому определение реального коэффициента ослабления – одна из основных задач имитационного моделирования.

Таким образом, суммируя вышесказанное, можно определить параметры,

измерение которых необходимо при имитации протекания тока молнии по ЗУ ПС или ЭС:

- уровни помех, передаваемые на входы аппаратуры, измеряемые непосредственно в местах установки МП аппаратуры. Указанные помехи будут уже автоматически учитывать все факторы: разности потенциалов точек заземления измерительных трансформаторов и РЩ/ОПУ, емкостные наводки, индуктивные наводки. При наличии экранов, заземленных с двух сторон, будет автоматически учитываться ослабление помех. Измерения, проводимые с помощью имитационных (проложенных по тем же трассам, что и контрольные цепи) и резервных кабелей (с незаземленными экраном), позволят определить коэффициенты ослабления помех как экранами, так и кабельными конструкциями. Это важно, поскольку использование, например, заглубленных кабельных тоннелей или металлических коробов (и других экранирующих конструкций) позволяет, наряду с использованием экранов, заземленных с двух сторон, снизить уровень перенапряжений, приложенных к входам аппаратуры и изоляции кабелей;

- перенапряжения, приложенные к изоляции кабелей (или к изоляции в клеммниках и прочих электроустановочных изделиях) – в местах сближения с молниеотводами. Перенапряжения, приложенные к изоляции электроустановочных изделий, измеряются непосредственно в интересующих точках (клеммных шкафах, местах концевой разделки и т.п.);

- разность потенциалов, приложенная к слою грунта, между молниеотводом и трассой прокладки вторичной цепи. Измерение проводится согласно СО 34.35.311-2004 для определения, нарушены ли требования НТД (например, ПУЭ), по условию обратного перекрытия. В первую очередь данное измерение актуально для отдельно стоящих молниеотводов, не связанных с общим ЗУ объекта.

В случае если измерения проводятся при наличии на объекте только неэкранированных цепей, в дальнейшем, для учета эффекта ослабления помех заземленными экранами, полученные значения помех должны быть уменьшены на минимальный коэффициент ослабления, определенный на основа-

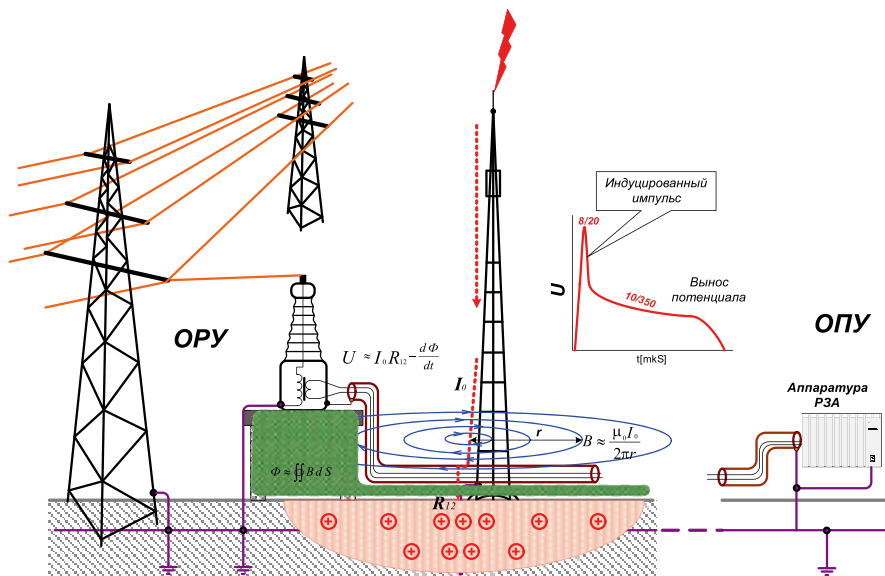


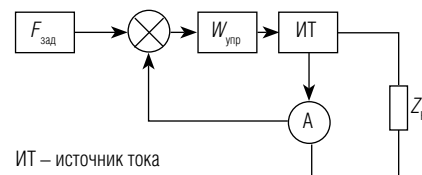
Рис. 2. Формирование импульсной помехи в цепях измерительного трансформатора

нии опыта измерений на аналогичных объектах или расчетов.

