

А.В. ГОРОШ,  
директор  
РУП «Белэнергосетьпроект»



М.А. ДРАКО,  
м.т.н., заведующий  
ЭТЛ отдела учета и  
качества электроэнергии  
РУП «Белэнергосетьпроект»



О.А. МОЙСЕНКО,  
заместитель заведующего  
ЭТЛ отдела учета и  
качества электроэнергии  
РУП «Белэнергосетьпроект»



## ОБ ИМПУЛЬСНЫХ ИЗЛУЧАЕМЫХ ПОМЕХАХ В ЦЕПЯХ ВТОРИЧНОЙ КОММУТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Во исполнение Распоряжения Президента Республики Беларусь от 1 июля 2020 года № 119рп «О дополнительных мерах по решению актуальных вопросов жизнедеятельности населения» Министерство энергетики утвердило Программу увеличения электропотребления для нужд отопления, горячего водоснабжения и пищевого приготовления на 2021–2025 годы, которой предусмотрено суммарное увеличение электропотребления для этих нужд до 900 млн кВт·ч. В условиях роста электрической нагрузки потребителей особое значение приобретает надежность электросетевой инфраструктуры, обеспечиваемая в том числе за счет электромагнитной совместимости технических средств.

Увеличение использования электроэнергии для целей отопления, горячего водоснабжения, приготовления пищи и прочих бытовых нужд обуславливает значительный рост нагрузки непосредственно у потребителя, что влечет за собой необходимость масштабной реконструкции и строительства электрических сетей и подстанций всех классов напряжений. Реализация этой задачи предусмотрена Программой увеличения электропотребления для нужд отопления, горячего водоснабжения и пищевого приготовления на 2021–2025 годы [1], а также Программой комплексной модернизации производств энергетической сферы на 2021–2025 годы [2].

### Влияние помех на надежность электросетевой инфраструктуры

Техническое перевооружение электросетевой инфраструктуры Белорусской энергосистемы на современных принципах и современной элементной базе позволит существенно повысить надежность электроснабжения. При этом весьма важным является во-

прос устойчивого функционирования элементов высоковольтных электрических подстанций (ПС). Например, перерыв в электроснабжении потребителя в условиях низких температур приводит к потере источника тепла, что недопустимо.

Некоторые схемные решения по повышению надежности ПС 35–110 кВ проанализированы в [3, 4] и в настоящей статье не рассматриваются.

Работа электроэнергетических объектов во многом зависит от надежного и бесперебойного функционирования установленных на них технических средств (ТС), выполняющих функции защиты, автоматики, связи и т.д. Специфика этих объектов такова, что все установленное на них оборудование в той или иной степени подвергается воздействию помех – возмущений, создаваемых различными источниками или процессами. Помехи могут оказывать негативное влияние на работу оборудования (сбои в работе, кратковременные отказы, выход из строя). Наибольшую опасность они представляют для ТС, имеющих низкую помехоустойчивость

и работающих на базе микропроцессорных устройств.

Совокупность помех, влияющих на качество функционирования находящегося на энергообъекте оборудования, характеризует электромагнитную обстановку (ЭМО) данного объекта. Основанием для определения и анализа ЭМО на реконструируемых и вновь вводимых энергосетевых объектах является задание на проектирование, а также требования ТНПА [5–7]. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) устанавливаемых на них ТС также должно закладываться на уровне разработки проекта. Однако, по нашему мнению, корректные проектные решения по обеспечению ЭМС не могут быть разработаны без результатов натурного обследования ЭМО на объекте.

Одним из факторов, влияющих на качественное функционирование средств РЗА, установленных в помещениях общих пунктов управления электростанций и ПС высокого напряжения, являются импульсные помехи в цепях вторичной коммутации. В настоящей статье рассмотрен опыт

РУП «Белэнергосетьпроект» по измерению импульсных излучаемых помех в цепях вторичной коммутации ПС 35 кВ и выше. Отметим, что описывается только один из возможных способов измерения помех, имеющих различную природу возникновения и распространения.

### Основные принципы защиты ТС от воздействия помех

Защита ТС от влияния помех базируется на следующих основных принципах [7, 8]:

- защита вторичных цепей от импульсного потенциала;
- экранирование ТС при непосредственном воздействии высокочастотного электромагнитного поля;
- применение устройств ограничения перенапряжений от воздействия на ТС внешних и внутренних помех;
- использование глубинных заземлителей для снижения входного импульсного сопротивления в месте ввода в землю импульсных и высокочастотных токов;
- снижение сопротивления цепи заземления оборудования путем применения двух и более заземляющих проводников, прокладываемых в нескольких направлениях от оборудования.

