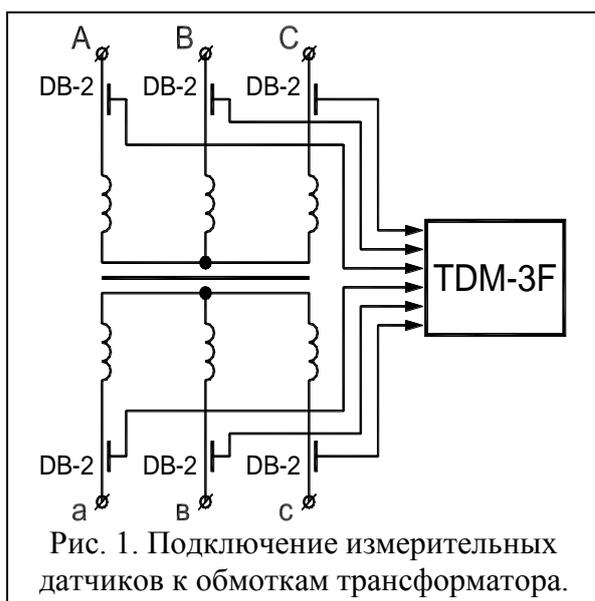


Техническое описание прибора TDM-3F.

Измерение частичных разрядов в трансформаторном оборудовании при помощи прибора марки TDM-3F

Стационарный прибор марки «TDM-3F» предназначен для непрерывного мониторинга и оперативной диагностики технического состояния изоляционных подсистем силовых трансформаторов. Первичной информацией, на основании которой в приборе производится оценка технического состояния и поиск дефектов изоляции вводов и обмоток, являются частичные разряды и токи проводимости высоковольтных вводов, как с изоляцией «бумага – масло», так с твердой RIP изоляцией.



Основой для работы этого прибора является использование универсального датчика, монтируемого на измерительном выводе высоковольтного трансформаторного ввода. Универсальность датчика заключается не только в том, что в нем смонтированы две защиты измерительного вывода ввода, от импульсных перенапряжений, и от обрыва соединительного кабеля. Универсальность заключается еще в том, что на его выходе присутствуют сигналы трех типов, представляющие практический интерес для оценки технического состояния силового трансформатора. Это:

- Токи проводимости изоляции вводов, величина которых может достигать 0,1 А, имеющие промышленную частоту.

- Высокочастотные импульсы сигналов от частичных и коронных разрядов, имеющие амплитуду до 10 В, и частоту до 100 МГц.

- Сверхвысокочастотные импульсы сигналов от частичных разрядов, имеющие амплитуду до 10 В, и частоту от 300 МГц до 1 ÷ 2 ГГц.

Наличие универсального первичного датчика марки DB-2 позволяет создавать комплексные системы мониторинга и диагностики, оптимальные по своим функциям и стоимости. Для этого внутри прибора системы мониторинга, при помощи специальных фильтров, сигналы разделяются, и используются для работы различных диагностических подсистем.

Рассмотрим особенности работы этих оригинальных диагностических подсистем, комплексно реализованных в приборе марки TDM-3F.

Измерение частичных разрядов в изоляции трансформатора.

Это, наверное, один из самых сложных вопросов, который необходимо решать при создании систем диагностического мониторинга силовых трансформаторов. Сама процедура регистрации высокочастотных импульсов в трансформаторе может быть реализована достаточно просто, это только технические вопросы. Основная сложность заключается в фильтрации импульсов частичных разрядов, в исключении из последующего анализа импульсов помех, которых обычно в трансформаторах очень много.

Очень сложно, технически и алгоритмически, так организовать работу систем регистрации частичных разрядов и отстройки от помех, чтобы остаточный уровень помех не превышал 10 ÷ 20%. Для этого необходимо использовать самые современные

технические и алгоритмические средства. Только в этом случае можно получать максимально достоверные диагностические заключения.

Очень важным является то, что при внедрении систем мониторинга частичных разрядов в трансформаторах необходимо максимально и обоснованно снижать общий уровень недоверия практических специалистов к работе таких систем. Это недоверие исторически сложилось в отечественной практике диагностики трансформаторного оборудования благодаря «деятельности» некоторых отечественных фирм, производящих и использующих измерительную технику низкого качества.