С ПОМОЩЬЮ ЧЕГО ПРОВОДИТЬ ИЗМЕРЕНИЯ

Определение описанных выше помех и перенапряжений при стекании импульсных токов молнии вызывает известные проблемы. Если расчетное моделирование таких процессов в ряде случаев дает удовлетворительные результаты [4], то экспериментальные методы исследования указанных процессов только в последнее время были доведены до приемлемого уровня [5, 12]. Трудности экспериментальных методов связаны с несколькими причинами. Наилучшим методом исследования является имитация указанных процессов с помощью мощных генераторов [5]. Однако такой метод не может применяться повсеместно (его применение может привести к нарушениям в работе вторичного оборудования) и является слишком затратным. Поэтому наиболее безопасным и экономичным представляется использование портативных генераторов с относительно небольшими выходными токами, применение которых возможно на всех объектах [12]. Здесь, однако, возникают сложности в реализации таких генераторов, поскольку они должны обеспечить воспроизводимость результатов, безопасность в применении (как для персонала, так и для МП аппаратуры) и портативность.

Одним из главных условий является независимость временных параметров

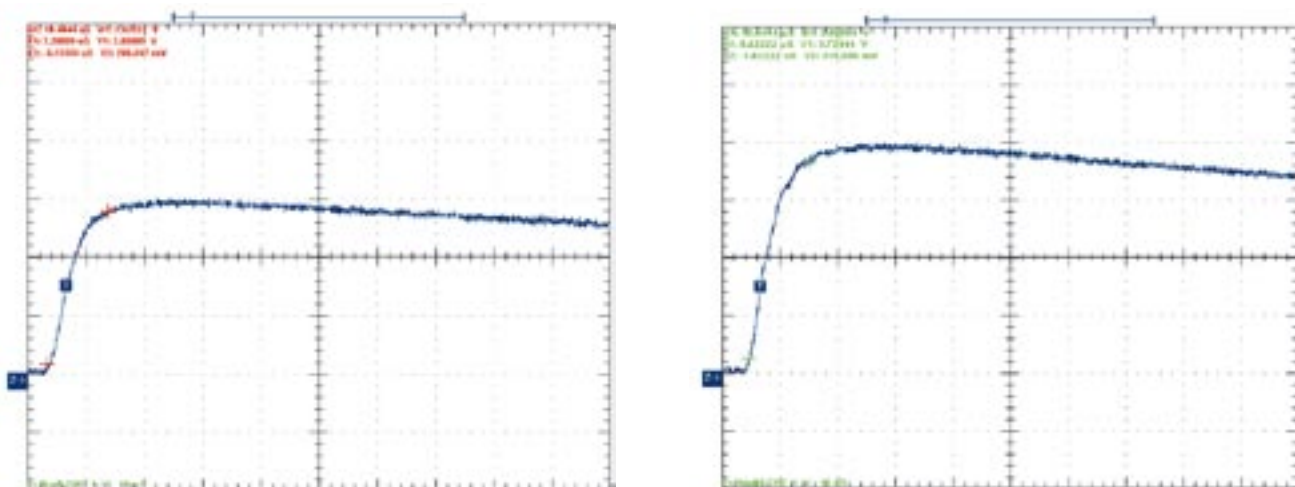


ИТ – источник тока
 $F_{зад}$ – задающий генератор
 $W_{упр}$ – закон управления
 Z_H – нагрузка

Рис. 3. Блок-схема генератора импульсов

импульса тока от условий конкретного объекта. При этом, естественно, параметры выходного импульса тока такого генератора должны соответствовать НТД [8-11]. Поскольку сопротивление ЗУ обследуемого объекта и токового зонда является частотно-зависимой величиной, причем может меняться в широких пределах – от долей до сотен Ом, к стабильности генерируемых импульсов предъявляются особенно жесткие требования.

