Основные проблемы и особенности измерения характеристик частичных разрядов в маслонаполненном трансформаторном оборудовании.

Монастырский А.Е.
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", E-mail: monalex@delfa.net

Надежность энергетических систем, работающих в последние годы в условиях большого количества оборудования с большим сроком эксплуатации или выработавшего нормативный ресурс, в значительной степени определяется уровнем диагностики. Своевременное выявление и устранение дефектов в таком оборудовании позволяет продлить срок службы старого, но работоспособного оборудования, снизить стоимость его ремонта, исключить аварийные отказы и в конечном итоге повысить надежность работы энергетической системы. Одним из наименее надежных элементов мощного высоковольтного энергетического оборудования является его изоляция. Диагностика изоляции энергетического оборудования основывается на измерении ряда физико-химических величин, характеризующих процессы, развивающиеся в изоляции (контрольных параметров), и анализе на основе полученных данных состояния изоляции. Наиболее эффективным методом контроля за состоянием изоляции высоковольтного энергетического оборудования является измерение характеристик частичных разрядов (ЧР). Преимущества этого метода состоит в возможности наиболее раннего обнаружения дефектов, его локации, выявлении характера и степени развития дефекта, прогнозировании времени его развития, и в конечном итоге возможности своевременного его устранения. Основной проблемой при измерении характеристик ЧР является отстройка от помех. В условиях лабораторий удается снижать уровень помех до величины 5 пКл и ниже, что является вполне достаточным для эффективной диагностики. Однако в условиях эксплуатации уровень помех на действующих подстанциях и распределительных устройствах станций достигает 1000 пКл и выше, что не позволяет выявлять частичные разряды, связанные с дефектами в работающем оборудовании. Для решения этой проблемы было предложено несколько путей, включающих использование таких характеристик ЧР как фазовые диаграммы, амплитудные спектры, измерение ЧР в области высоких (до 10^8 Гц) частот, где уровень помех существенно ниже, и др. Действительно для большого числа видов оборудования таких как силовые кабели, генераторы, элегазовое оборудование, к настоящему времени накоплены большие базы данных по видам дефектов и характеристикам ЧР с ними связанными. Исключение составляет трансформаторное оборудование, для которого пока не удается создать инженерные методики выявления дефектов по характеристикам ЧР. Причиной этого являются особенности процессов развития ЧР в

маслонаполненном трансформаторном оборудовании. Если для остальных типов оборудования длительность ЧР в процессе развития остается примерно постоянной и находится в диапазоне времени 10^{-8} –10^{-7} с, и при этих условиях измерения ЧР в области высоких частот оказывается корректным, то для маслонаполненного трансформаторного оборудования длительность ЧР в процессе развития дефекта увеличивается от единиц нс до единиц мкс, что может привести к значительным ошибкам в измерениях.

В настоящем докладе представлен анализ возможных схем измерения характеристик ЧР в силовых трансформаторах, выявлены причины получения значительных погрешностей при измерениях, даны корректные методы измерения. Для сравнения результатов измерения ЧР, проводимых в соответствии с IEC 60270 в диапазоне частот 10^4 – $2*10^6$ Гц, с высокочастотными измерениями – 10^6 –10^8 Гц была разработана расчетная схема замещения силового трансформатора на примере трансформатора ТРДЦН-63000/220, пригодная для машинного эксперимента по исследованию измерения характеристик ЧР в изоляции силовых трансформаторов (Рис.1).

