

Настоящий материал является переводом двух статей, дающих хорошее представления о двух важных аспектах измерения активности частичных разрядов (ЧР) при помощи СВЧ-датчиков: единицах измерения уровня ЧР и частотных диапазонах датчиков.

[Ссылки на оригинальный материал:](#)

<https://www.linkedin.com/pulse/1-uhf-partial-discharge-monitoring-lets-honest-martin-judd/>
<https://www.linkedin.com/pulse/2-uhf-partial-discharge-monitoring-lets-honest-martin-judd/>

Предисловие

Поставщики систем мониторинга частичных разрядов (ЧР) иногда просят меня прокомментировать спецификации для закупки систем мониторинга трансформаторов и КРУЭ, которые им присылают во время тендерных процедур. Очень часто в таких документах содержатся требования, которые нарушают законы физики и расходятся с положениями публикуемых научных статей. В данной статье я опишу некоторые ключевые проблемы для того, чтобы прояснить непонимания и поддержать тех, кто описывает возможности своих систем честно.

Требование отображения уровня ЧР в пикокулонах (пКл)

Измерение кажущегося разряда в соответствии с МЭК 60270 (который обычно измеряется в пКл) может быть проведено только правильно откалиброванной измерительной системой, имеющей гальваническую связь с объектом испытаний. Уже на протяжении более чем 20 лет хорошо известно, что системы, использующие “нетрадиционные” методы измерения ЧР, такие как СВЧ-измерения, не могут определять кажущийся разряд в пКл - поэтому, пожалуйста, прекратите требовать это! Техзадания или спецификации к тендерам обычно это игнорируют, поскольку, похоже, что их пишут люди, не имеющие должного понимания о процессе измерения ЧР. Похоже, что многие специалисты знакомы с ЧР только в контексте приёмосдаточных испытаний, поэтому они настаивают на том, чтобы одни и те же единицы измерения использовались во всех системах мониторинга ЧР. Я понимаю позицию производителей, которые последовательно используют пКл в качестве единиц измерения в своих системах мониторинга чтобы продолжать участвовать в тендерах. В конце концов, заказчик получает то, что хочет. Однако, чтобы прояснить ситуацию, отмечу, что эти пКл не имеют смысла! Производители, которые стремятся поддерживать подобные требования, лишь помогают в дальнейшем распространении мифа о том, что системы мониторинга ЧР можно калибровать в пКл.

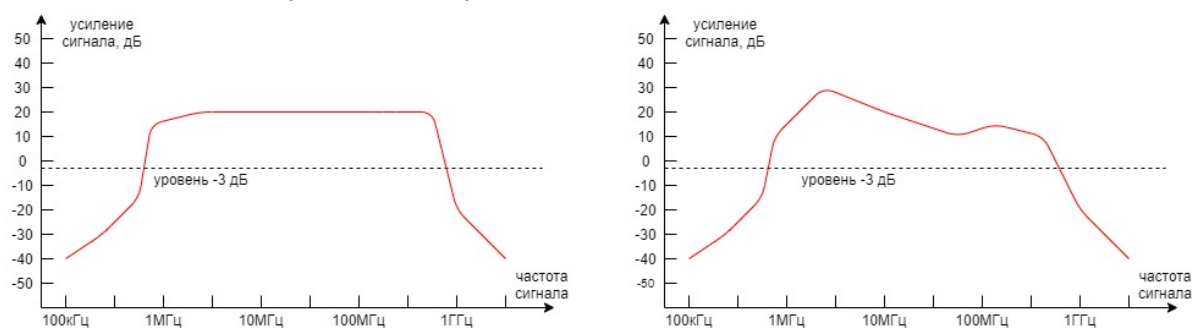
Стоит также осудить недобросовестных разработчиков систем мониторинга, которые утверждают, что их системы мониторинга могут измерять ЧР в пКл. Именно для них особенно выгодно убедить доверчивых клиентов в том, что это нужно внести в тендерную документацию. Единственная установленная процедура соотносить чувствительность систем мониторинга ЧР с уровнем в пКл описана в технической брошюре CIGRE 654 2016 года “UHF Partial Discharge Detection System for GIS: Application Guide for Sensitivity Verification” (“Системы СВЧ-определения ЧР для КРУЭ: руководство по применению для калибровки”, [ссылка на публикацию](#)), которая призвана обеспечить достоверность измерения определённого минимального уровня кажущегося заряда ЧР. Она описывает прагматичный подход, представляющий

наилучшую возможную схему, которая может быть выработана группой международных экспертов в области ЧР, и которая основывается на многолетнем совместном опыте. Брошюре уже более 3 лет, что значит, что она может быть бесплатно скачана с сайта e-cigre.org.

Неверно указанные частотные диапазоны датчиков ЧР

Ещё одной общей ошибкой является требование к обеспечению широкого частотного диапазона датчиков ЧР, явно превышающего весь набор частот, на котором когда-либо будут измеряться ЧР. В 1990-х я был вовлечён в исследование ЧР в КРУЭ совместно со специалистами Единой национальной энергосистемы Великобритании. Результатом работы стало предложение о рабочем диапазоне частот 500-1500 МГц, который идеально подходит для измерений в КРУЭ. Несмотря на то, что прошло 25 лет, с тех пор в физике появления и распространения ЧР в элегазе ничего не поменялось. Более того, применительно для трансформаторов, становится очевидно, что верхняя граница в 1000 МГц, наиболее вероятно, является более чем достаточной для определения ЧР. Тем не менее, мне попадались документы, предъявляющие требование к диапазону 300-3000 МГц для СВЧ-датчиков, устанавливаемых на силовых трансформаторах.

Конечно, можно сказать: “Наверняка диапазон 300-3000 МГц лучше диапазона 500-1500 МГц”. К сожалению, отсутствие понимания является общей чертой спецификаций на СВЧ-датчики. Например, частотным диапазоном мы обычно считаем то, что ограничено точками ослабления сигнала в -3 дБ, между которыми усиление сигнала постоянно. Однако мне приходилось испытывать датчики разных типов, производители которых заявляли, что их частотный диапазон составляет от X до Y, однако различия в чувствительность в этом диапазоне могли достигать 20 дБ. Пример таких характеристик показан на рисунке ниже. Важно понимать, что требование к определённому частотному диапазону необязательно является неверным, поскольку эффективность определения ЧР не задаётся абсолютной чувствительностью. Более важным параметром является отношения сигнал-шум в используемом частотном диапазоне.



Пример частотных характеристик датчика с постоянным (слева) и непостоянным (справа) усилением

СВЧ-датчики не являются датчиками какой-то определённой частоты. Всегда требуется определённый конечный диапазон, конечно, если энергия детектируемого сигнала будет ненулевой. В большинстве стандартных применений систем мониторинга ЧР датчики используются в широкополосном режиме, хотя может дополнительно использоваться фильтрация отдельных известных сигналов (например, наводки от связи) чтобы уменьшить эффект интерференции.

Даже в режимах измерения на одной определённой частоте, анализатор спектра всегда выделяет какой-то диапазон, например 1 МГц. Какой бы частотный диапазон не использовался, если бы уровень шума и интерференции был нулевым, чувствительность можно было бы бесконечно улучшать простым увеличением чувствительности. Всё дело в шуме, который ограничивает уровень минимального ЧР, который можно определить. Отношение сигнал-шум определяется факторами, включающими в себя не только характеристики датчика, но также и характеристики системы мониторинга, и окружающую электромагнитную обстановку, в которой работает система мониторинга. Чтобы быть справедливыми ко всем производителям СВЧ-датчиков, тендерные спецификации должны включать не только частотный диапазон, но также и:

- единицы измерения характеристик ЧР;
- равномерность кривой коэффициента усиления в частотном диапазоне датчика;
- условия измерения частотных характеристик датчика.

Последнее является наиболее важным. Я убеждён в том, что в некоторых случаях впечатляющие характеристики частотного отклика СВЧ-датчиков в широком диапазоне частот получаются в результате испытания одного лишь датчика без учёта того, насколько корректно он будет смонтирован на высоковольтном оборудовании. Частотные характеристики и чувствительность СВЧ-датчиков обычно определяются при помощи электромагнитной ячейки TEM/GTEM. Хорошим примером подтасовки результатов определения частотных характеристик датчика является ситуация с датчиками, устанавливаемыми на смотровые окна КРУЭ. Эти окна хорошо подходят для оснащения уже действующих КРУЭ внешними датчиками ЧР. При таком типе установки датчик, как антенна, отделён от внешней поверхности КРУЭ оболочкой КРУЭ и стеклом. При калибровке таких датчиков важно, чтобы они были установлены на такой же пластине, имитирующей оболочку КРУЭ с окном. Если тендерные спецификации не предъявляют требований к процедуре калибровки датчиков, то производители калибрующие свои датчики корректно, будут проигрывать производителям, чьи датчики никогда не будут работать так, как того требуют тендерные спецификации.

Об авторе

Мартин Джадд - технический директор HFDE Ltd., шотландской компании, специализирующейся в обслуживании по состоянию и методиках диагностики высоковольтного электрооборудования. Он ответственен за регулярное взаимодействие с электросетевыми компаниями и внедрение технических решений для определения, диагностики и мониторинга ЧР на таком оборудовании, как силовые трансформаторы, ОРУ и КРУЭ. Перед основанием HFDE в 2014 году, Мартин являлся профессором высоковольтных технологий в университете Стратклайда в Глазго, Шотландия, Великобритания, где заведовал высоковольтной лабораторией и внедрил несколько новшеств в области методик СВЧ-измерения ЧР. Он является автором более 250 научных статей о ЧР и смежных областях. Он также является членом технического комитета в составе IEEE DEIS (Dielectrics and Electrical Insulation Society) и представляет Великобританию в двух рабочих группах CIGRE: A2/D1.51 "Improvement to PD measurements for factory and site acceptance tests of power transformers" и D1.74 "PD measurement on insulation systems stressed from HV power electronics".

О докладе

25 марта 2020 года Всемирный совет по ветроэнергетике (The Global Wind Energy Council, GWEC) опубликовал свой ежегодный отчёт о развитии ветряной энергетики. Согласно данным отчёта, 2019 год стал вторым самым успешным годом в истории для индустрии. Суммарная установленная за год мощность достигла 60,4 ГВт, что соответствует росту на 19% по сравнению с предыдущим годом. Эти цифры лишь немного отстают от рекордного 2015 года, когда годовая установленная мощность достигла 63,8 ГВт.

Рыночные механизмы способствовали росту индустрии. Две трети введённых мощностей были объектами торгов, что в два раза превосходит аналогичный показатель 2018 года.

Отчёт также отмечает важность развития технических решений, применяемых в индустрии наряду с маркетинговыми механизмами. Отдельно выделяются роль гибридизации, когда ветряная генерация работает в связке с иными технологиями производства и хранения энергии, и роль «зелёного» водорода, получаемого в результате электролиза воды под действием ветряной энергии.

Большая часть установленных в 2019 году мощностей относится к развитым рынкам. На 5 крупнейших ветроэнергетических рынков (КНР, США, Соединённое Королевство, Индия, Испания) в совокупности пришлось 70% введённых мощностей. На эти же страны, в целом, приходится 73% от 651 ГВт общего объёма мировой ветроэнергетической мощности.

Помимо этого, азиатско-тихоокеанский регион стал мировым лидером в наземных установках в 2019 году, достигнув общей установленной мощности 28,1 ГВт, что составляет примерно половину от всех введённых ветроэнергетических мощностей за год.

Европа также показала 30% рост, основными драйверами которого были Испания, Швеция и Греция. Развивающиеся рынки в Африке, Латинской Америке, Юго-Восточной Азии и на Ближнем Востоке показали умеренный рост с общим объёмом введённой мощности 4,5 ГВт.

В области морских установок, 2019 год также стал рекордным с введённым объёмом мощности 6,1 ГВт, что соответствует примерно 10% общемировой введённой мощности. Лидером в этой области была КНР с общим объёмом установок 2,3 ГВт. Соединённое Королевство остаётся лидером по общему уровню морских установок, насчитывая около трети от общемировой мощности 29,1 ГВт.

В отчёте отмечается неопределённость текущей ситуации с распространением вируса COVID-19, который может оказать влияние на развитие мировых рынков. Однако в целом в отчёте прогнозируется продолжение роста с оценкой объёма мощностей, которые будут введены в ближайшие 5 лет на уровне 355 ГВт, что

соответствует примерно 76 ГВт, вводимым каждый год, ежегодно из которых 15 ГВт будут приходиться на морские установки. Это позволит мощности морских установок достигнуть 20% от общемирового уровня.

Россия упоминается в отчёте один раз, в качестве рынка, в котором ожидается рост ветряной генерации благодаря нарастающей практике внедрения ветряных электростанций. Например, в России на постоянной основе действует Фонд развития ветроэнергетики, основными инвесторами которого являются АО «Роснано» и ОАО «Фортум», а основным технологическим партнёром – датская компания Vestas, один из мировых лидеров в производстве ветрогенераторов.

По материалам:

1. GWEC: Global Wind Report 2019
<https://gwec.net/global-wind-report-2019/>
2. Пресс-релиз GWEC
<https://gwec.net/gwec-over-60gw-of-wind-energy-capacity-installed-in-2019-the-second-biggest-year-in-history/>
3. Renewable Energy World: 2019 was the second-biggest year for wind energy capacity additions, GWEC says
<https://www.renewableenergyworld.com/2020/03/25/2019-was-the-second-biggest-year-for-wind-energy-capacity-additions-gwec-says/>
4. Фонд развития ветроэнергетики – Группа Роснано
<https://www.rusnano.com/projects/invest-fund/fve>