В настоящее время созданы генераторы, отвечающие указанным требованиям, например, экспериментальный генератор ЛУГ-1М, разработанный ООО «ЭЗОП», описание принципов работы которого приведено в [12]. Этот генератор представляет собой, по сути, систему автоматического регулирования, запрограммированную на минимизацию рассогласования между выдаваемым в нагрузку током и эталонным сигналом 10/350 мкс (блок-схема генератора приведена на рис. 3). Имеются результаты измерений с импульсом 0,25/100 мкс, но сегодня говорить о них, пожалуй, преждевре-



менно. Амплитуда импульса тока генератора может изменяться дискретно (с шагом 1 А) в диапазоне от 1 А до 5 А (в настоящее время разработаны новые модели генератора, с максимальным током до 10 А). При испытаниях сопротивление нагрузки, к которой подключался генератор, имело сильную частотную зависимость в пределах полосы частот молниевых импульсов, изменяясь от единиц Ом до более чем 200 Ом (индуктивность – более 100 мкГн). На рисунке 4 показаны осциллограммы тока генератора (10/350), полученные на различных объектах.

Полученная повторяемость формы импульса тока 10/350 (отклонение параметров импульса от эталона не более 10 %) позволяет сравнивать результаты, полученные на различных объектах.

Схема подключения такого генератора описана в РД 153-34.0-20.525-00. Схема проведения измерений зависит от того, что именно определяется в процессе измерений. Например, для определения помехи, приложенной к входам МП аппаратуры по цепям ТН, и коэффициента ослабления помех экранированным кабелем используется схема, приведенная на рисунке 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. КОЭФФИЦИЕНТЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОМЕХ

За несколько лет компанией ООО «ЭЗОП» была накоплена обширная статистика по результатам имитационных измерений на различных объектах.

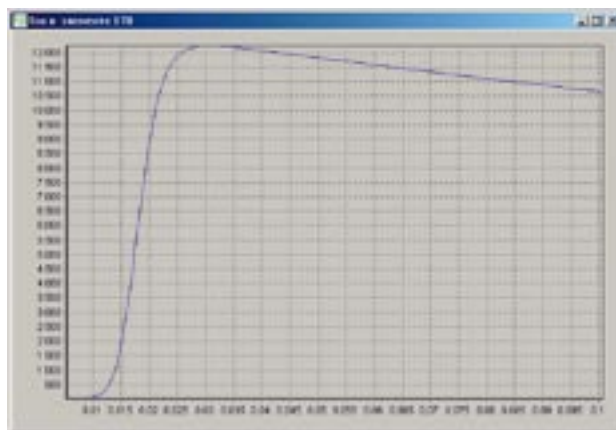


Рис. 4. Форма импульса тока 10/350 мкс, полученная при испытаниях генератора на различных объектах: сверху – осциллограммы, внизу – «эталонный» импульс 10/350 мкс

Количественные характеристики ЗУ конструкций с молниеприемниками, полученные при имитационных измерениях, позволяют довольно точно оценить разности потенциалов, которые могут воздействовать на изоляцию вторичных цепей и МП аппаратуру. Экспериментальное определение коэффициента ослабления помех экранами кабелей (заземленными с двух сторон) или кабельными конструкциями позволяет оптимизировать мероприятия по защите МП аппаратуры и ее цепей от импульсных перенапряжений при молниевых разрядах. Собранные на различных энергообъектах статистика позволила уточнить диапазон значений коэффициентов ослабления помех экранами и кабельными конструкциями. В таблице 1 приведены некоторые данные по измерениям коэффициента ослабления помех экранами.

Видно, что значения коэффициента ослабления помех меняются от 4 до 20, причем наиболее вероятные значения лежат в районе 4–7.

Таким образом, использование коэффициента 4 (как коэффициента ослабления помех экранами кабелей) при разработке рекомендаций по обеспечению ЭМС и расчете достаточности применяемых мероприятий оказывается оправданным.

