

Внедрение микропроцессорной (МП) аппаратуры на энергообъектах и, соответственно, необходимость решения проблем электромагнитной совместимости МП аппаратуры требуют адекватной поддержки в виде нормативно-технической документации, регламентирующей решение этих вопросов на этапе проектирования или комплексной реконструкции ПС. Важнейшее место в обеспечении ЭМС МП аппаратуры занимает заземляющее устройство (ЗУ).

Два недавних стандарта ФСК, касающиеся проектирования и обследования подстанционных ЗУ, обсуждают сегодня московские специалисты, привлекая внимание читателей в первую очередь к недостаткам этих документов.

НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ФСК ПО ЗАЗЕМЛЯЮЩИМ УСТРОЙСТВАМ ПС 6–750 кВ Неточности и противоречия

Михаил Матвеев,
к.ф.-м.н., генеральный директор,
Михаил Кузнецов,
к.ф.-м.н., технический директор,
Виктор Березовский,
главный инженер проекта,
ООО «ЭЗОП», г. Москва

Выпущенные в конце 2011 – начале 2012 года стандарты Федеральной сетевой компании СТО 56947007-29.130.15.105-2011 «Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств» [1] и СТО 56947007-29.130.15.114-2012 «Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6–750 кВ» [2], призваны были ответить на вопросы: как правильно проектировать ЗУ на энергообъектах при новом строительстве или комплексной реконструкции и как проверять соответствие заземляющих устройств (ЗУ) существующих объектов требованиям электромагнитной совместимости (ЭМС).

Однако указанные документы оказались далеки от идеала. Они содержат неточности, ошибки и противоречат не только ранее выпущенным НТД по ЭМС, но даже и ПУЭ. При этом первый документ вообще получил противоречивый статус: изначально задумывавшийся как редакция РД 153-34.0-20.525-00 (Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок) [3], этот документ с одной стороны не отменяет РД, а с другой стороны, применим не ко всем объектам электроэнергетики. Таким образом, создается запутанная ситуация, когда для объектов ЕНЭС необходимо будет применять [1], а для остальных энергообъектов – [3].

Документ [2] действительно пытается пояснить, как именно проектировать ЗУ с учетом ЭМС, но при этом не ссылается на пока еще не отмененный, действующий документ по проектированию ЗУ [4], хотя использует цитаты из этого документа.

Ниже будут приведены примеры ошибок, неточностей и противоречий с действующей НТД рассматриваемых документов [1, 2].

ОБЩИЕ НЕДОСТАТКИ

На наш взгляд, рассматриваемые документы сведены к перечислению (часто, как мы увидим ниже, искаженному) требований существующих НТД, в первую очередь ПУЭ, и дано некоторое разъяснение требований ПУЭ, а также приведены общие слова об отдельных методах измерений и расчетов. В документах отсутствуют или недостаточно подробно рассмотрены ЗУ таких видов РУ, как КРУЭ и ЗРУ. При этом не освещены вопросы, которые волнуют проектировщиков больше всего.

Это в первую очередь вопрос – а как, собственно, создать ЗУ, обеспечивающее ЭМС МП аппаратуры? Каков вообще должен быть алгоритм работы проектировщика?

Так, например, в [4] подробно описан алгоритм проектирования ЗУ. Хотелось бы, чтобы новые документы были расширяли и углубляли описываемые в [1] алгоритмы на современном уровне, учитывая требования ЭМС МП аппаратуры. Ведь проектировщик должен четко осознавать всю последовательность шагов по проектированию ЗУ и понимать, какие именно исходные данные ему для этого понадобятся. Так, например, первым шагом должен быть выбор материала и сечения заземляющих проводников и заземлителей исходя из максимальных значений токов КЗ, времени отключения КЗ и коррозионной опасности. Тогда как мероприятия по снижению импульсных перенапряжений, возникающих при протекании через ЗУ ВЧ-составляющей токов КЗ, должны быть разработаны на завершающей стадии проектирования ЗУ.