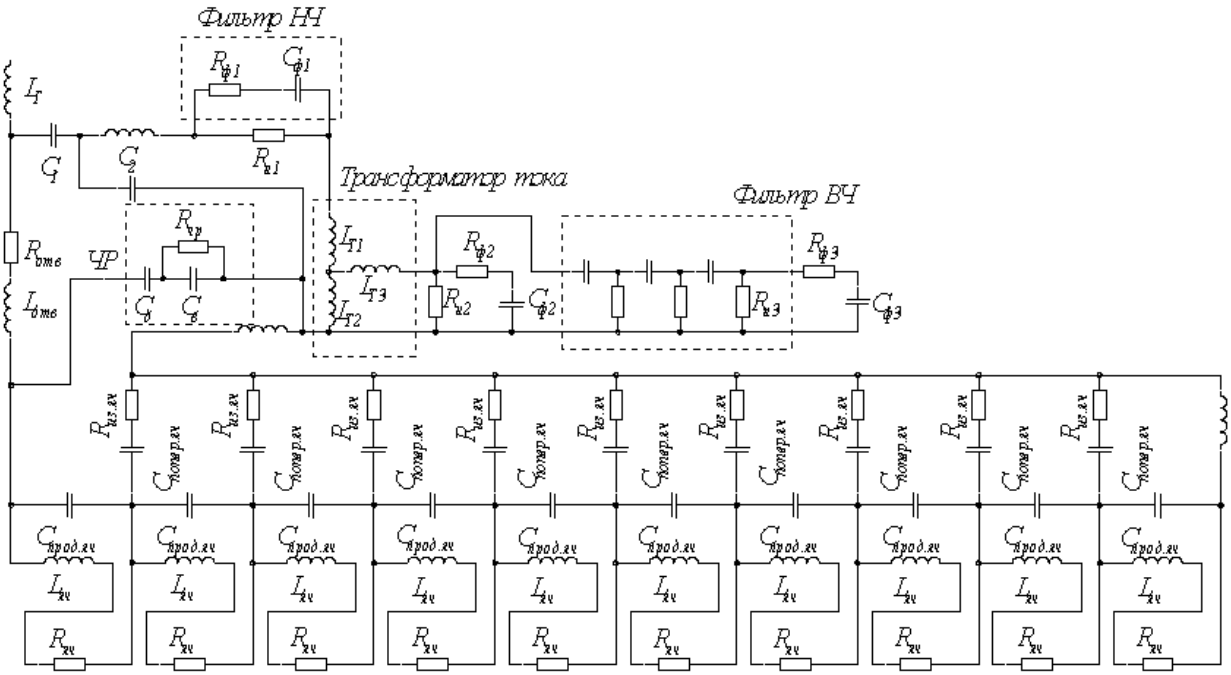


Рис.1.Расчетная схема замещения силового трансформатора.

Расчетная схема учитывала индуктивности и активные сопротивления элементов обмотки, продольные емкости (между катушками обмотки), емкости элементов обмотки на землю (магнитопровод и бак), емкости области возникновения ЧР (включения и диэлектрика, расположенного последовательно с включением), емкости проходного изолятора, параметры измерительных элементов. Для каждой из схем измерения исследовались два вида ЧР:

- с кажущимся зарядом $q_{ЧР}=10^{-7}$ Кл и малой длительностью $t_{ЧР}=10^{-8}$ с,

- с кажущимся зарядом $q_{ЧР}$=10-7 Кл и большой длительностью $t_{ЧР}=10^{-6}$ с.

Градуировка производилась при 2-х формах градуировочного импульса: с длительностью фронта $t_{фг}$=1 нс и 100 нс и при 2-х значениях верхней частоты полосы пропускания измерительного устройства $f_{max}=10^8$ Гц и $2\cdot10^6$ Гц. В процессе исследования определялось влияние следующих факторов:

· емкости, включенной параллельно входу измерительного устройства (подключение к последней $C_{2и}$=100пФ или предпоследней $C_{2и}$=10нФ обкладке ввода);

· длительности ЧР $t_{ЧР}$;

· диапазона частот измерительного устройства (верхней f_{max} и нижней f_{min} частоты полосы пропускания);

· длительности фронта градуировочного импульса $t_{фг}$.

Результаты расчетов, представленные в виде отношения измеренной в различных условиях, - $q_{ЧР}$ к реальной величине кажущегося заряда $q_{ЧР0}$ показаны в таблице.

Схема измерения		**$q_{ч.р}$ / $q_{ч.р.0}$**			
		$t_{ч.р.}=10^{-8}$ с		**$t_{ч.р.}=10^{-6}$ с**	
		$t_{ф.г.}$ 1 нс	**$t_{ф.г.}$ 100 нс**	**$t_{ф.г.}$ 1 нс**	**$t_{ф.г}$ 100 нс**
C_2 100 пФ	**f_{max} 10^8 Гц**	**0,05**	**0,32**	**0,01**	**0,067**
	f_{max} 2×10^6 Гц	**0,34**	**0,46**	**0,2**	**0,27**
C_2 10 нФ	**f_{max} 10^8 Гц**	**0,14**	**0,55**	**0,077**	**0,3**
	f_{max} 2×10^6 Гц	**0,42**	**0,45**	**0,41**	**0,43**