Аналогичные измерения выполнены для коэффициента ослабления кабельными конструкциями. Полученные данные показали, что коэффициент ослабления помех кабельными конструкциями, лежит в диапазоне от 2 до 10

(для подземных каналов – 6–10, для металлических коробов – 2–5). Для обычных наземных ж/б кабельных лотков коэффициент равен 1 – т.е. ослабления нет.

Учет этих коэффициентов помогает не только оптимизировать рекомендации по обеспечению ЭМС МП аппаратуры, но и зачастую найти приемлемый выход из, казалось бы, безвыходной ситуации. Например, на реконструируемой ПС ожидаются помехи, приложенные к входам МП аппаратуры, на уровне 28–30 кВ, при помехоустойчивости МП аппаратуры к микросекундным импульсным помехам – 4 кВ. Экранированные кабели с заземлением экранов с двух сторон позволяют снизить помехи в 4 раза – до 7–7,5 кВ, что явно недостаточно для защиты аппаратуры. Для снижения разностей потенциалов до 4 кВ и ниже может потребоваться полностью переделать как схему молниезащиты, так и схему расстановки электроаппа-

ратов, что, как правило, неприемлемо. Однако возможность использования металлических коробов (с коэффициентом ослабления не менее 2) или заглубленных кабельных каналов (с коэффициентом ослабления не менее 5) совместно с применением экранированных кабелей для прокладки вторичных цепей может снизить разности потенциалов до допустимого уровня.

Как мы видим, в некоторых случаях, для проектируемых или реконструируемых объектов использование минимального коэффициента – 4 (коэффициента ослабления помех экранами кабелей) может потребовать значительных дополнительных затрат для защиты аппаратуры (применение металлических коробов или подземных тоннелей, использование УЗИП, установка дополнительных молниеприемников). Поэтому экспериментальное определение коэффициента ослабления помех на этапе предпроектного обследования становится особенно важным – в случае если коэффициент окажется равным, например, 6, а не 4 – достаточно использовать только экранированные кабели, если же коэффициент будет равен 4 – дополнительно могут потребоваться другие мероприятия. Естественно, не всегда такие измерения могут быть проведены на этапе предпроектных работ, однако определение коэффициентов ослабления необходимо проводить, по крайней мере, на стадии итогового контроля выполнения разработанных рекомендаций по обеспечению ЭМС (после завершения строительства).

Таким образом, мы видим, что прямые имитационные измерения позволяют оценить, насколько будут эффективны те или иные меры по защите аппаратуры.

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

Часто имитационные измерения позволяют получить не только количественную, но и качественную информацию о заземлителях, например, молниеприемника. Так, сравнивая осциллограммы на рисунках 6, 7 и 8 (диаграммы «б»), можно сделать следующие качественные выводы, даже не прибегая к численному анализу. На рисунке 6 осциллограмма получена для мачты, связанной с общим ЗУ как искусственными заземлителями, так и проводни-

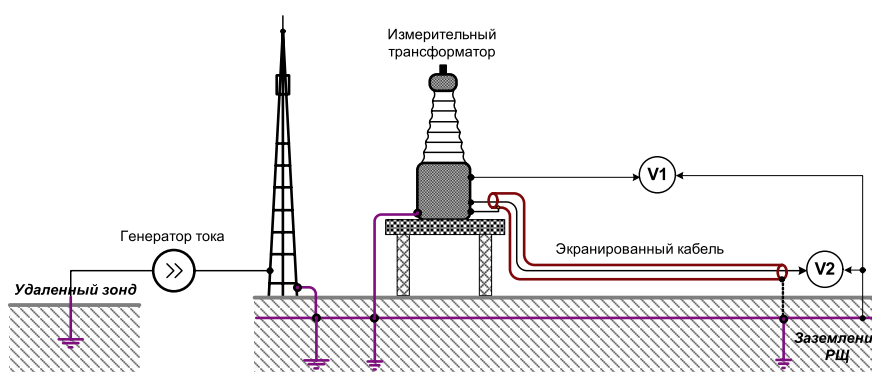


Рис. 5. Схема измерения импульсной разности потенциалов (V1) и помехи в входе аппаратуры (V2)