В электросетевых филиалах энергоснабжающих организаций ГПО «Белэнерго» зачастую возникают сложности с измерением величины помех собственными силами. Для этого могут быть использованы возможности сертифицированной испытательной лаборатории, оснащенной необходимыми метрологически обеспеченными сред-

Результаты обследования электромагнитной обстановки на ПС 110 кВ

Кодовый номер ПС	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9
Измеренное значение сопротивления ЗУ, Ом	0,66	0,99	0,63	0,76	0,60	0,89	1,33	2,60	0,63
<b>Выявленные нарушения ЭМО</b>									
Высокие амплитудные значения напряжения в цепях вторичной коммутации, вызванные импульсными излучаемыми помехами при КЗ и коммутациях в высоковольтной сети	+	-	+	-	-	-	-	+	-
Недопустимые амплитудные значения напряжения затухающих колебаний на заземлителе при протекании импульсного тока высокой частоты	+	+	-	-	+	-	+	+	+
Недопустимые значения напряжений промышленной частоты, воздействующих на изоляцию кабелей в цепях вторичной коммутации при КЗ на землю в цепях первичной коммутации	+	-	-	+	-	+	-	-	-

ствами измерений (СИ) и владеющей методиками выполнения измерений (МВИ), в том числе с использованием валидированного математического аппарата для обработки результатов.

### О роли заземляющего устройства электроустановки в обеспечении ЭМС

Одним из главных условий выполнения установленных требований в части ЭМС при эксплуатации и реконструкции ПС является своевременное выявление и устранение дефектов заземляющих устройств (ЗУ) и устройств молниезащиты [10]. Дефекты ЗУ значительно снижают электробезопасность обслуживающего персонала, а при воздействии коммутационных или внешних перенапряжений могут приводить к отключению ответственных электроустановок по-

требителей и значительному экономическому ущербу.

В [11, 12] проанализированы некоторые технические решения, позволяющие существенно снизить риск нарушений электроснабжения, обусловленных почвенным корродированием металла заземлителей. В частности, рассмотрен выбор геометрических параметров ЗУ с учетом коррозионной активности грунта.

В ходе выборочного обследования ЭМО на девяти ПС 110 кВ, выполненного в течение трех последних лет, было установлено несоответствие конфигурации и физического состояния ЗУ (их значений сопротивления) современным проектным решениям, приведенным в стандартах ГПО «Белэнерго» [13, 14]. Есть основания полагать, что этим несоответствием обусловлены следующие нарушения ЭМО, выявленные на обследованных ПС (см. таблицу):

- 1) высокие амплитудные значения напряжения в цепях вторичной коммутации, вызванные импульсными излучаемыми помехами при КЗ и коммутациях в высоковольтной сети;
- 2) недопустимые амплитудные значения напряжения затухающих колебаний на заземлителе при протекании импульсного тока высокой частоты;
- 3) недопустимые значения напряжений промышленной частоты, воздействующих на изоляцию кабелей в цепях вторичной коммутации при КЗ на землю в цепях первичной коммутации.

В [15] проанализированы случаи, когда применение чувствительных

### СПРАВОЧНО

*РУП «Белэнергосетьпроект» является одним из ведущих проектных предприятий Республики Беларусь в области электроэнергетики. Более 10 лет в составе предприятия функционирует электротехническая лаборатория (ЭТЛ), проводящая обследования ЭМО на энергообъектах, а также выполняющая нестандартные задачи в области помехозащищенности электросети. Лаборатория аккредитована ГП «БГЦА» на соответствие основополагающему стандарту ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [9] как испытательная лаборатория.*