В приборе TDM-3F реализована уникальная схема отстройки от импульсов коронных разрядов, интенсивность которых в высоковольтных трансформаторах обычно на порядки превышает интенсивность частичных разрядов, что снижает достоверность работы обычных приборов до недопустимо низкого уровня. Принцип действия этой схемы отстройки от импульсных помех иллюстрируется при помощи рисунка 2., на котором приведена функциональная схема работы прибора.

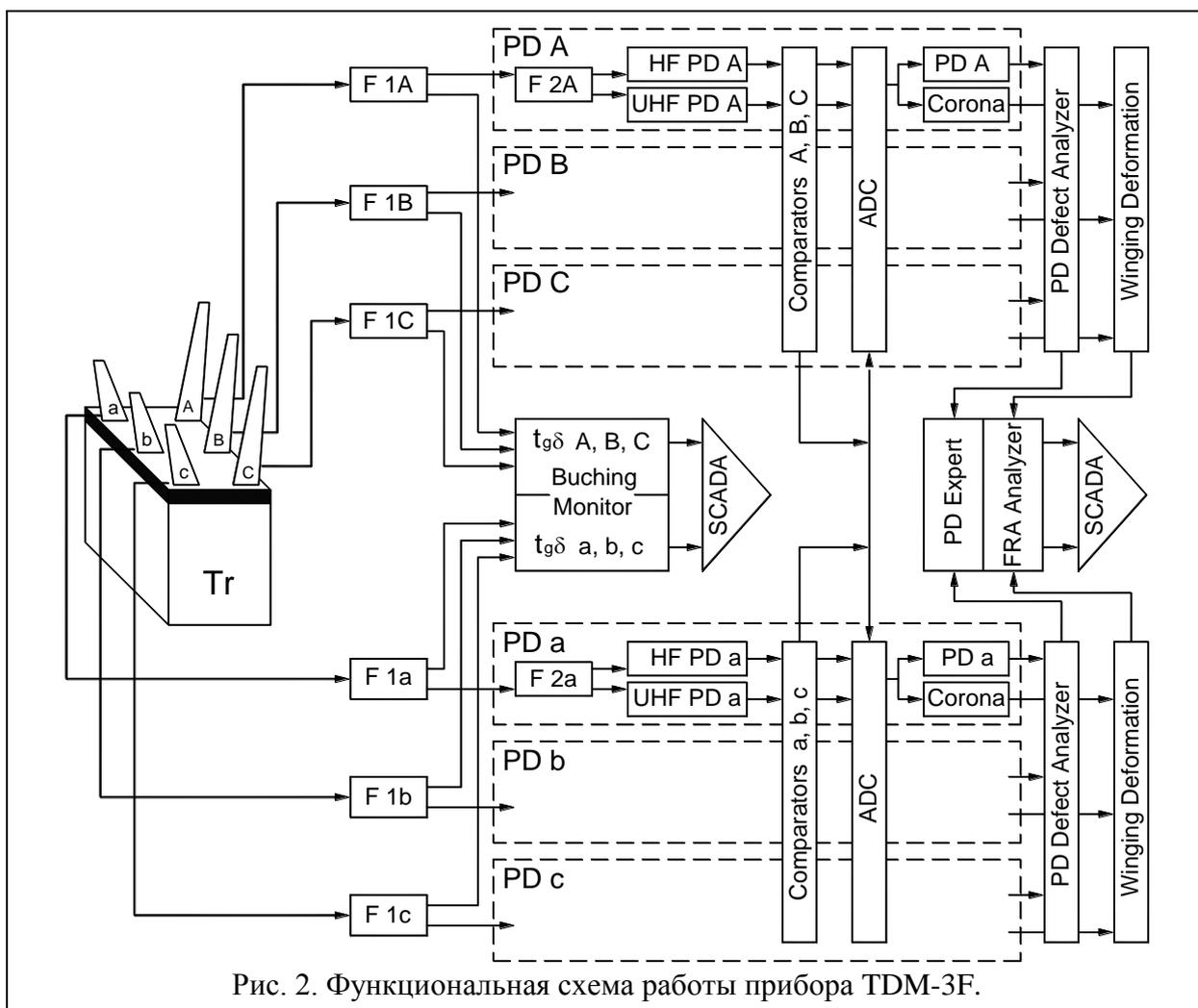


Рис. 2. Функциональная схема работы прибора TDM-3F.