ком кабеля прожектора. На рисунке 7 осциллограмма получена для мачты, связанной с общим ЗУ только проводником кабеля прожектора (что является грубым нарушением ПУЭ). Об этом свидетельствует очень высокая «активная» составляющая импульса: после импульса «8/20 мкс» (индуктивная составляющая) не следует резкий спад почти до нуля (как это наблюдается на рисунке 6, где несколько естественных заземлителей обеспечивают низкое значение «активной» составляющей сопротивления). На рисунке 8 осциллограмма получена для мачты, не связанной с общим ЗУ, имеющей только собственный обособленный заземлитель. Об этом свидетельствует тот факт, что потенциал на мачте практически не отличается по форме от импульса тока (10/350 мкс), т.е. заземлитель мачты почти не имеет индуктивной составляющей.

Подобные качественные заключения позволяют скорректировать расчетную модель ЗУ объекта. И, соответственно, более точно рассчитать распределение токов и потенциалов при молниевых разрядах для скорректированной схемы ЗУ.

Кроме описанных выше преимуществ, имитационное моделирование позволяет в ряде случаев получать данные о заземлителях даже тогда, когда подобные измерения с помощью приборов, работающих на низкой частоте, не дают исчерпывающей информации. Например, можно оценить и эффективность собственного заземлителя здания или сооружения, находящегося в черте города и связанного с другими объектами естественными заземлителями, в случае если ЗУ образовано только конструкциями фундамента здания/сооружения (например – для сооружения ЗРУ, КРУЭ).

Таблица 1. Коэффициенты ослабления импульсных помех (импульс 10/350 мкс) экранированными кабелями с заземлением экранов с двух сторон

Объект	Коэффициент ослабления для импульса 10/350
ПС 500 кВ Златоуст	4
ПС 330 кВ Новгородская	7
ПС 500 кВ Липецкая (ОРУ 220)	20
ПС 500 кВ Иртышская	5
ПС 500 кВ Таврическая	6,5
Жигулевская ГЭС	5,5
ГЭС-4	6,6
Невинномысская ГРЭС	4,4
ПС 500 кВ Курган	4,3
ПС 500 кВ Челябинская	4
ПС 500 кВ Луговая	4,3
ПС 110 кВ Западная	6,6

СРАВНЕНИЕ С РАСЧЕТАМИ

Результаты большей части измерений на реальных объектах показали удовлетворительное совпадение с результатами расчетов. При этом в расчетной модели не учитывались такие эффекты, как искрообразование в грунте и магнитное насыщение материала заземлителя. Эти факторы также не учитывались и при имитационных измерениях, поскольку ток генератора не превышал 10 А. В большинстве случаев максимальное расхождение между экспериментальными и расчетными результатами (при условии составления корректной модели ЗУ) не превышало 20 %. При этом имитационные измерения оказывались предпочтительнее расчетов. Это связано с тем, что при расчетах зачастую невозможно учесть все естественные и искусственные заземлители. Например, путем трассировки (без вскрытия грунта) определить глубину и, в ряде случаев, наличие вертикаль-