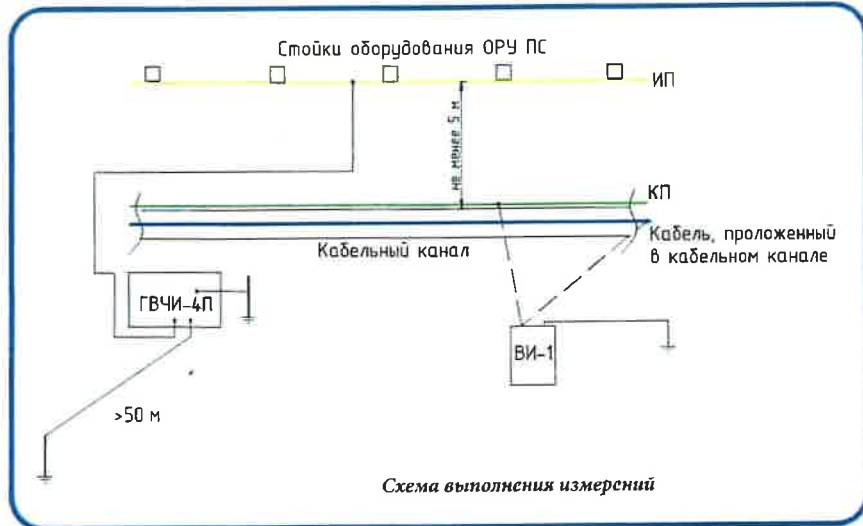
*На основании результатов измерений, выполняемых ЭТЛ, группа техники высоких напряжений отдела учета и качества электроэнергии РУП «Белэнергосетьпроект» разрабатывает раздел «Электромагнитная совместимость», предусмотренный в каждом проекте реконструкции или возведения ПС 35 кВ и выше.*

к помехам электронных устройств на длительно эксплуатируемых ПС, сооруженных по устаревшим нормам, приводило к ряду проблем. Так как в основе стандартных защитных мероприятий лежит принцип заземления всего оборудования и ТС, установленных на объекте, необходимо уделять особое внимание качественному монтажу и текущему состоянию ЗУ. Однако на практике ситуация выглядит иначе: объекты проектируются без достоверной исходной информации, качество работ при монтаже ЗУ в ряде случаев невысокое, приемо-сдаточные испытания проводятся не комплексно и не в полной мере. В итоге экономия средств и времени при сооружении ЗУ оборачивается гораздо большими затратами в процессе эксплуатации.

### Алгоритм измерения импульсных помех в цепях вторичной коммутации

При выполнении коммутаций на ПС вследствие переходных процессов в первичных цепях возникают импульсные токи. Через паразитные емкости от оборудования на землю по заземлителю начинает протекать высокочастотная составляющая тока ( $I_{\text{вч}}$ ), и возникает скачок потенциала. Импульсный потенциал, ослабленный железобетонными конструкциями кабельных каналов (лотков), экранами кабелей, проложенными рядом проводниками и т.д., передается по кабелям вторичной коммутации на кабельные порты установленного оборудования, создавая угрозу сбоев в работе и отказов.

Для измерения напряжения импульсных помех в цепях вторичной коммутации, возникающих в результате электромагнитного излучения при протекании токов КЗ и коммутационных переключениях в первичных цепях электростанций и ПС, специалистами РУП «Белэнергосетьпроект» была разработана и апробирована на ПС 35–750 кВ Белорусской энергосистемы МВИ 4707-2013 «Методика выполнения измерений напряжения импульсных помех в цепях вторичной коммутации, возникающих в результате электромагнитного излучения при протекании токов короткого замыкания и коммутационных переключениях в первичных цепях электрических



станций и подстанций высокого напряжения», прошедшая государственную метрологическую экспертизу.

Измерения выполняются измерительным комплексом ИКП-1, состоящим из генератора высокочастотных импульсов ГВЧИ-4П и импульсного вольтметра ВИ-1.

К основным исходным данным, необходимым для анализа и выбора корректных мест подключения генератора и вольтметра ИКП-1, относятся:

- оперативная электрическая схема электроустановки;
- план расположения силового оборудования с трассами прокладки кабелей;
- состав и расположение устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) и автоматизированных систем управления (АСУ);
- электрические связи устройств РЗА и АСУ с силовым оборудованием;
- удельное сопротивление грунта;
- места заземления цепей напряжения и тока РЗА и АСУ.

Для подключения ИКП-1 к кабельным трассам открытого распределительного устройства (ОРУ) электроустановки выбираются главные участки трасс, по которым проходит основная часть кабелей. В дальнейшем эти участки используют для имитации воздействия электромагнитного поля с помощью излучающего провода. Если на ОРУ имеется несколько кабельных трасс (например, в виде тоннеля и кабельного лотка), для измерений предпочтительны магистральные участки каждой из этих трасс.

Из всех видов кабелей, проходящих по выбранному участку трассы, выбираются образцы наиболее длинных

кабелей каждой группы: с экраном, без экрана, в оболочке. Вопросы заземления экранов контрольных кабелей на электростанциях и ПС рассмотрены в [16]. Кабели подбираются таким образом, чтобы в них имелись либо свободные, либо рабочие жилы, у которых нагрузка со стороны устройств имеет сопротивление более 1 кОм.

Цикл подготовки к выполнению измерений включает следующие работы:

- проверка срока действия свидетельства о государственной поверке (калибровке) СИ;
- определение и регистрация значений влияющих величин;
- проверка надежности заземления СИ;
- подготовка СИ, входящих в ИКП-1, к использованию в соответствии с руководством по эксплуатации;
- укладка контрольного провода (КП) вдоль выбранных кабельных трасс. КП прокладывается по поверхности грунта рядом с каналом (лотком) таким образом, чтобы длина КП была примерно равна длине исследуемого кабеля;
- подвеска параллельно выбранному участку кабельной трассы провода – источника помех (ИП), имитирующего шину высокого напряжения. ИП подвешивается на расстоянии не менее 5 м от КП на высоте около 1,5 м;
- подключение генератора ГВЧИ-4П к средней части ИП.

Схема выполнения измерений представлена на рисунке.

Прямые измерения выполняются в следующем порядке:

1. На генераторе ГВЧИ-4П и вольтметре ВИ-1 задаются требуемые режимы работы.



2. Числовые значения результатов измерений регистрируются без округления.

3. Вольтметром измеряется амплитуда напряжения фоновых помех  $A_{\text{фп}}$  на контрольном проводе КП. При этом один выход вольтметра подключается к КП, а второй – к корпусу устройства АСУ, к которому проложены провода и кабели.

4. Вольтметром измеряется амплитуда напряжения фоновых помех  $A_{\text{фк}}$  на кабеле, проложенном в кабельном канале (лотке). При этом один выход вольтметра подключается к свободной жиле кабеля в шкафу зажимов выключателя (ШЗВ) или панели, а второй – к корпусу устройства АСУ, к которому проложены провода и кабели.

5. С помощью генератора воспроизводятся импульсы тока  $I_r$  амплитудой до 10 А и частотой колебаний 0,5; 1,0; 2,0 МГц.

6. Вольтметром измеряется амплитуда напряжения импульсных помех  $A_n$  на КП.

7. Вольтметром измеряется амплитуда напряжения импульсных помех  $A_k$  на свободной жиле кабеля в ШЗВ.

8. Результаты измерений обрабатываются и оформляются.

Измерения по пунктам 3–4 проводятся при выключенном генераторе ГВЧИ-4П, а по пунктам 6–7 – при включенном. Число результатов наблюдений (измерений) по пунктам 3–7 должно составлять не менее пяти.

Наибольшее значение напряжения импульсных помех, вызванных излучениями,  $A_n$  определяется методом косвенного измерения с использованием результатов прямых измерений по формуле

$$A_n = \frac{(A_n - A_{\text{фп}}) \cdot I_{\text{вн}}}{K_3} = \frac{(A_k - A_{\text{фк}}) \cdot I_{\text{вн}}}{I_r} \quad (1)$$

где  $I_{\text{вн}}$  – значение высокочастотной составляющей тока КЗ, А (выбирается в соответствии с функциональной зависимостью из таблицы 2 [17]);  $K_3$  – коэффициент экранирования, промежуточная величина, расчет которой производится с целью качественной оценки экранирования кабеля в соответствии с функциональной зависимостью

$$K_3 = \frac{A_n - A_{\text{фп}}}{A_k - A_{\text{фк}}} \quad (2)$$

Модель измерения  $A_n$  имеет вид

$$A_n = \frac{(A_k - A_{\text{фк}}) \cdot (1 + \delta A_n)}{I_r \cdot (1 + \delta I_r)} \cdot I_{\text{вн}}, \quad (3)$$

$$K_3 = \frac{A_n - A_{\text{фп}}}{A_k - A_{\text{фк}}} \cdot (1 + \delta A_n), \quad (4)$$

где  $\delta A_n$  и  $\delta I_r$  – влияющие величины, обусловленные погрешностью вольтметра ВИ-1 и генератора ГВЧИ-4П соответственно при измерении импульсных помех, отн. ед.

Обработка результатов измерений с учетом неопределенности выполняется косвенным методом.

Вопросы расчета стандартных неопределенностей, коэффициентов чувствительности, вкладов в неопределенность, суммарной стандартной и расширенной неопределенности являются прикладными и рассмотрены в МВИ 4707-2013, разработанной ЭТЛ. Отметим, что необходимость расчета неопределенности результата измерений может согласовываться с заказчиком.

Результат измерения  $A_n$  считается удовлетворительным, если его значение с учетом неопределенности не превышает максимально допустимое значение уровня испытаний при воздействии напряжения затухающих колебаний  $A_{\text{нmax}}$ , нормируемое [18].

Коэффициент экранирования  $K_3$  позволяет оценить степень ослабления (рассеяния, частичного поглощения) импульсной помехи вследствие прохождения через физический объект (железобетонный кабельный канал, лоток, стену здания и т.д.) и применяется при выполнении расчетов при проектировании.

Результаты расчетов  $A_n$  и  $K_3$ , информация о степени жесткости испытаний, значения  $A_{\text{нmax}}$  и выводы оформляются в виде протокола результатов измерений.

## Выводы

1. Опыт РУП «Белэнергосетьпроект» по измерению импульсных излучаемых помех в цепях вторичной коммутации ПС 35 кВ и выше позволяет сделать вывод, что чаще всего основными причинами возникновения и распространения помех и, как следствие,

неблагоприятной ЭМО на объектах электроэнергетики являются:

- отклонения от проекта в ходе его реализации и последующих реконструкций;
- низкое качество строительно-монтажных работ;
- физическое и моральное старение объекта;
- повреждение заземлителей при земляных работах, реконструкции и т.п.

2. Результаты натурного обследования ЭМО на энергообъекте являются важнейшими исходными данными для разработки решений по ЭМС технических средств.

3. Качественное функционирование средств РЗА, установленных в помещениях общих пунктов управления электростанций и ПС высокого напряжения, зависит от ряда факторов, в том числе от импульсных помех в цепях вторичной коммутации. Квалифицированная оценка их значений и внедрение при необходимости корректирующих мероприятий позволят снизить количество сбоев в работе этих средств и повысить надежность электроснабжения.

## Список литературы

1. Программа увеличения электропотребления для нужд отопления, горячего водоснабжения и пищевого приготовления на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: утв. 12.01.2021 постановлением М-ва энергетики Респ. Беларусь. – Режим доступа: [https://minenergo.gov.by/upload/news/2021/yanvar/%D0%AD%D0%9B%D0%95%D0%9A%D0%A2%D0%A0%D0%9E%D0%9F%D0%9E%D0%A2%D0%A0%D0%95%D0%91%D0%9B%D0%95%D0%9D%D0%98%D0%95\\_compressed.pdf](https://minenergo.gov.by/upload/news/2021/yanvar/%D0%AD%D0%9B%D0%95%D0%9A%D0%A2%D0%A0%D0%9E%D0%9F%D0%9E%D0%A2%D0%A0%D0%95%D0%91%D0%9B%D0%95%D0%9D%D0%98%D0%95_compressed.pdf). – Дата доступа: 11.12.2023.
2. Программа комплексной модернизации производств энергетической сферы на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: утв. постановлением М-ва энергетики Респ. Беларусь, 5 апреля 2021 г., № 19. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.by/wp-content/uploads/2021/%D0%9F%D0%9A%D0%9C%D0%AD%202025-%D1%81.pdf>. – Дата доступа: 11.12.2023.
3. Киселев, К.А. О необходимости скорейшей реконструкции трансформаторных подстанций 35–110 кВ, выполненных по схеме с отделителями и короткозамыкателями / К.А. Киселев, Л.И. Бузюга, М.А. Драко // Энергетическая стратегия. – 2018. – № 1 (61). – С. 20–22.
4. Драко, М.А. Оценка показателей надежности главных схем электрических соединений подстанций, выполненных по схеме с отделителями / М.А. Драко [и др.] // Энергетическая стратегия. – 2018. – № 6 (66). – С. 17–19.
5. Электроустановки на напряжении до 750 кВ. Линии электропередачи воз-