В фильтре F1, который устанавливается на входе каждого из 6 измерительных каналов прибора, производится разделение токов проводимости вводов, имеющих промышленную частоту, и импульсных высокочастотных сигналов. Токи проводимости изоляции вводов используются в подсистеме контроля технического состояния высоковольтных вводов, а высокочастотные импульсы подаются на следующий фильтр F2, где происходит разделение входных импульсов по частоте на две группы, высокочастотные, и сверхвысокочастотные. Высокочастотные импульсы (HF), имеющие частоту до 20 МГц, подаются в один измерительный канал, а сверхвысокочастотные

импульсы (UHF), с частотой 0,3 – 1,5 ГГц, подаются в другой измерительный канал прибора.

Такие нестандартные диапазоны частот для двух измерительных каналов прибора TDM-3F, применительно к трансформаторному оборудованию, выбраны по нескольким техническим причинам.

Во-первых, это конечно связано с особенностями возникновения частичных разрядов в трансформаторном оборудовании. Трансформатор является сложным электромагнитным аппаратом, обладающим значительными габаритными размерами, поэтому «из трансформатора», наружу, к измерительным датчикам, без значительного затухания, распространится только сравнительно низкочастотные импульсы, с частотой не более 10 – 15 МГц. Именно из этого условия выбраны частотные параметры основного измерительного канала HF каждой фазы прибора.

Во-вторых, импульсы коронных разрядов, являющиеся помехами, также ограничены по частоте. Импульсы от коронных разрядов, на положительной волне приложенного рабочего напряжения, из-за своей сравнительно большой мощности, обычно располагаются в диапазоне частот до 100 МГц. Обычно, чем мощнее импульс, тем ниже его частота. Импульсы коронных разрядов, возникающие на отрицательной полуволне питающего напряжения, имеют существенно меньшую мощность, в результате их максимальная частота заметно выше, и может располагаться в диапазоне частот даже до 300 МГц. Таким образом, если мы хотим гарантированно исключить из регистрации импульсы коронных разрядов, то «чистый канал» регистрации частичных разрядов должен работать в диапазоне частот от 300 МГц и выше.

Тут важным становится методический аспект данной проблемы. Мы можем уверенно регистрировать импульсы частичных разрядов в диапазоне UHF, отстраиваться от практически любых помех, но в этом диапазоне мы не можем правильно определить уровень зарегистрированных частичных разрядов, т. е. мы не можем корректно определить их амплитуду, соответственно правильно оценить опасность выявленного дефекта.

Причина этого проста. При регистрации сигналов в диапазоне UHF мы используем, в основном, электромагнитные пути распространения сигналов, регистрируя электромагнитное излучение от частичного разряда. Соответственно мы не можем правильно откалибровать измеряемые импульсы по амплитуде, привести их к размерности заряда по нескольким причинам. Мы можем инжектировать внутрь трансформатора тестовые электромагнитные импульсы, а также не знаем удаление зоны дефекта от нашего датчика, не знаем величину внутреннего затухания.

Возникший парадокс выглядит следующим образом. Можно хорошо регистрировать импульсы частичных разрядов в UHF диапазоне частот, но нельзя провести их метрологическую оценку. И наоборот, можно хорошо калибровать импульсы в HF диапазоне частот, но здесь очень низка помехозащищенность всей процедуры регистрации импульсов частичных разрядов.

В приборе TDM-3F реализована концепция синхронной, одновременной, регистрации импульсов частичных разрядов в двух диапазонах частот, HF и UHF. Для этого используется сигнал с одного универсального входного датчика, но он разделяется на две составляющие при помощи частотно зависимого фильтра F2, каждая из которых усиливается и измеряется в своем канале.

Алгоритм верификации входных импульсов, при двухканальной регистрации сигналов, следующий. Если высокочастотный импульс одновременно зарегистрирован в двух измерительных каналах, работающих в разных диапазонах частот, значит это импульс от частичного разряда, и его необходимо использовать для анализа состояния изоляции трансформатора. Калибровка этого импульса производится по каналу HF.

Если же высокочастотный импульс от первичного датчика регистрируется только в канале HF, а в канале UHF импульс отсутствует, то это, скорее всего, коронный разряд,

не имеющий отношения к диагностике состояния изоляции, или помеха другой причины возникновения, например, пришедшая из сети. Такой импульс может быть использован только для анализа деформаций обмоток трансформатора, возникающих после воздействия электродинамических нагрузок на обмотки.

Метод регистрации импульсов в двух диапазонах частот - это только первый, хотя и самый мощный, инструмент борьбы с высокочастотными помехами, вносящими погрешность в диагностику состояния высоковольтной изоляции силовых трансформаторов. В приборе TDM-3F реализованы еще несколько других диагностических методов, позволяющих еще больше снизить влияние внешних помех.

К таким диагностическим методам можно отнести:

- Метод амплитудного сравнения синхронно зарегистрированных в нескольких фазах трансформатора сигналов, с целью выявления первичных импульсов частичных разрядов от дефектов, и импульсов, наведенных в рядом расположенных фазах трансформатора. Такие вторичные импульсы обычно имеют пониженную амплитуду.

- Очень эффективным методом отстройки от помех является метод анализа времени прихода одного и того же импульса к нескольким измерительным датчикам, установленным в разных местах трансформатора. В литературе этот метод часто называют «time of arrival». Принцип работы этого метода прост, чем дальше от места возникновения импульса находится измерительный датчик, тем позже к нему придет электромагнитный импульс. Временное разрешение в приборе TDM-3F таково, что он может определить разницу в удалении нескольких датчиков от зоны дефекта с точностью не хуже 0,5 метра, что вполне достаточно для целей общей локации.

- Полярность первого пика в зарегистрированных сигналах также является диагностическим признаком, при помощи которого можно уменьшить влияние импульсных помех. Например, импульс от коронного разряда, возникшего на фазе «А», будет иметь разную полярность по фазам. Полярность импульса на фазе «А» будет отличаться по знаку от полярности импульсов на фазах «В» и «С». Если же мы будем регистрировать импульс от дефекта внутри трансформатора, то во всех трех фазах трансформатора полярность импульсов будет одинаковой.

Корректная регистрация импульсов частичных разрядов – это только первая часть диагностики технического состояния высоковольтной изоляции. Основным вопросом, который эксплуатационный персонал задает практическим диагностам, обычно является вопрос об опасности выявленных частичных разрядов. В случае применения системы мониторинга частичных разрядов, эксплуатационный персонал ожидает ответа на этот важный вопрос от экспертной системы, которая должна входить в программное обеспечение системы.

В состав программного обеспечения прибора TDM-3F входит автоматизированная экспертная система PD-Expert, целью работы которой является выявление типа дефекта в изоляции, и оценка степени его развития. В этой экспертной системе, при помощи диаграмм распределения частичных разрядов, таких как TFM (время – частотное распределение импульсов) и FRPD (амплитудно – фазо – частотное распределение импульсов), формируется образ дефекта, его диагностические признаки. Далее производится сравнение образа выявленного дефекта с имеющейся базой стандартных образов дефектов в изоляции, и принимается решение о типе дефекта в изоляции контролируемого трансформатора.

Благодаря этому определяется не только тип дефекта и степень его развития, а поскольку PD-Expert работает в составе системы мониторинга, автоматически определяется скорость его развития. Информации такого объема обычно достаточно для принятия обоснованного решения о возможности дальнейшей эксплуатации изоляции контролируемого высоковольтного оборудования.

Мониторинг наличия деформаций обмоток.

Для контроля нарушений формы обмоток, возникающих после воздействия электродинамических усилий от сквозных токов короткого замыкания, в режиме on-line, т. е. под рабочим напряжением, могут быть применены те же методы, что и для контроля этого параметра в режиме off-line.

- Метод низковольтных импульсов, когда в одну обмотку трансформатора инжектируется прямоугольный импульс, а во второй обмотке этой фазы, но другого напряжения, регистрируется частотный отклик от этого импульса. Практическое применение этого метода в режиме on-line усложнено необходимостью инжектировать в измерительный отвод ввода трансформатора импульсы большой энергии. Это обусловлено тем, что сам ввод трансформатора является емкостным делителем, и через измерительный вывод непосредственно в трансформатор «попадает» не более 10 – 20% энергии инжектируемого импульса.

- Метод SFRA, когда в одну обмотку трансформатора инжектируются колебания различных частот, а в другой обмотке определяется сигнал, наведенный по путям электромагнитного путям рассеяния. Использование этого метода в режиме on-line требует использования генераторов переменной частоты с мощностью около 1 кВт, что даже может представлять опасность для самого ввода.

По сути своей эти два метода диагностики деформаций обмоток трансформатора очень близки, и различаются только способом получения передаточной функции обмоток. Выявление нарушений формы обмоток производится сравнением передаточных функций по фазам, относительно друг друга, или относительно опорной передаточной функции, зарегистрированной на трансформаторе раньше, в бездефектном состоянии.

В приборе TDM-3F для мониторинга деформаций обмоток работающих трансформаторов реализован оригинальный метод PRA (Pulse Response Analysis). Метод является on-line модификацией метода низковольтных импульсов.

Основное отличие метода PRA, от исходного метода низковольтных импульсов, заключается в способе инжектирования тестовых импульсов в обмотки трансформатора, и в типе этих импульсов. В методе PRA, в качестве тестовых импульсов, используются импульсы от коронных разрядов, практически всегда имеющие место в высоковольтных шинах трансформаторных подстанций, особенно на стороне высокого напряжения. Эти импульсы постоянно инжектируются в обмотки трансформатора через высоковольтные вводы. Необходимо их только зарегистрировать и правильно проанализировать.

В методе PRA, для определения частотных передаточных функций обмоток трансформатора, также возможно использование высокочастотных коммутационных и грозовых импульсов. Такими разработками занимаются специалисты нескольких известных фирм. Однако практическое применение коммутационных импульсов для мониторинга деформаций обмоток трансформатора сопряжено с большими методическими и техническими сложностями:

Во-первых, эти коммутационные импульсы должны возникать рядом с трансформатором, поэтому на практике они достаточно редки, и ожидать их приходится часто очень долго. Очень часто также не удается получить технологические и режимные условия, позволяющие сравнивать передаточные функции. Про периодичность следования грозовых импульсов можно даже ничего не говорить.

Во-вторых, время возникновения коммутационных импульсов никак не связано с фазой питающего напряжения, что вносит заметную погрешность в определение частотных параметров обмоток. Поэтому, в каждую коммутацию переходные процессы в каждой фазе трансформатора протекают по-разному, в зависимости от момента коммутации. Сравнить полученные таким образом передаточные функции обмоток фаз трансформатора между собой иногда бывает очень сложно.

В-третьих, при воздействии на трансформатор мощных высокочастотных импульсов, например, возникающих при коммутации элегазовых выключателей, внутри

трансформатора возникают локальные резонансы, иногда весьма интенсивные. Непредсказуемое наличие, или отсутствие таких нестационарных резонансов внутри трансформатора, связанное с амплитудой и фазой коммутационного импульса, также искажает передаточные функции фаз.

По этим причинам более предпочтительным для диагностики деформаций обмоток является использование импульсов коронных разрядов. Применение этих импульсов дает преимущества по следующим причинам:

- Этих импульсов всегда очень много, что очень удобно для использования статистических методов, повышающих точность определения передаточных функций для обмоток фаз трансформатора. Импульсы коронных разрядов возникают примерно в одно, и тоже время, относительно синусоиды питающего напряжения, обычно вблизи положительного максимума питающего напряжения. Это также способствует повышению точности.

- Параметры импульсов коронных разрядов примерно одинаковы при одинаковых погодных условиях, поэтому всегда можно из всего многообразия зарегистрированных

первичных импульсов подобрать похожие, по амплитуде и фазе возникновения.

Импульсы коронных разрядов, проходя внутри трансформатора из первичной обмотки во вторичную обмотку, достаточно сильно затухают, уменьшаясь по амплитуде примерно на порядок. Тем не менее, чувствительности первичных датчиков и комплекса регистрирующей аппаратуры системы TDM-3F вполне достаточно для надежной фиксации формы «входного» и «выходного» импульсов в каждой фазе трансформатора.

Поскольку импульсов коронных разрядов в высоковольтном оборудовании обычно очень много, их количество может достигать сотен,

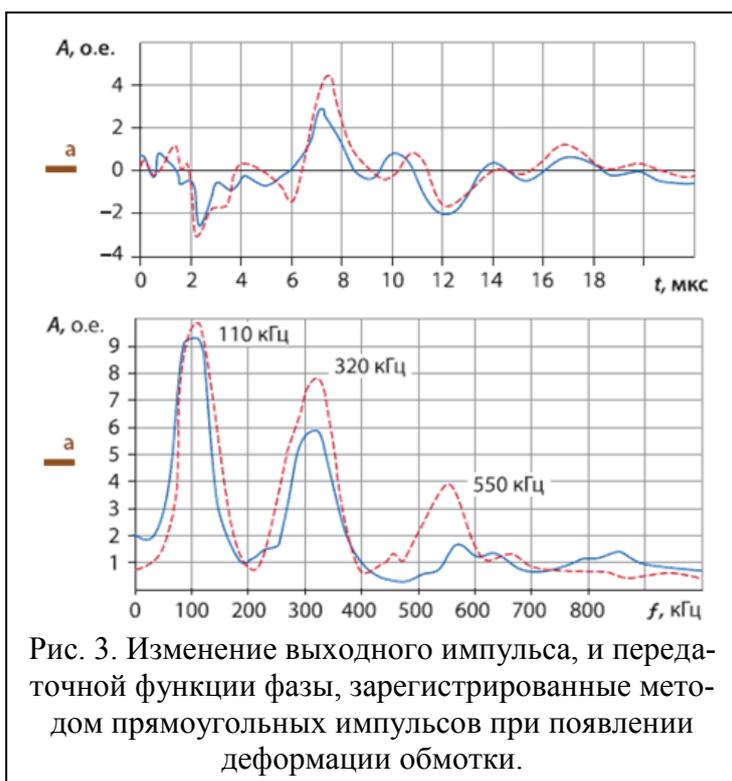


Рис. 3. Изменение выходного импульса, и передаточной функции фазы, зарегистрированные методом прямоугольных импульсов при появлении деформации обмотки.

и даже тысяч в секунду, то имеется возможность подбора «примерно одинаковых» по форме и амплитуде импульсов, что повышает точность построения частотной передаточной функции фаз за счет использования возможностей статистических методов. Все высокочастотные импульсы с датчиков записываются в память модуля, поэтому всегда имеется возможность проведения дополнительного уточняющего анализа, «подбирая» необходимые импульсы.

Для повышения точности расчетов системой мониторинга TDM регистрируются технологические параметры, необходимые для проведения корректной диагностики деформаций обмоток. Это текущее положение РПН, нагрузка трансформатора, температура бака трансформатора в момент проведения измерений. В наибольшей мере на форму передаточной функции оказывает положение РПН, если он есть в трансформаторе.

Сравнение передаточных функций фаз, и выявление отличий, обусловленное наличием деформаций обмоток трансформатора, возникших после протекания сквозных

токов короткого замыкания через трансформатор, производится в методе PRA обычным образом, так, как это принято в методе низковольтных импульсов.

Использование модифицированного диагностического модуля марки TDM-3F дает возможность практически решать еще одну, очень важную диагностическую задачу, возникающую в процессе эксплуатации трансформаторов. Проблема заключается в анализе внутренних резонансных процессов в крупных силовых трансформаторах, возникающих при воздействии мощных коммутационных импульсов. Особенно остро этот вопрос встает при коммутации нагрузки трансформаторов элегазовыми и вакуумными выключателями, создающими крутые коммутационные фронты.

При помощи прибора TDM-3F может быть произведена регистрация и анализ «входного» и «выходного» высокочастотных импульсов на обмотках трансформатора одной фазы, обусловленных мощным коммутационным импульсом. Контролируется любое движение коммутационных импульсов внутри трансформатора, как в направлении ВН → НН, так и в направлении НН → ВН. Любой резонансный процесс внутри трансформатора всегда проявляется в сигнале с «выходной» обмотки трансформатора. Появление в «выходном сигнале» фазы дополнительных импульсных, и апериодически затухающих процессов, говорит о наличии и параметрах внутренних резонансов в трансформаторе.

Мониторинг состояния изоляции вводов.

При помощи прибора TDM-3F решаются две основные задачи мониторинга состояния высоковольтных трансформаторных вводов – выполняется диагностика дефектов изоляции ввода на ранних стадиях развития, а также осуществляется защита трансформатора от аварийных режимов ввода.

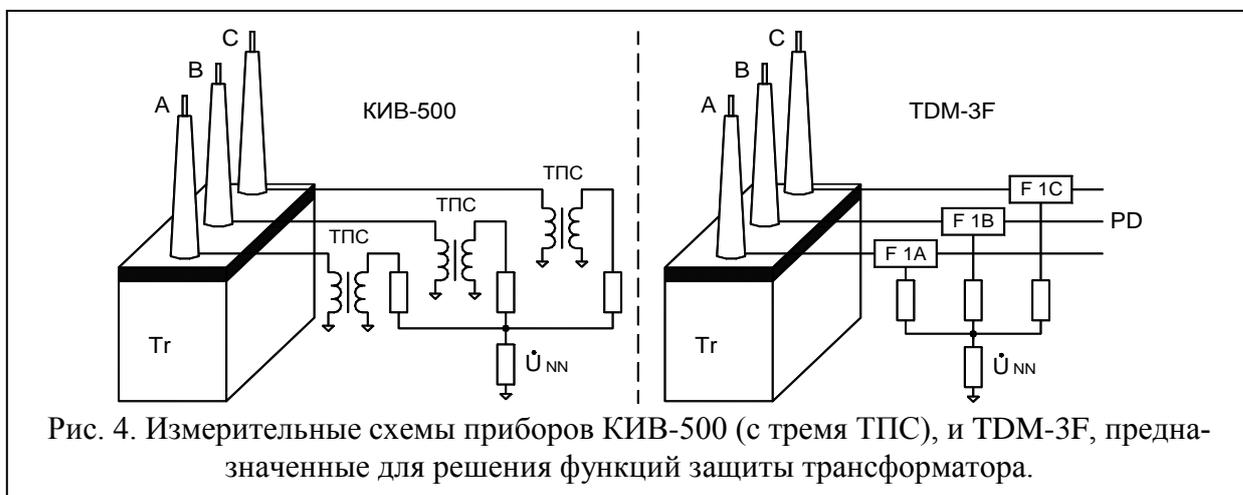


Рис. 4. Измерительные схемы приборов КИВ-500 (с тремя ТПС), и TDM-3F, предназначенные для решения функций защиты трансформатора.

Измерение небаланса токов проводимости вводов в приборе TDM-3F осуществляется аналогично прибору КИВ-500, что хорошо видно из рисунка 4.

Необходимо хорошо понимать, что схема для защиты трансформатора обязательно должна работать на сравнении величин тока проводимости вводов в трех фазах трансформатора. Только увеличение (!) тока одного из вводов может сказать о возникновении внутри изоляции ввода необратимых изменений – перекрытии обкладок. Только в этом случае нужно предпринимать меры по предотвращению лавинообразного пробоя изоляции ввода, и отключать трансформатор.

Сбалансированная измерительная схема оптимальна для надежной работы защиты трансформатора, позволяющая автоматически скомпенсировать влияние температуры на величину векторов токов проводимости вводов. Это температурное влияние имеет два аспекта, с одной стороны изменяется величина тангенса угла потерь изоляции, с другой изменяется сама величина емкости C_1 ввода.

Единственным недостатком этой измерительной схемы является то, что она чувствительна к колебаниям векторов трехфазной системы напряжений, однако этот параметр не является критичным. В узлах энергосистемы, где обычно стоят мощные силовые

трансформаторы, колебания этих векторов редко превышают один процент. С учетом того, что при 40 изолирующих обкладках во вводе (это средняя цифра для ввода с рабочим напряжением 500 кВ), увеличение тока проводимости при замыкании одной обкладки составит уже 2,5 процента. Более того, тревожный порог срабатывания защиты составляет обычно 4-5%, поэтому небаланс трехфазных векторов обычно не оказывает значительного влияния на работу системы защиты трансформатора.

Контроль величин тангенсов угла потерь всех трех вводов, насколько бы данная идея не казалась привлекательной, всегда менее информативен. Как точно бы мы не измеряли величину тангенса угла потерь, мы не увеличим информативность работы диагностической части системы мониторинга, а тем более функции защиты трансформатора, рассчитанной для работы с вводами различного типа. Все дело в том, что и у «плохого ввода» бывает «хороший тангенс», когда зона дефекта в изоляции перекрывается зоной пробоя между обкладками, что происходит всегда при развитии дефекта в изоляции, рано или поздно.

По этой причине имеющаяся в литературе дискуссия о том, каким методом лучше измерять тангенс угла потерь в изоляции ввода, абсолютным или компенсационным, носит больше научный характер, а на практике оба этих метода имеют примерно одинаковую погрешность. Большая же трудоемкость измерения «истинного» тангенса потерь изоляции ввода, как схемотехническая, так и алгоритмическая, работает на этот диагностический метод со знаком минус.

С учетом того, что балансная схема сравнения токов проводимости вводов уже используется в приборах КИВ-500 и TDM-3F в системе защиты трансформатора, то и для измерения тангенса угла потерь следует воспользоваться ею. При необходимости, при помощи прибора TDM-3F, можно также проводить и измерения истинного тангенса угла потерь в изоляции ввода, но использование этого метода не дает никаких преимуществ для диагностики дефектов изоляции.

Встроенная в прибор TDM-3F экспертная диагностическая система, ориентированная на контроль изоляции вводов, позволяет на ранних стадиях выявлять следующие проблемы, возникающие в высоковольтных вводах:

- Определять повышенное содержание влаги в изоляции ввода по наличию температурной зависимости напряжения небаланса от температуры трансформатора. Эта функция важна для проверки отсутствия дефектов на момент первичной балансировки входных цепей прибора.

- При помощи взаимной синхронизации нескольких приборов, смонтированных на одной подстанции, имеется возможность реализовывать сравнительную схему определения дефектного ввода, сравнивая параметры вводов, смонтированных на разных объектах, но в одинаковой фазе питающей сети.

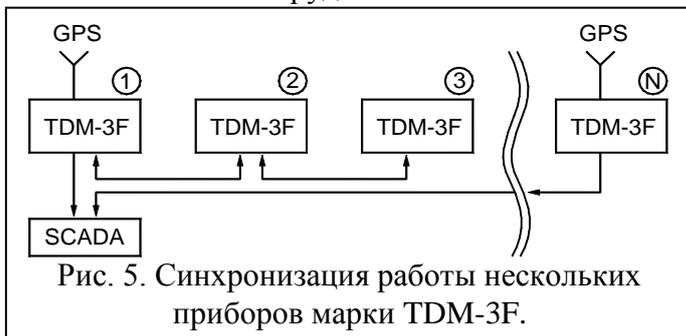
- При помощи экспертной системы всегда имеется возможность однозначно определять фазу трансформатора, во вводе которой произошло изменение тангенса угла потерь изоляции.

- Экспертная система позволяет непрерывно контролировать изменение величины емкости C_1 ввода, происходящее при замыкании одной или нескольких обкладок внутри остова ввода.

Средства локальной и глобальной синхронизации прибора TDM-3F.

Прибор TDM-3F сразу же разрабатывался не как локальная система диагностического мониторинга отдельного силового трансформатора, а как элемент глобальной системы Smart Grid, подразумевающей информационное интегрирование информации от локальных систем мониторинга, смонтированных на оборудовании единой технологической цепи передачи и распределения электрической энергии. Для этого в приборе предусмотрено наличие ряда современных систем, как синхронизации первичных измерений, так и передачи информации в системы более высокого уровня.

Наибольший интерес представляют возможности взаимной синхронизации работы нескольких приборов марки TDM-3F, схематично представленные на рисунке 5. Эти функции значительно расширяют возможности одновременной регистрации первичной информации, так как позволяют использовать рассредоточенные приборы как единую, глобальную систему мониторинга. Это позволяет придавать процедуре мониторинга новые, расширенные функции диагностики и локации мест возникновения дефектов в высоковольтном оборудовании.



Если отдельные приборы мониторинга марки TDM-3F находятся друг от друга на расстояние не более 0,5 км, то их можно объединить при помощи специализированной оптической линии, позволяющей синхронизировать процесс регистрации с точностью до нескольких наносекунд. Так

объединены три прибора TDM-3F, показанные на рисунке 5 слева. Если же расстояние между приборами значительно больше указанного, то в этом случае синхронизация процессов регистрации может быть осуществлена при помощи встроенных плат глобального времени GPS/GLONASS. Точность синхронизации по сигналам системы GPS несколько хуже, только на уровне 100 наносекунд, но при этом расстояние между объединяемыми приборами может быть очень большим, до нескольких сотен километров.