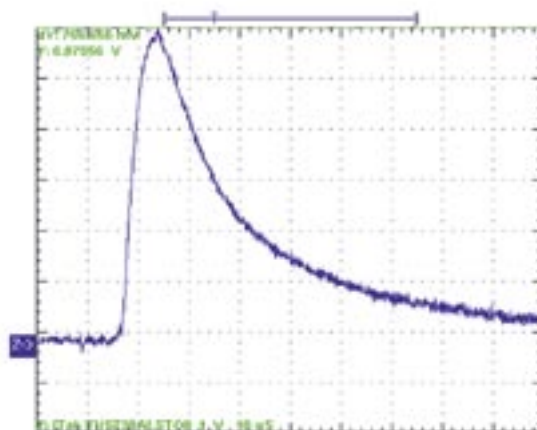
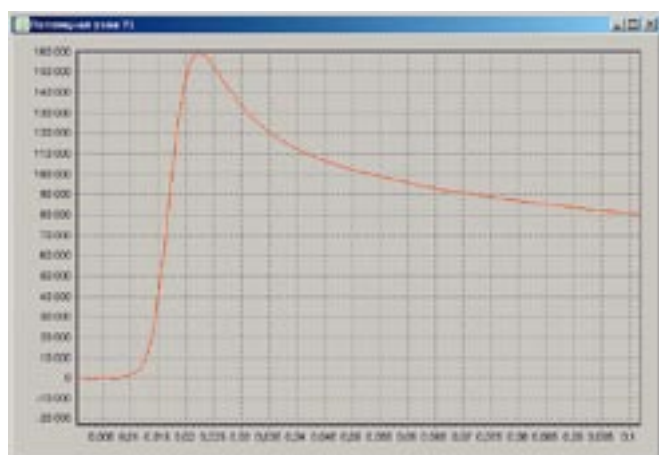


Рис. 6. Результаты определения импульсного потенциала для мачты, связанной с общим ЗУ как искусственными заземлителями, так и проводником кабеля прожектора: а) результат численного моделирования в ПО «Контур», б) результат имитационного моделирования с помощью ЛУГ-1М

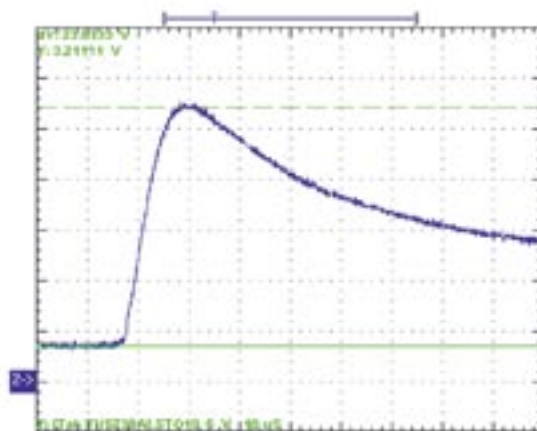
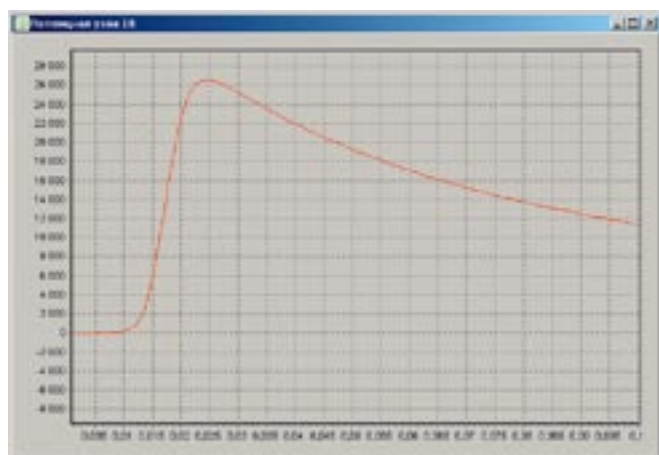


Рис. 7. Результаты определения импульсного потенциала для мачты связанной с общим ЗУ только проводником кабеля прожектора: а) результат численного моделирования в ПО «Контур», б) результат имитационного моделирования с помощью ЛУГ-1М