Анализ полученных результатов показал следующее. Измерение кажущегося заряда ЧР по амплитуде напряжения на достаточно большом измерительном сопротивлении (использовалось Rи = 1000 Ом) при использовании измерительного устройства с диапазоном частот, ограниченным f_{max} = $2\cdot10^6$ Гц, и градуировочного генератора с длительностью фронта импульса $t_{фг}$ =1…100 нс приводит к практически правильным значениям $q_{ЧР}$ Для правильного измерения кажущегося заряда ЧР следует использовать схему измерения, соответствующую ГОСТ 20074-83, основанную на измерении амплитуды напряжения на достаточно большом измерительном сопротивлении Rи порядка 100…1000 Ом при верхней частоте полосы пропускания измерительного устройства $f_{max}=2Ч\cdot10^6$ Гц; при этом длительность фронта и спада квазипрямоугольного импульса градуировочного генератора должна лежать в пределах 1…100 нс.

Использование измерительного устройства с широким диапазоном частот от 10^4 до 10^8 Гц и градуировочного генератора с длительностью фронта импульса 1 нс приводит к существенному занижению измеряемого $q_{ЧР}$: для коротких ЧР ($t_{ЧР}$ = 10^{-8} с) 10…20 раз, а для длинных ЧР ($t_{ЧР}$= 10^{-6} с) в 50…100 раз. Полученное занижение результатов измерения $q_{ЧР}$ объясняется влиянием индуктивности элементов схемы, которое значительно возрастает в

области частот $10^6 \ldots 10^8$ Гц. При этом основные ошибки при измерении $q_{ЧР}$ возникают вследствие завышения сигнала при градуировке схемы за счет возбуждения колебаний с частотой порядка $2 \cdot 10^7$ Гц в контуре, состоящем из входной емкости трансформатора, емкостей ввода и индуктивности отвода от градуировочного импульса, особенно, если импульс имеет фронт порядка 1 нс. Даже если длительность фронта градуировочного импульса увеличена до 100 нс, эти колебания возбуждаются начальной частью этого импульса при временах порядка 5-10 нс. За счет регистрации этих колебаний при полосе пропускания измерительного устройства с $f_{max} = 10^8$ Гц завышается амплитуда колебаний сигнала на измерительном сопротивлении при градуировке, что влечет за собой уменьшение масштабного коэффициента и занижение значения измеряемого $q_{ЧР}$. При измерении характеристик ЧР длительностью $t_{ЧР} = 10^{-6}$ с по току, протекающему во внешней цепи, с использованием ИУ с ограничением нижней частоты до 5 МГц в случае измерения заряда получено занижение $q_{ЧР}$ в 100…200 раз, а в случае измерения тока – в 500…1000 раз. Это объясняется тем, что при использовании измерительного устройства с ограничением нижней частоты $f_{min} = 5 \cdot 10^6$ Гц практически не регистрируется низкочастотная составляющая тока мощных ЧР. Кроме того, в рабочем диапазоне частот $10^6 \ldots 10^8$ Гц значительно сказывается влияние индуктивности элементов цепи, приводящее к возникновению высокочастотных колебаний, особенно при градуировке.

Применение высокочастотных схем измерения кажущегося заряда ЧР, использующих диапазон частот $5 \cdot 10^6 \ldots 10^8$ Гц и более и основанных на измерении тока или заряда, протекающих в ветви внешнего контура (соединительной емкости или ввода трансформатора) в ряде случаев не позволяют корректно измерять кажущийся заряд ЧР. Причем по мере развития дефекта и увеличения длительности ЧР измеряемые в этом частотном диапазоне величины кажущегося заряда снижаются, что создает иллюзию затухания процесса, тогда как на самом деле процесс продолжает развиваться и приводит к повреждению трансформатора. Для разработки методики пересчета результатов измерений, полученных по высокочастотной схеме, на единицы кажущегося заряда ЧР (кулоны), то есть на аналогичный результат измерений по ГОСТ 20074-83, должно быть проведено специальное сравнение результатов измерений по указанным выше двум типам схем для определения соответствующих пересчетных коэффициентов.

Для выявления развивающихся дефектов хорошие результаты дает анализ амплитудных спектров ЧР. На рис.2 приведены дифференциальные амплитудные спектры крупномасштабных моделей обмотки трансформатора с искусственно заложенным дефектом в виде ползущего разряда по мере его ускоренного развития на 5ой, 30ой и 55ой минутах. Как видно из рис.2 дефект имеет характерные экстремумы, определенным образом меняющиеся в процессе развития. Аналогичные спектры были получены для таких видов дефектов как пробой масляного канала, разряд в масляном клине, разряд по

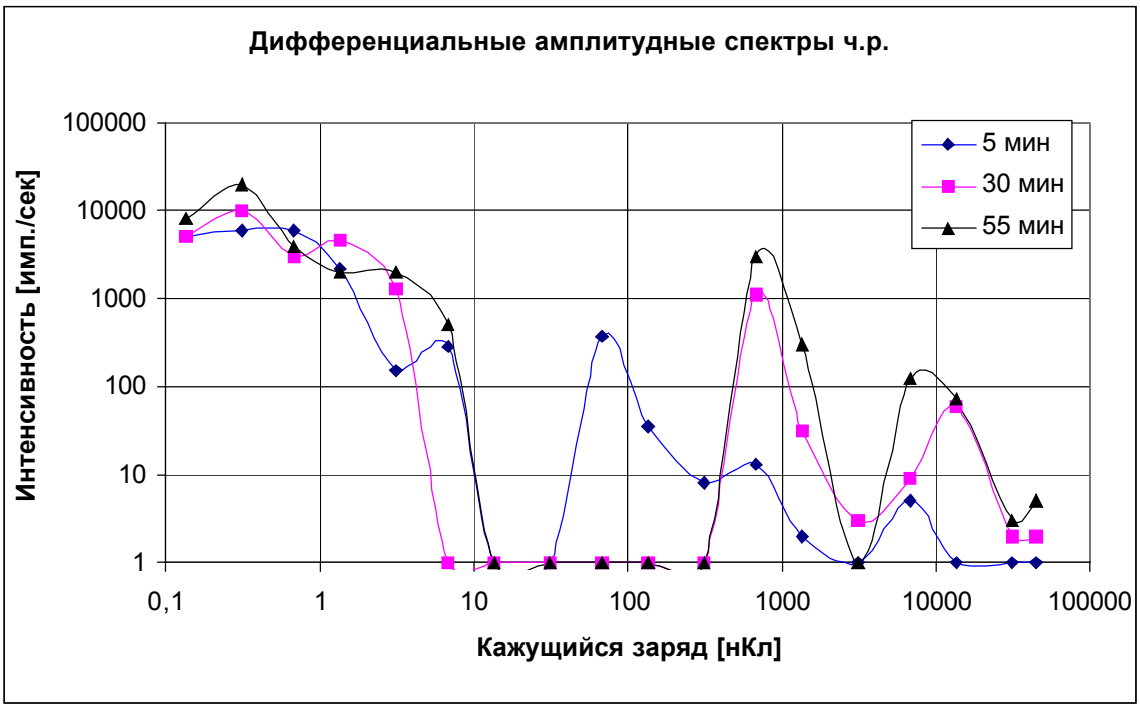


Рис.2. Вид дифференциальных амплитудных спектров ЧР.

поверхности картонного барьера. Достоинством метода амплитудных спектров является возможность выявления дефектов не выделяя сигналы ЧР в них из общего спектра импульсных сигналов, включающего помехи. Таким же достоинством обладает и метод фазовых диаграмм, хорошо зарекомендовавший себя при диагностике кабелей, электрических машин, элегазового оборудования. К сожалению для трансформаторного оборудования пока еще отсутствуют достаточные данные по видам фазовых диаграмм для характерных видов дефектов.

Использование этих методов для выявления дефектов в трансформаторах в условиях эксплуатации затрудняется высоким уровнем периодических высокочастотных сигналов помех. На рис.3 показан вид сигнала, получаемого с помощью измерителя ЧР за период промышленной частоты. Там же показаны эти сигналы, развернутые во времени (2 мс/дел, 20 мкс/дел, 2,35 мкс/дел). Как видно из рис.3, выделить импульсные сигналы из периодических оказывается затруднительно, поскольку их амплитуды соизмеримы, а частотные спектры достаточно близки. Пример использования фильтров показан на рис.4. Первая осциллограмма представляет собой исходный сигнал, а остальные – фильтрацию исходного сигнала с помощью фильтра верхних частот с порогами соответственно 100, 500 и 1000 кГц. Как видно из рис.4 использование фильтра позволяет несколько увеличить отношение уровней "Сигнал-Шум", однако существенного выигрыша не получается, и, кроме того, искажается форма импульсов ЧР (см. рис.5), причем меняется как форма импульса, так и длительности фронта и импульса, т.е. параметры важные для диагностики.

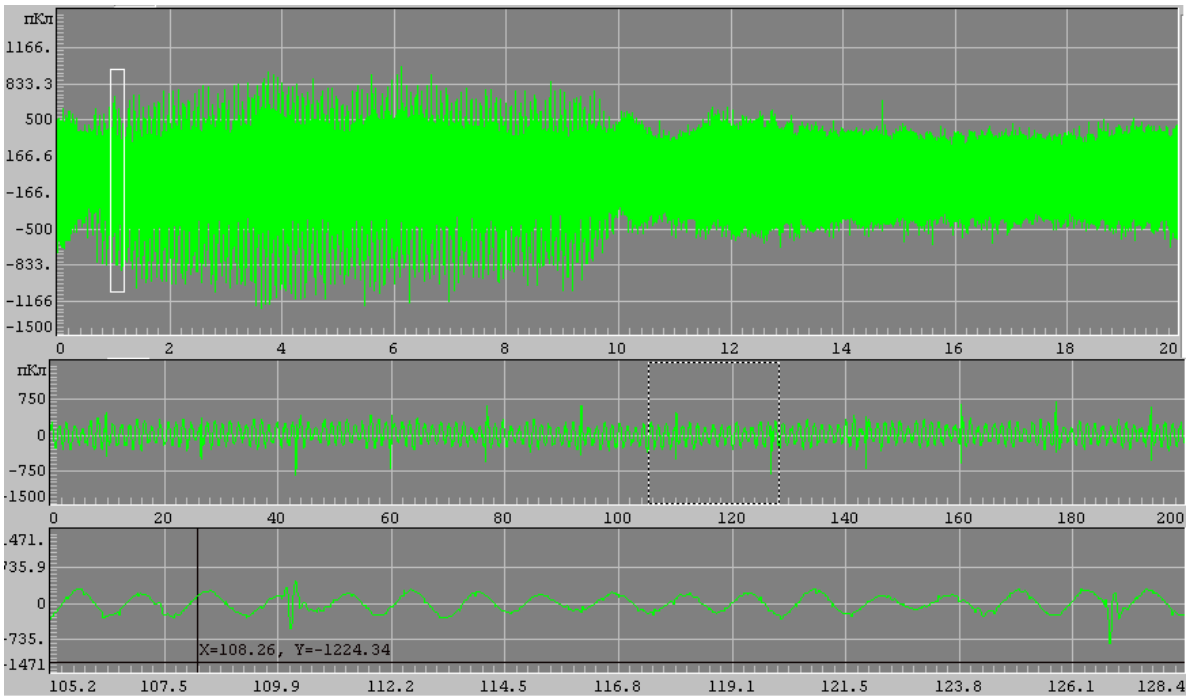
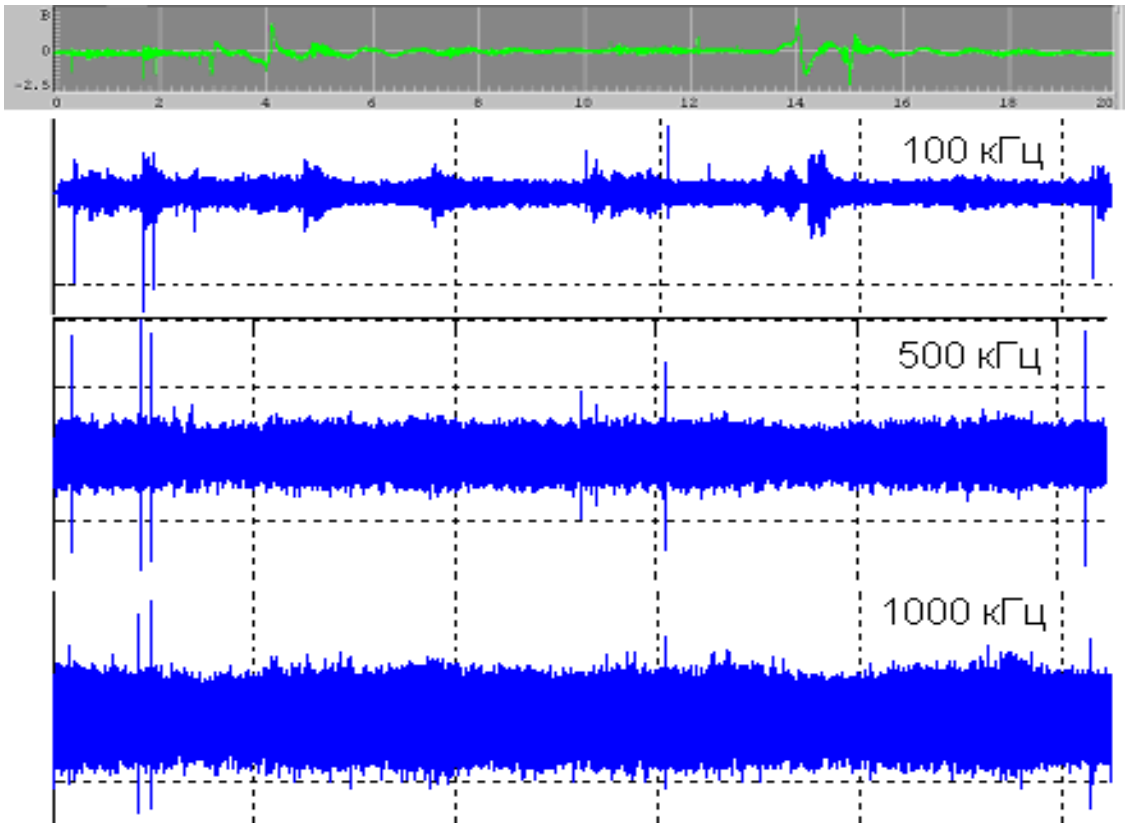


Рис.3. Осциллограмма высокочастотных сигналов за период промышленной частоты и фрагменты ее (в светлых прямоугольниках), развернутые во



времени.

Рис.4. Исходная осциллограмма ВЧ сигналов за период промышленной частоты и осциллограммы, полученные с использованием соответствующих фильтров

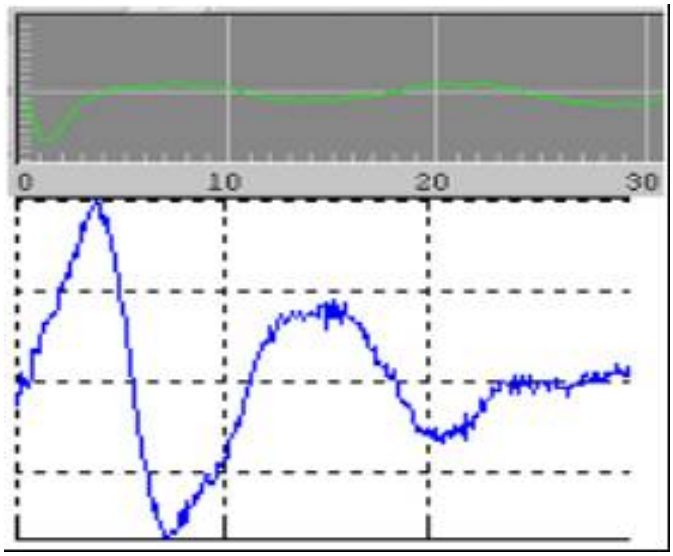


Рис.5. Изменение формы импульса после фильтра

Таким образом, использование фильтров в принципе возможно, но должно реализовываться не на аппаратном уровне при измерениях, а при обработке полученных осциллограмм. В некоторых случаях для выделения импульсных сигналов из периодической составляющей оказывается полезным использование вейвлетного преобразования. Несмотря на те же недостатки, что и при использовании фильтров, вейвлетное преобразование позволяет на порядок и более увеличить отношение уровней "Сигнал-Шум".

Основной проблемой при измерении частичных разрядов в трансформаторном оборудовании в эксплуатации является отстройка от внешних помех, которые на действующих подстанциях могут достигать уровня 10^{-8} Кл. Для решения этой проблемы при измерениях ЧР в трансформаторах непригодным оказывается достаточно эффективный для других видов оборудования метод использования высокочастотных схем измерения, поскольку в силу изменения длительности импульсов ЧР в трансформаторном оборудовании дает существенное занижение величины кажущегося заряда, причем для наиболее опасных длинных импульсов. Для выделения импульсов ЧР из импульсных сигналов помех могут использоваться методы анализа амплитудных спектров ЧР, анализ фазовых диаграмм и их развитие. Для отстройки от периодических помех могут использоваться частотные фильтры, а в некоторых случаях вейвлетное преобразование. Следует помнить, что и тот и другой метод могут привести к искажению и даже потере сигналов ЧР, что исключает использование их на аппаратном уровне. Эти методы могут применяться только на стадии обработки и анализа измерительной информации.