При этом требуется освещение всех без исключения вопросов, связанных с проектированием ЗУ, начиная с выбора среднего максимального для ПС размера ячейки сетки ЗУ, и заканчивая необходимостью выполнения связи с заземлением проводящих элементов кабельной канализации. Необходимо также рассмотрение вопросов увеличения коэффициента ослабления импульсных помех ЗУ и шинami уравнивания потенциалов, ведь известно, что заземленные проводники, проложенные параллельно вторичным цепям, эффективно ослабляют импульсные помехи, наводимые в цепях при КЗ (ВЧ-составляющая) и молниевых разрядах. От того, какие проводники (сечение, материал) и на каком расстоянии от вторичных цепей будут проложены, где и как они будут соединены с ЗУ, будет зависеть общий коэффициент ослабления импульсных помех.

Однако в [2] эти вопросы не рассмотрены, и алгоритма проектирования ЗУ нет.

Более того, многие аспекты проектирования ЗУ, освещенные ранее, например в [4], в рассматриваемых документах обсуждаются значительно менее подробно, например, вопросы влияния на сопротивления ЗУ естественных заземлителей и многие другие. А самое главное, в [1 и 2] не дается общее

• Таблица 1. Сравнение предельно допустимых уровней напряжений прикосновения при аварийном режиме электроустановок, напряжением до 1 кВ с глухозаземленной или изолированной нейтралью и выше 1 кВ с изолированной нейтралью

| Время воздействия t, С | 0,01–0,08 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 | Св. 1 |
|-------------------------------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-------|
| Переменный, 50 Гц, ГОСТ 12.1.038-82 | 550 | 340 | 160 | 135 | 120 | 105 | 95 | 85 | 75 | 70 | 60 | 20 |
| Переменный, 50 Гц, по [1 и 2] | 650 | 500 | 250 | 165 | 125 | 100 | 85 | 70 | 65 | 55 | 50 | 36 |

Максимальные значения ВЧ-составляющей тока КЗ Таблица 2 •

| Класс напряжения РУ, кВ | 110 | 220 | 330 | 500 | 750 |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| $I_{вч}$, кА, [1] | 1,2 | 2,5 | 4 | 6 | 11 |
| $I_{вч}$, кА, [6] | 1 | 2 | 6 | 8 | 12 |

видение проблемы, не описан пошагово метод выбора и расчета/измерения параметров ЗУ, как это сделано, например, в [4], непонятно зачем именно проводятся те или иные измерения параметров ЗУ и какова роль отдельных измерений в общей работе по проверке ЗУ.

ПРОТИВОРЕЧИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НТД

Сперва остановимся на наиболее грубых ошибках, заметно осложняющих работу как проектировщикам, так и представителям специализированных организаций, занимающихся экспериментальным и расчетным определением параметров ЗУ ПС.

Максимальная температура проводников

Так, например, в табл. 1 обоих документов приводится требование максимальной температуры «для заземляющих проводников, подсоединенных к аппаратам – не более 3000С», а в [2] даже дается ссылка на п. 1.4.16 ПУЭ. При этом авторы СТО забывают, что в ПУЭ температура заземляющих проводников нормируется только в 1.7.114 (4000С), тогда как в п. 1.4.16 нормируется температура нагрева шин, а не заземляющих проводников.

Температура нагрева, например, кабелей с ПВХ-изоляцией принята равной 160°С, со ссылкой на п. 1.4.16 ПУЭ, тогда как в указанном пункте приведено значение 150°С.

Допустимые напряжения прикосновения

Если упомянутые выше нарушения влияют, в основном, на обеспечение бесперебойной работы оборудования, то, ошибки в указании допустимых значений напряжений прикосновения, оказывают влияние на электробезопасность персонала. Так в [1 и 2] приведены таблицы «Предельно допустимых уровней напряжений прикосновения при аварийном режиме электроустановок, напряжением до 1 кВ с глухозаземленной или изолированной нейтралью и выше 1 кВ с изолированной нейтралью», где, со ссылкой на ГОСТ 12.1.038-82 [5], указаны значения, противоречащие данному ГОСТ.

При этом если для времен отключения выше 0,5 с приведенные напряжения даны с запасом, то для времен отключения менее 0,5 с допустимые значения СТО выше приведенных в ГОСТ, а значит напряжение прикосновения может привести к поражению током персонала ПС.

Максимальные значения ВЧ-составляющей тока КЗ

Следует отметить также и другие противоречия, например, рекомендуемые для расчетов максимальные значения ВЧ-составляющей тока КЗ. Приведенные в [1] максимальные токи отличаются от аналогичных значений, рекомендуемых к применению в [6] (см. табл. 2). При этом параметров ВЧ-составляющей тока КЗ в КРУЭ в [1], в отличие от [6] не приведено, что дает возможность использовать при расчетной и экспериментальной оценке параметров ЗУ токи ВЧ-составляющей для КРУЭ, например 110 кВ, отличающиеся в 5 раз.

Указанные противоречия поставят в тупик проектировщиков и тех, кто будет обследовать состояние ЗУ на ПС.

Частоты импульса генератора

Также в Приложении В к [1] приведены требованиями к техническим средствам, где указаны частоты для импульса генератора, используемого для определения распределения импульсных напряжений. Оказывается для этой цели нужно использовать частоты 0,5, 1 и 2 МГц. Как видно из сравнения с таблицей 1 в [6] (частоты 1, 0,8, 0,3, 0,15 и 0,1 МГц для разных классов напряжения) приведенные значения совпадают только с одним значением.

К противоречиям существующей НТД можно отнести и расхождения в формуле расчета зоны коррозионной опасности в [1, 2] и [3]. В первых документах:

$$Z_K = 6,167 - 0,833 \cdot \ln \left(\frac{|\Phi_{\text{ов}}| - 125}{\rho_{\text{экв}}} \right),$$

в другом:

$$Z_K = 6,2 - 0,83 \cdot \ln \left(\frac{\Phi_{\text{ов}}}{\rho_{\text{экв}}} \right).$$

И если расхождение в коэффициентах незначительно, то появление члена «-125» под логарифмом приводит к значительному изменению получаемых значений. При этом, поскольку [3] не отменен, возникает противоречие – каким документом пользоваться для определения опасности коррозии?

Заземление ограждения ПС

Отдельно следует отметить противоречивую трактовку ПУЭ, в части заземления ограды ПС. Так в ПУЭ (п. 1.7.93) указано, что «внешнюю ограду электроустановок не рекомендуется присоединять к заземляющему устройству», при этом допускается в отдельных случаях, при невозможности выполнения ряда мероприятий, присоединять ограду к общему ЗУ ПС.

В тоже время в [2] рассматриваемый вопрос трактуется с точностью до наоборот, а именно: «Для обеспечения надежной работы охранной сигнализации и других устройств (например, видеонаблюдения), установленных по периметру ограждения ПС, и обеспечения безопасности людей и животных контур заземляющего устройства ПС должен выходить за пределы ограждения ПС и располагаться в 1 м от него, на глубине 1 м.», а, следовательно, ограда должна заземляться на общее ЗУ ПС.

При этом случай, когда ограждение не должно присоединяться к ЗУ ПС (когда между ним и ЗУ расстояние превышает 2 м), определен как допустимый: «Допускается не выполнять внешний контур за пределами ограждения у ПС напряжением 110 кВ и ниже при отсутствии электроприемников на ограждении...».

Таким образом, если в ПУЭ заземление ограды на общее ЗУ ПС является не рекомендуемым, но допустимым случаем, то в [2], наоборот, обязательным, а случай отсутствия связи ограды с общим ЗУ ПС – допустимым.

НЕДОСТАТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ МЕТОДИК

[1 и 2] содержат также и неверные или некорректные методики измерений и расчетов.

Формула расчета нагрева экранов кабелей

В обоих документах приведена формула для расчета нагрева экранов кабелей. Вот эта формула и описание к ней: «Расчет температуры нагрева медных и алюминиевых экранов контрольных кабелей при коротких замыканиях в электроустановках напряжением 110 кВ и выше при заземлении экранов с двух сторон проводится по выражению:

$$\Delta\Theta = 7 \cdot \left(\frac{U_{\text{нз}}}{L} \right)^{1,5} \cdot \sqrt{\tau}, \quad (1)$$

где $\Delta\Theta$ – нагрев экрана кабеля (в °С);

$U_{\text{нз}}$ – приложенное к заземленным концам экрана напряжение, обусловленное неэквипотенциальностью заземляющего устройства (В);

L – длина кабеля, (м);

τ – время отключения короткого замыкания, (сек)».

Как видно из текста, указанная формула должна применяться как для медных, так и для алюминиевых экранов, однако в самой формуле не учтены различные значения удельного сопротивления и теплоемкости материалов. При этом не сложно проверить, что для экранов, выполненных из меди и алюминия, имеющих одинаковое сечение, нагрев будет различным.

Использование такой формулы приведет к неверным результатам. При этом, если авторы считают, что различие между результатами, рассчитанными по этой формуле и по другим, учитывающим параметры материала и сечение проводников, оказывается не существенным, то они должны были по крайней мере сделать ссылку на соответствующие экспериментальные или теоретические разработки.

По всей видимости, указанные расчеты были сделаны в работе [7], где общепринятая указанная в ГОСТ 28895-91 формула для определения нагрева через ток и сечение (2) приведена к формуле через напряжение и длину (3).

$$\Theta_f := (\Theta_i + \beta) \exp \left[\frac{I^2 \cdot T}{(\epsilon \cdot K)^2 \cdot S^2} \right] - \beta \quad (2)$$

$$\Theta_f := \sqrt{(\beta + \Theta_i)^2 + \frac{2 \cdot U^2 \cdot T \cdot (\beta + 20)}{\epsilon^2 \cdot L^2 \cdot \sigma \cdot \rho}} - \beta \quad (3)$$

где β – величина обратная температурному коэффициенту сопротивления, K ;

Θ_f и Θ_i – конечная и начальная температуры, K ;

ϵ – коэффициент учета тепловых потерь в соседние элементы;

σ – удельная объемная теплоемкость экрана, Дж/(К·м³);

ρ – удельное электрическое сопротивление экрана при 20°С, Ом·м;

T – время протекания тока КЗ, с

K – постоянная, зависящая от материала элемента:

$$K := \sqrt{\frac{\sigma \cdot (\beta + 20)}{\rho}} \quad (4)$$

Однако, во-первых, приводимая в стандартах [1 и 2] формула (1) не соответствует описанной в [7] формуле (3) в первую очередь, по характеру зависимости. Во-вторых, сделанный в [7] вывод о том, что нагрев алюминиевых и медных экранов будет одинаковым, поскольку произведения коэффициентов $\epsilon^2 \sigma \rho$ будут близки для меди и алюминия, не верен – отличие указанных произведений составляет несколько десятков процентов и очень сильно зависит от принимаемых условий (параметров материалов изоляции, проводника экрана, времени КЗ и других параметров).

Так, например, для $\sigma \rho$ и других параметров (материал изоляции – ПВХ) взятых из [8], при времени КЗ $t = 0,25$ с от-

личие значения произведения $\epsilon^2 \sigma_r$ для меди и алюминия будет составлять более 33%. Такое расхождение при определенных значениях тока даст в результате температуру менее 100°C для меди (что допустимо) и более 160°C для алюминия (что превышает допустимый уровень).

Формула (1) дает результаты, близкие к тем, что получаются при расчете по (2) и (3) только для случаев больших расстояний, когда токи по экранам относительно невелики, разность потенциалов достигает нескольких сотен вольт и длина кабеля – несколько десятков метров. Однако для случаев коротких расстояний, например, на участках «электроаппарат – клеммный шкаф», где длина цепи может составлять 5–10 м, расхождение с формулами (2) и (3) оказывается значительным, и, в зависимости от параметров, может давать как завышенные, так и заниженные результаты. Так для короткой цепи ($L = 5$ м) при времени КЗ 0,1–0,15 с формула (1) даст значение меньше 150°C, тогда как (2) и (3) дадут значение выше 200°C.

В любом случае, результаты, получаемые с помощью (1) будут противоречить результатам, получаемым с помощью (2), принятой в ГОСТ 28895-91, и даже (3).

Кроме того, использование формулы нагрева через напряжение позволяет учитывать только «идеальный» случай – без учета переходного сопротивления заземления экрана кабеля, тогда как формула учета нагрева через ток (определяемый как сопротивлением экрана, так и переходным сопротивлением) позволяет, при проведении экспериментальных измерений доли тока, растекающегося по экрану, точнее определить температуру нагрева реального кабеля.

Формула (1) дает заниженные по сравнению с (2) и (3) значения нагрева, что может приводить к значительному снижению надежности и даже к недооценке уровня нагрева кабелей при КЗ.

Представляется, что авторы стандартов хотели упростить жизнь проектировщикам и привести простую для использования формулу, однако, формулы, приводимые в ГОСТ 28895-91 и так достаточно просты, и, самое главное, более корректны.

Коэффициент ослабления помех при молниевом разряде

Авторами стандарта [2] упорно игнорируется необходимость экспериментального определения коэффициента ослабления помех при молниевом разряде, тогда как определение такого коэффициента для высокой частоты (ВЧ-составляющей тока КЗ) прописано достаточно подробно. А ведь коэффициент ослабления помех при молниевом разряде оказывается ниже чем для ВЧ-составляющей тока КЗ.

В [3] также не приведены минимальные коэффициенты ослабления помех, возникающих при молниевых разрядах или срабатывании ОПН/разрядников. Представляется, что это связано с тем фактом, что авторы, прописывая в Приложении В требованиями к техническим средствам, указали длительность фронта импульсов генератора в широком диапазоне – от 0,25 до 10 мкс. Естественно, что при таком широком диапазоне длительностей фронтов сложно говорить о повторяемости измеренных значений коэффициента ослабления, зависящего от частоты, а при вводе импульса – от спектрального состава импульса. Однако авторы вместо того, чтобы указать методику измерения коэффициента ослабления (аналогичную таковой для ВЧ-составляющей тока КЗ) и потребовать, чтобы длительность фронта импульса испытательного генератора не менялась с погрешностью выше, например, 10–15%, попросту умолчали об этом.

По-видимому, основной причиной является то, что авторы стандарта, либо связанные с ними организации производят измерения с помощью генераторов, не позволяющих выдавать импульсы с фиксированным фронтом. Однако, в настоящее время уже существуют генераторы, способные выдавать импульс с параметрами 10/350 мкс, не меняющие время фронта для широкого диапазона сопротивлений заземляющего устройства (см. например, [9]).

Разность потенциалов

Также к недостаткам методик измерения относится и предложенное в п. 8.10.2 [3] (при определении помех, связанных с ударами молнии) требование измерять разность потенциалов между точками, находящимися вблизи элемента системы молниезащиты и точкой, удаленной на расстояние не менее 50 м. Дело в том, что потенциал, возникающий при ударе молнии

спадают не столь быстро, как при протекании через ЗУ ВЧ-составляющей тока КЗ. И разности потенциалов, измеренные на расстоянии 50 м и 100 м, могут значительно отличаться.

Более того, важными ведь являются не значения разностей потенциалов между, например лотком (проходящим возле элемента системы молниезащиты) и какой-то абстрактной точкой на ЗУ ПС, а вполне конкретной точкой: ОПУ/РЩ или электроаппаратом, куда заходят цепи, проложенные в лотке. Ведь именно эта разность будет приложена к изоляции кабеля. Но еще более важным будет определение не только этой разности потенциалов, поскольку, как известно изоляция кабелей выдерживает больше чем вход МП аппаратуры. Важнее определить уровень помехи на входе МП аппаратуры таким же способом какой предложен для ВЧ-помех при КЗ (см. п. 8.10.1 [3]).

Максимально допустимое значение импульсного потенциала на ЗУ

В качестве недостатка методик следует отметить и то, что при определении при коммутациях и КЗ используется ни чем не обоснованная цифра 10 кВ. Более того, почему-то указанное значение распространяется только на цепи, гальванически не связанные с ЗУ, тогда как для цепей, заземленных на РУ, максимально допустимый потенциал должен рассчитываться с учетом коэффициента затухания (передачи, ослабления или экранирования). Коэффициент ослабления импульсных помех, обусловленный влиянием заземленных с двух сторон экранов или элементов кабельной канализации, как раз и приводит к уменьшению разности потенциалов между жилами и ЗУ по мере распространения помехи вдоль вторичных кабелей. Более того, коэффициент ослабления помех для цепей гальванически связанных с ЗУ будет меньше, чем для не связанных.

Вообще сама постановка вопроса – допустимый импульсный потенциал на ЗУ является неверной. К повреждениям приводит не потенциал, а разность потенциалов. Так для участка кабеля, проходящего между электроаппаратом и клеммным шкафом на расстоянии 3–5 м, разность потенциалов будет значительно меньше, чем для кабеля, проходящего между клеммным шкафом и ОПУ/РЩ. В случае небольшой ПС в условиях высокого удельного сопротивления грунта импульсный потенциал на ЗУ практически неизбежно превысит 10 кВ, даже если приложенные к изоляции кабелей и входам аппаратуры разности потенциалов не представляют никакой опасности. Однако рассматриваемые документы не учитывают все этих важных особенностей и «нюансов». В результате мы имеем некорректные методики измерений и расчетов.

В [2] в п. 8.2.11, где рассматривается двойные замыкания в сетях с изолированной нейтралью, не рассмотрен случай, когда одна точка замыкания находится до токоограничивающего реактора, а другая – после. В этом случае ток замыкания будет больше, чем когда обе точки находятся после реактора, следовательно, и разность потенциалов, приложенная к изоляции кабелей, будет больше.

Расчетное определение коэффициентов ослабления

Также следует отметить, что в стандартах отсутствуют рекомендации расчетного определения коэффициентов ос-

лабления, или описание методики проведения такого расчета. Но как показало множество измерений и расчетов, более или менее точное определение коэффициента ослабления помех экранами кабелей и кабельными конструкциями позволяет значительно снизить возможные затраты на обеспечение ЭМС МП аппаратуры.

ВЫВОДЫ

Описанные выше недостатки СТО 56947007-29.130.15.105-2011 и СТО 56947007-29.130.15.114-2012 приводят к невозможности полноценного использования указанных документов в настоящее время и нивелируют достоинства документов. Имеющиеся противоречия с действующими документами создают опасные прецеденты «размывания» единых базовых требований в части обеспечения электробезопасности и ЭМС.

Документы нуждаются в комплексной переработке. Причем в процессе переработки должны быть не только устранены обнаруженные недостатки, но и добавлены и расширены отдельные методы расчетов и измерений.

Работы по переработке стандартов должны проводиться с привлечением широкого круга специалистов в области ЗУ и ЭМС и сопровождаться дискуссиями в соответствующих средствах массовой информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств. СТО 56947007-29.130.15.105-2011.
2. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6-750 кВ. СТО 56947007-29.130.15.114-2012.
3. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. РД 153-34.0-20.525-00.
4. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 3-750 кВ переменного тока. 12740ТМ-Т1. Минэнерго СССР, 1987.
5. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. ГОСТ 12.1.038-82.
6. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на электросетевых объектах ЕНЭС. СТО-56947007-29.240.044-2010.
7. Матвеев М.В., Кузнецов М.Б., Лукин М.Ю. Исследование высокочастотных характеристик ЗУ с помощью испытательных генераторов на базе управляемых нелинейных элементов. Третья Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов / Под ред. Ю.В. Целебровского. – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2008
8. Нестеров С.В., Прохоренко С.В. Расчетная оценка термической стойкости экранов контрольных кабелей. Третья Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов / Под ред. Ю.В. Целебровского. – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2008
9. Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева. ГОСТ 28895-91.