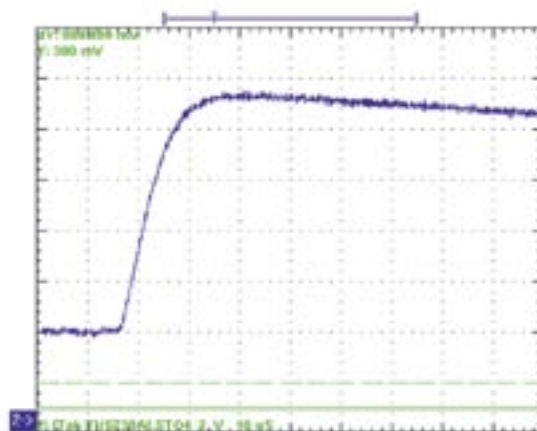
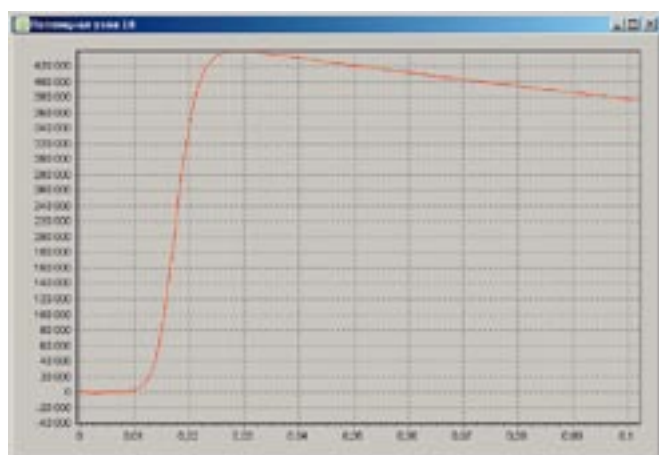


Рис. 8. Результаты определения импульсного потенциала для мачты не связанной с общим ЗУ, имеющей только собственный обособленный заземлитель: а) результат численного моделирования в ПО «Контур», б) результат имитационного моделирования с помощью ЛУГ-1М

ных заземлителей не представляется возможным.

Ниже приведен пример, когда модель ЗУ для расчета в программе «Кон-

тур» составлена корректно (учтены все основные пути растекания тока и все возможные естественные и искусственные заземлители). Измерения проводи-

лись на одной из ТЭЦ в Свердловской области. Результаты приведены на рисунке 9. На диаграмме а) показана осциллограмма разности потенциалов

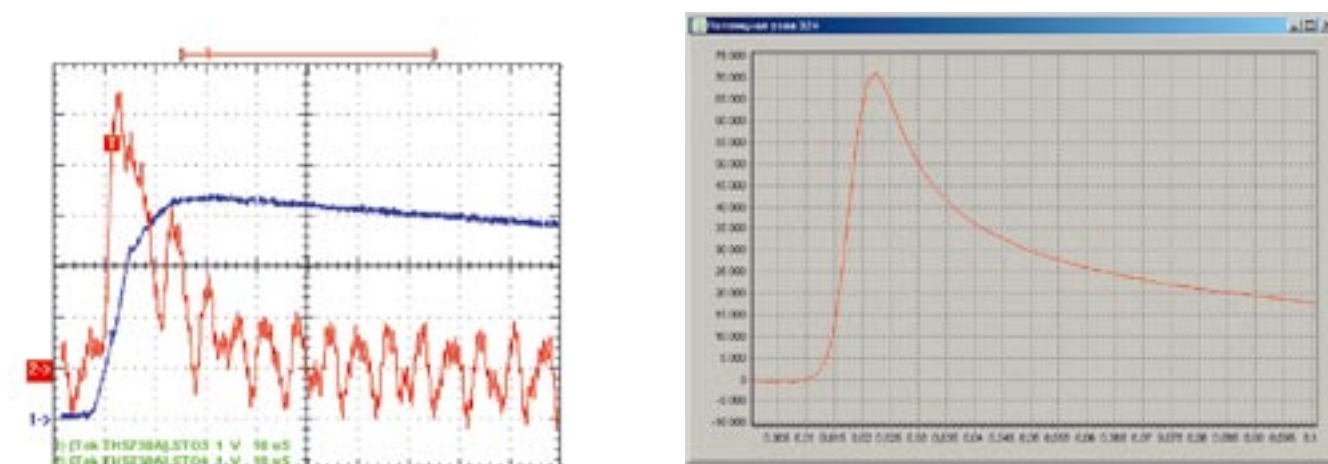


Рис. 9. а) Осциллограмма разности потенциалов между ТН и РЩ: синяя кривая – ток, красная – разность потенциалов, б) рассчитанная разность потенциалов между ТН и РЩ. Нерегулярный характер сигнала объясняется наличием помех, воздействующих на измерительную систему

между ТН и РЩ – красная кривая, при введении тока генератора (синяя кривая – напряжение на сопротивлении 1 Ом) в портал с молниеприемником, расположенный в ~7 метрах от ТН. На диаграмме б) показана расчетная разность потенциалов между ТН и РЩ для реального значения тока молнии. Пересчитывая измеренную разность потенциалов к реальному току молнии получили значение 68 ± 7 кВ. Расчетное значение для того же тока молнии составило 71 кВ. Видно, что совпадение экспериментального и расчетного значения лежит в пределах экспериментальной погрешности. Однако, как уже было отмечено выше, такое совпадение возможно лишь в случае полностью корректной модели, учитывающей все заземлители.

ВЫВОДЫ

Суммируя все вышесказанное, можно сделать следующие выводы.

1. Существующие документы, регламентирующие методы имитационного моделирования растекания тока молнии по ЗУ ЭС и ПС, нуждаются в существенной доработке и корректировке.
2. Для проведения имитационных измерений необходимо использование импульсных генераторов, выдающих заданные импульсы тока (желательно – регламентированные НТД, например, 10/350 или 0,25/100) на нагрузку с широким диапазоном импедансов.
3. Имитационное моделирование растекания тока молнии по ЗУ ЭС и ПС позволяет более или менее точ-

но определить коэффициенты ослабления помех экранами кабелей и кабельными конструкциями. Это дает возможность значительно оптимизировать мероприятия по обеспечению защиты вторичной аппаратуры ПС и ЭС и ее цепей.

4. Имитационное моделирование растекания тока молнии по ЗУ ЭС и ПС позволяет получить информацию о заземлителях молниеприемника даже тогда, когда использование измерителей на низкой частоте не всегда может такую информацию предоставить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев М.В. Сопротивление связи в заземляющем устройстве: методики измерения. Новости электротехники, 2002.
2. Кузнецов М.Б., Матвеев М.В., Луцишин А.Р. Оценка электромагнитной обстановки при проектировании электрических станций и подстанций. Вести в электроэнергетике, 2004.
3. Нестеров С.В. Применение интегральных уравнений для расчета заземлителя произвольной конфигурации в неоднородном грунте. Труды 2-й Всероссийской конференции по заземлению, Новосибирск, 2005.
4. Кузнецов М.Б., Матвеев М.В. Численное моделирование процесса растекания тока молнии по заземляющему устройству здания: сравнение результатов эксперимента и расчетов. Труды 2-й Всероссийской конференции по заземлению, Новосибирск, 2005.
5. Шурупов А.В., Дудин С.В. и др. Мобильный генератор токов молнии.

Труды 1-й Всероссийской конференции по молниезащите, Новосибирск, 2007.

6. Кузнецов М.Б., Кунгуров Д.А., Матвеев М.В., Тарасов В.Н. Проблемы защиты входных цепей аппаратуры РЗА от мощных импульсных перенапряжений. Relay Protection and Substation Automation of Modern EHV Power Systems (Moscow – Cheboksary, September 10–12, 2007)

7. Проблемы защиты входных цепей аппаратуры РЗА от мощных импульсных перенапряжений, 1-я Всероссийская конференция по молниезащите, Новосибирск, 2007.

8. СО 34.35.311-2004 Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях.

9. РД 153-34.0-20.525-00 Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств.

10. МЭК 62305 (Lightning Protection) Молниезащита.

11. СО 153-34.21.122-2003 (РАО ЕЭС) (Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций).

12. Матвеев М.В., Кузнецов М.Б., Лунин М.Ю. Исследование высокочастотных характеристик ЗУ с помощью испытательных генераторов на базе управляемых нелинейных элементов, 3-я Всероссийская конференция по заземляющим устройствам, Новосибирск, 2008.

13. СО 153-34.21.122-2003 (Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций).