Журнал ЭЛЕКТРО 2014. № 4. С.13-17

Алгоритм анализа повреждаемости силовых трансформаторов и примеры его реализации

д.т.н., проф. И.В. Давиденко, Уральский Федеральный Университет
К.В. Овчинников, ООО «Эльмаш (УЭТМ)»

В статье описан алгоритм анализа повреждаемости трансформаторов. Даны примеры его применения по выборке 349 фактов повреждений трансформаторов 35-500 кВ. Отмечено, чем он может быть полезен для потребителей и производителей электрооборудования. Приведены результаты анализа повреждаемости обмоток, магнитопровода и переключающих устройств трансформаторов.

Ключевые слова: надежность и повреждаемость силовых трансформаторов, надежность и повреждаемость обмоток, магнитопровода и переключающих узлов, экспертные, информационные и диагностические системы.

Актуальность исследования

На основе качественного анализ повреждаемости силовых трансформаторов (СТ) можно уточнять критерии их диагностирования, выявлять сильные и слабые места проведения технического обслуживания, процедур диагностирования, оснащенности квалифицированными кадрами, материалами, средствами и методиками; выявлять приоритетные направления инвестиций по производителям и типам оборудования, обучению персонала и его стимулированию, средствам диагностирования и проведения операций ТОиР.

К сожалению, в последнее время наблюдается утрата специалистами энергокомпаний навыков расследования и сбора информации о повреждениях электрооборудования (ЭО), сопутствующих им факторов и их последствиях, а также навыков многостороннего анализа надежности трансформаторов. Эта негативная тенденция стала следствиям ряда факторов, в том числе:

- с начала реструктуризации энергосистемы РФ перестали выходить релизы ОРГРЭС с подробным анализом отказов силовых трансформаторов;
- приказы о конфиденциальности любой информации, в том числе о повреждаемости оборудования, привели к тому, что полной информацией об отказах оборудования могут обладать только определенные департаменты холдингов ЕЭС России;
- публикации специалистов управлений холдингов ЕЭС РФ с анализом надежности трансформаторов часто были выполнены с поверхностным, формальным подходом;
- из-за конфликта интересов производитель-эксплуатация, начальник-подчиненный возникает искажение данных о причинах и характере повреждений, нарастающее вверх по иерархии управления;

Цель предлагаемого нами алгоритма решение выше перечисленных задач путем повышения качества и автоматизация анализа повреждаемости силовых трансформаторов. Использование предложенного алгоритма в автоматизированных системах позволит, в том числе, минимизировать ошибки персонала: избежать неточности вносимых данных, субъективности, компенсировать отсутствия у персонала опыта проведения такого анализа.

Отказ силового трансформатора - явление редкое, поэтому чтобы собрать достаточный для анализа объем информации необходимо накапливать данные несколько лет по ряду производственных отделений, филиалов МРСК/ФСК. Сегодня повсеместно на предприятиях используются базы данных (БД) для хранения информации об эксплуатации ЭО, которые могут быть использованы и для сбора данных о повреждениях ЭО (после соответствующей доработки).

Описание алгоритма анализа повреждаемости

Алгоритм (см. рисунок 1) строится на двух ключевых этапах. На первом из них каждое повреждение описывается и классифицируется по созданному шаблону, а на втором происходит подробный анализ массива собранных данных. Данный алгоритм реализован в экспертно-диагностической и информационной системе (ЭДИС) оценки технического состояния электрооборудования «Альбатрос».

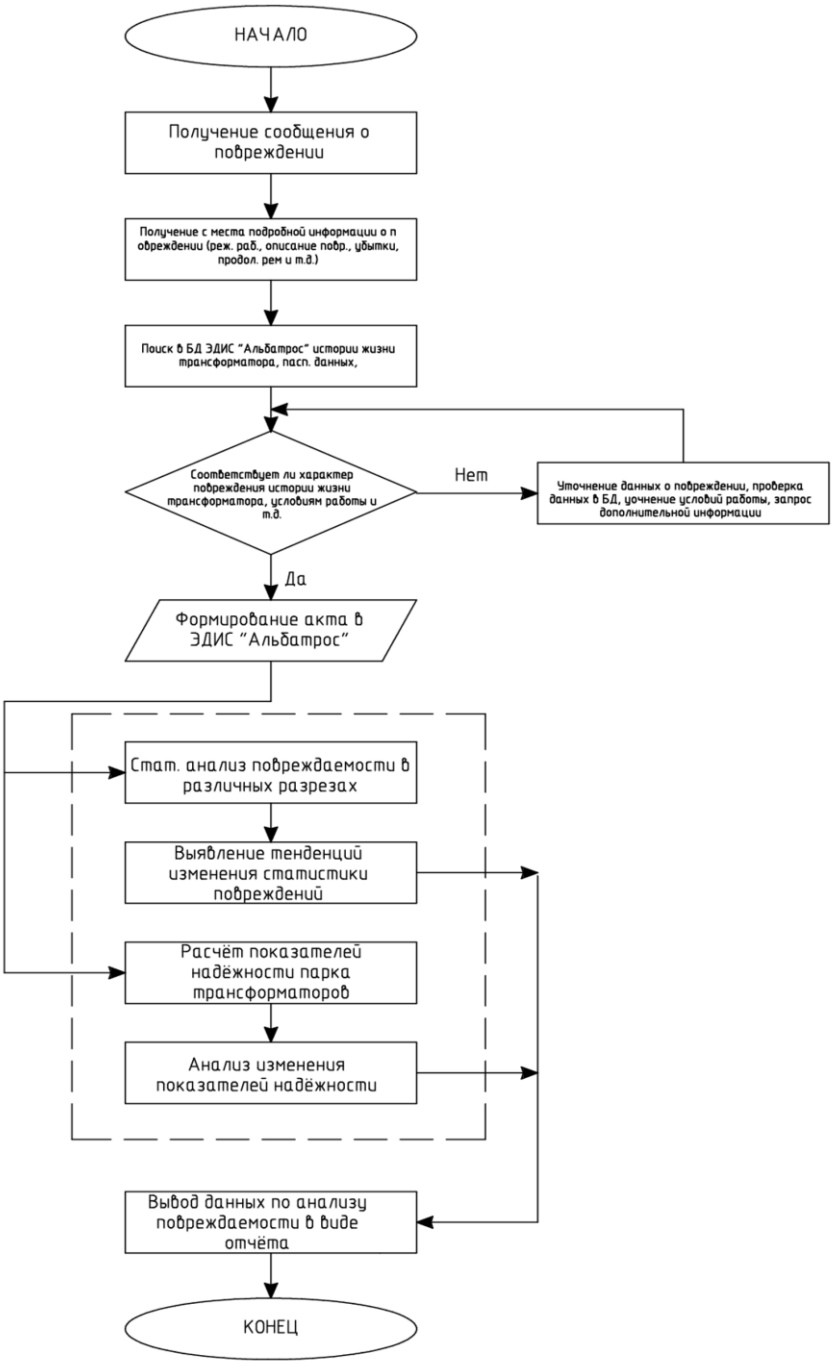

Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма анализа повреждаемости трансформаторов

Акт формализованного описания-классификации повреждения, содержит 4 блока информации: паспортные характеристики; факторы, сопутствующие повреждению; факторы, выявившие повреждение; последствия повреждения, а также данные блока классификации повреждения. Более 80% информации акта формируется с помощью набора справочников. Эта формализация описания повреждения позволяет автоматизировать процедуру анализа данных ЭДИС. Для блока классификации повреждений было разработано 14-15 справочников, часть из которых двухуровневые. Например, справочники, описывающие причины, характер, место, вид повреждения, виновников, последствия повреждения, ущербы энергокомпании, ущербы потребителей, состояние нейтрали трансформатора, условия работы в момент повреждения, причины отключения и браковки оборудования.

На рисунке 2 приведен пример 2-хуровнего справочника «Характер повреждения».

Рисунок 2 – Справочник место повреждения ЭДИС «Альбатрос»

На втором этапе производится анализ повреждаемости трансформаторов по созданной базе описания повреждений.

Здесь есть следующие возможности:

- статистического анализа повреждаемости СТ рассматриваемого периода в виде круговых диаграмм (23 различных видов диаграмм);
- выявления тенденций изменения статистики повреждаемости СТ в сравнении с предыдущим периодом;
- расчета показателей надежности парка трансформаторов рассматриваемого периода (поток отказов, наработка на отказ, среднее время восстановления, коэффициент готовности);
- выявления тенденций изменения показателей надежности в сравнении с предыдущим периодом;
- сравнение показателей надежности и статистических показателей повреждаемости СТ с аналогичными показателями, в среднем по региону (холдингу и т.д.);
- статистический анализ графиков зависимости повреждаемости трансформатора (его узлов и систем и пр.) от срока эксплуатации;
- ограничение рассматриваемой выборки повреждений с использованием справочников 4 блока информации акта (паспортных характеристик; факторов, сопутствующих развитию и выявляющих повреждения; классификаторов и последствий повреждений).

Важно отметить, что виды повреждений СТ делятся на браковки (повреждения, которые выявил эксплуатационный персонал и своевременно вывел СТ из работы) и отказы (повреждения трансформатора, которые эксплуатационный персонал просмотрел или не успел вовремя вывести СТ из работы, СТ отключился цепями релейной защиты или произошла авария, приведшая к выходу трансформатора из строя). Кроме того, среди повреждений (браковок и отказов) выявляются финальные, то есть такие, при которых восстановление трансформатора не возможно или экономически не целесообразно. Анализ изменений тенденций соотношения показателей браковка/отказы и их сравнение со средними показателями покажут изменение эффективности работы персонала

энергокомпании по диагностированию дефектов и выполнению операций ТОиР. Чем выше квалификация персонала в области диагностирования, лучше его оснащенность диагностическим оборудованием и методиками, адекватнее и оперативнее работа по ТОиР, тем выше показатели забракованного оборудования и ниже показатели отказов в энергокомпании.

В зависимости от организации, проводящей анализ повреждаемости СТ и целей его проведения, алгоритмы (сценарии) анализа имеют свою специфику.

С точки зрения завода-изготовителя могут рассматриваться: надежность поставщиков материалов и комплектующих, слабые места в конструкции СТ, технологии их изготовления, а также могут вырабатываться рекомендации для потребителей по диагностированию и эксплуатации оборудования.

С точки зрения организаций, специализирующихся на диагностировании (инженерных центров) может рассматриваться аудит организации, диагностирующей оборудование, с выявлением сильных и слабых мест проведения процедур диагностирования, оснащенности квалифицированными кадрами, приборами и методиками, получение новых, проверка и совершенствование существующих критериев и алгоритмов диагностирования оборудования.

С точки зрения ремонтной организации могут рассматриваться: ремонтопригодность и надёжность оборудования различных производителей; качество комплектующих, поставляемых различными заводами.

С точки зрения эксплуатирующей организации могут: определяться направления инвестиций в приобретение диагностического оборудования и методик диагностирования; выявляться надежные производители (конструкции) оборудования; проводиться обучение персонала; выявляться приоритетных направлений инвестиций по производителям и типам оборудования; определяться недостатки в организации ТОиР и процедур диагностирования; проводиться аудит организации, эксплуатирующей оборудование, с выявлением сильных и слабых мест проведения операций технического обслуживания и ремонта (ТОиР), оснащенности кадрами, необходимыми материалами и средствами для проведения таких работ; выявляться слабые места как в области управления закупками, выборе поставщиков оборудования, так и в процессе эксплуатации трансформаторов.

Это возможно благодаря тому, что структура отказов, их характер, могут быть рассмотрены для каждого поставщика оборудования в отдельности, для каждого подразделения организации. Получая данные не только о количестве повреждений, но и продолжительности восстановления, коэффициенте готовности и т.п. в различных разрезах, компания может оптимизировать свои затраты и направлять средства именно туда, где потребность в них наиболее высокая.

В настоящее время отработан алгоритм анализа повреждаемости СТ с точки зрения эксплуатирующей организации и ведутся разработки других сценариев.

Результаты анализа повреждаемости трансформаторов

Далее в статье рассматриваются некоторые результаты анализа повреждаемости силовых трансформаторов (СТ) различных классов напряжения (10-500 кВ).

Залогом качественного анализа повреждаемости являются 3 фактора: репрезентативная выборка, достоверные данные и качественный алгоритм.

Выборка фактов повреждения СТ классов напряжения 15-500 кВ собрана благодаря

широкому внедрению экспертно-диагностической и информационной системе (ЭДИС) «Альбатрос» (365 рабочих мест). Авторам удалось собрать весомый массив данных повреждений СТ (349 случаев), зафиксированных в базе данных системы. База данных ЭДИС хранит информацию об условиях работы СТ и воздействиях на него в момент повреждения, результатах вскрытия, а также «историю жизни» трансформатора, представленную результатами измерений и перечнем операций ТОиР, выполненных до момента повреждения. Таким образом, в архиве накапливаются и те повреждения, которые своевременно выявлены персоналом, и те, которые выявить персонал не успел. В нашу выборку вошли трансформаторы, установленные на всей территории России, имеющие сроки наработки до 60 лет. Трансформаторы изготовлены на крупнейших заводах РФ и ближнего зарубежья. Авторы считают, что информация, собранная в базе данных повреждений, достаточно достоверна, так как ими проверялось соответствие результатов вскрытия СТ характеру и динамике развития дефекта, диагностированного по данным измерений.

Поэтому считаем, что выборка, которой располагают авторы, является репрезентативной, достоверной и позволяет получить объективную картину повреждаемости трансформаторного оборудования.

Наиболее повреждаемыми узлами трансформаторов по данным авторов (это, в целом согласуется с [1,2,3]) являются обмотки (39% от общего числа повреждений), ПУ (31%), вводы (12%), система охлаждения (6%), магнитопровод (5%). Ниже приведены результаты кратких анализов повреждаемости обмоток, ПУ и магнитопроводов.

Анализ повреждаемости обмоток

Обмотки трансформатора являются наиболее повреждаемым узлом – 126 случаев из всего 349 (39%). Несмотря на то, что они, в отличие от переключающих устройств, не содержат движущихся частей, из-за взаимодействия сил, вызванных протекающими в них токами, друг с другом, обмотки находятся в постоянном движении. При этом происходит повышенный износ бумажной витковой изоляции (которая одновременно подвержена механическому, химическому, термическому и электромагнитному воздействиям), что впоследствии приводит к межвитковым замыканиям.

Так же во время короткого замыкания на обмотки трансформатора начинают воздействовать радиальные и аксиальные силы на порядки большие, чем в нормальном режиме работы, что приводит к значительным смещениям обмоток и, в крайних случаях, к разрушению как самих обмоток, так и системы прессовки. Ещё одной угрозой для обмоток являются импульсные перенапряжения, вызываемые, в частности, грозами; при отсутствии необходимых защитных устройств на подстанции или их некачественной работе, может произойти пробой изоляции.

В отличие от описанных выше видов повреждений, которые развиваются в считанные мгновения (за исключением износа витковой изоляции), длительный перегрев обмоток приводит к постепенной деградации твёрдой изоляции с последующим её разрушением. Данный процесс может быть отслежен с помощью АРГ и причина его устранена.

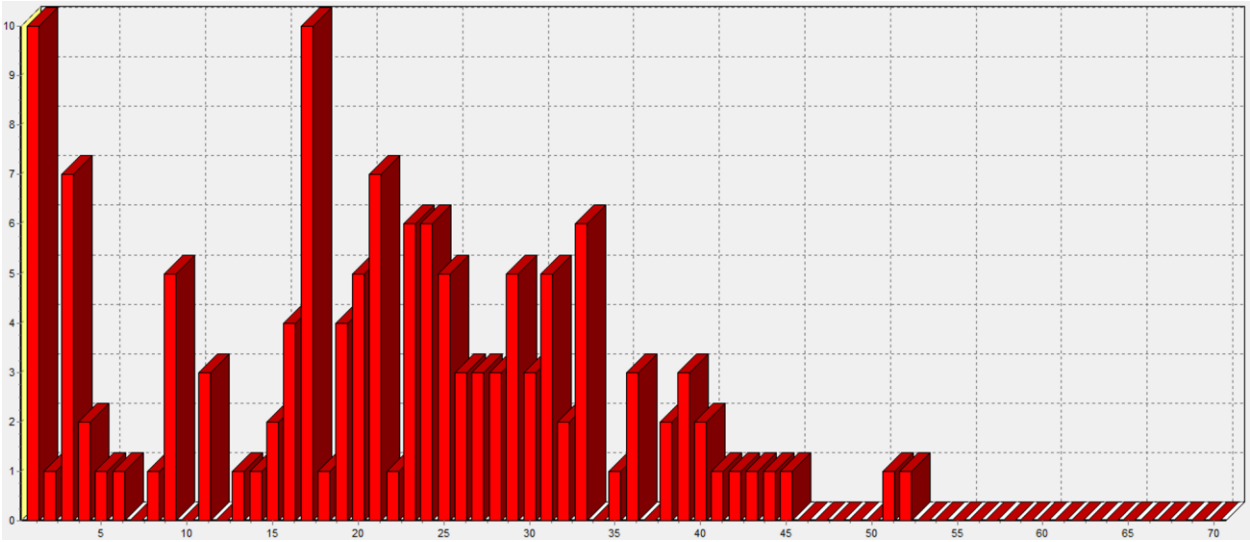

Рисунок 3 – Изменение повреждаемости обмоток во времени

Из рисунка 3 видно, что приработочный период для обмоток длится 3-4 года, на протяжении этого периода выявляется большинство заводских дефектов.

Механический характер носят 49% повреждений обмоток. К таким повреждениям мы, в частности, отнесли воздействия динамических процессов, износ межвитковой изоляции (и, как следствие, пробой), ослабление болтовых/паяных соединение обмоток с отводами и ошиновкой, а также увлажнение изоляции. Почти треть повреждений (32%) имеют электрический характер, прежде всего это пробой из-за импульсного перенапряжения.

Наиболее часто повреждения связаны с пробоем витковой изоляции (28%), главной изоляции (30%), также часто страдают отводы (23%). Остальные повреждения происходят в прессующих кольцах и других местах.

Наиболее распространёнными причинами повреждений за весь период работы трансформатора являются ошибки эксплуатации (46%), а также конструкторские и технологические ошибки (21%), которые нельзя отнести к производственному браку (например, недостаточная динамическая или импульсная стойкость обмоток, которые являются ошибками расчёта; неверно подобранные материалы на стадии проектирования, т.е. конструкторские ошибки).

Возвращаясь к приработочному периоду отметим, что в первые 4 года эксплуатации 68% повреждений вызваны именно технологическими или конструкторскими ошибками завода. В 19% случаев к повреждению трансформатора приводят действия сторонних лиц и организаций. Интересно отметить, что к повреждениям от стихийных воздействий в этот период можно отнести только 3% повреждений обмоток. Одной из причин столь низкой цифры является то, что авторы считают, например, что первопричиной выхода трансформатора из строя при грозе из-за отсутствия защитного оборудования на станции является именно отсутствие защитных устройств, а не сама гроза.

Анализ повреждаемости переключающих устройств

Переключающее устройство (ПУ), наравне с обмотками, является одним из самых повреждаемых узлов трансформатора [4] (в нашем исследовании устройства переключения под нагрузкой и без возбуждения объединены в одну группу). Так, в

выборке, доля повреждений ПУ составила 31% от общего числа повреждений (109 случай из 349). Распределение повреждений ПУ с течением времени приведено на рисунке 2.

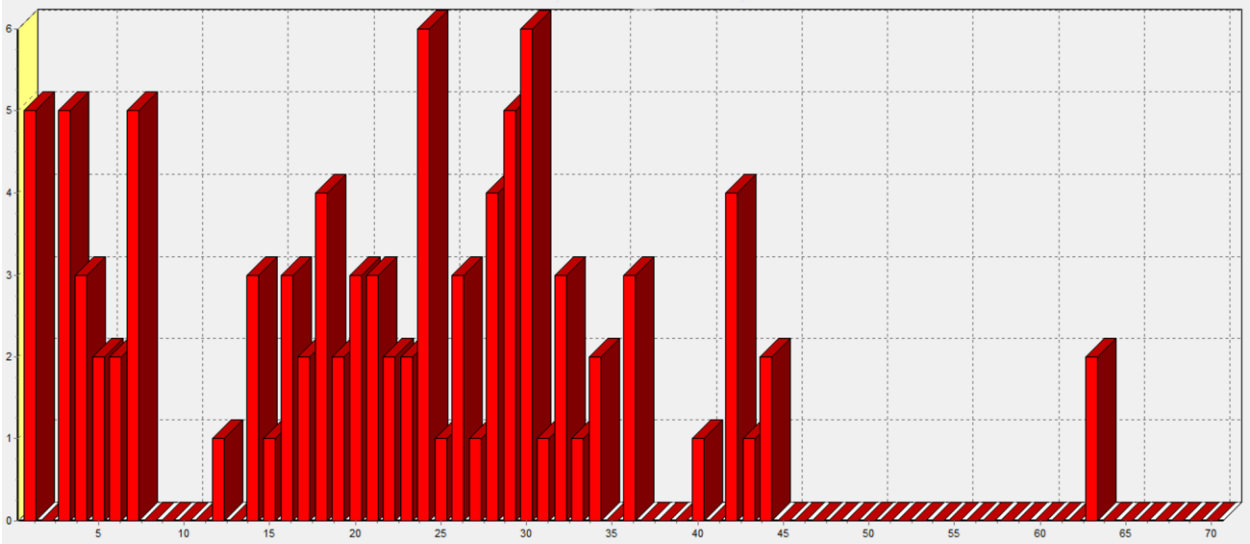

Рисунок 4 – Изменение повреждаемости ПУ во времени

Из рисунка 4 видно, что для ПУ ярко выражен приработочный период, который для данного узла трансформатора составляет 7 лет.

Более половины повреждений – 55% – носят механический характер. Наиболее распространёнными типами являются нарушение контакта (43%) и смещение деталей (21%), которые нередко влекут за собой тепловые повреждения, такие нагар и оплавление контактов.

Четверть повреждений тепловые, они вызваны, в основном, подгаром и подплавлением контактов (в данном случае речь идёт не о следствиях, как в предыдущем абзаце, а о причинах). В этих случаях при осмотре ПУ не выявлено существенных механических повреждений.

Интересно отметить, что при 47% механических повреждений против 29% тепловых вызваны естественным старением узлов, в то же время 30% механических и 38% тепловых повреждений ПУ происходит из-за действий (или бездействия) эксплуатационного персонала. Заводской брак (брак как изготовителя ПУ, так и при его установке в трансформатор на заводе-изготовителе) является причиной примерно трети тепловых повреждений ПУ.

Оставшиеся случаи повреждений приходятся на электрические повреждения и случаи незначительных повреждений.

Анализ повреждаемости магнитопровода

Всего из 349 собранного в ходе данной работе случаев повреждений, на магнитопровод приходится лишь 19 (или 5,44%). Из диаграммы на рисунке 5 видно, что повреждения магнитопровода начинают проявляться только через 10 лет эксплуатации (то есть их можно отнести к медленно развивающимся дефектам, устранение которых часто не требует срочного вмешательства в работу трансформатора).

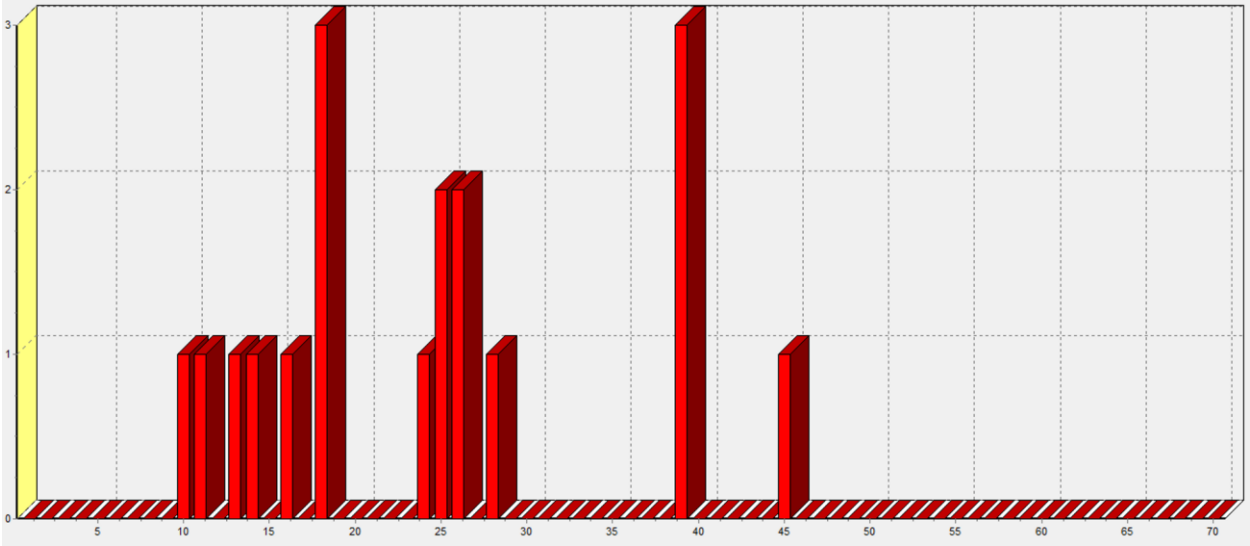

Рисунок 5 – изменение повреждаемости магнитопровода во времени

Также отметим, что более 60% повреждений – это нарушения в системе распора или деталях крепежа магнитопровода, 13% - нарушение в системе заземления, которые вместе приводят к образованию контура, появлению циркулирующих токов и, как следствию, локальным перегревам (2/3 случаев) или оплавлениям (1/3 случаев) конструктивных элементов.

Отдельно обратим внимание на тот факт, что среди всех повреждений, попавших в нашу выборку, отсутствует «пожар в стали». Это можно объяснить тем, что для развития данного типа повреждения необходимо длительное время в купе со значительными нагревами, что сейчас, с развитием систем диагностирования, в частности, на базе АРГ, легко отслеживается и пресекается на ранней стадии.

В основном дефекты в магнитопроводе развиваются по вине заводов-изготовителей трансформатора или из-за естественного старения изоляционных материалов. Реже виновниками становятся эксплуатирующие или монтажные организации.

Заключение

В статье кратко приведен алгоритм анализа повреждаемости трансформаторов, в качестве примера описаны несколько справочников повреждений, позволяющих формализовать описание. В следующей части разбирается повреждаемость трансформаторов. В качестве базового выбран справочник «Место повреждения». Отмечаются основные закономерности, выявленные авторами. Такой анализ проведён для обмоток, ПУ и магнитопровода.

Использую экспертно-диагностическую систему заводы-изготовители получат возможность объективно анализировать недостатки своего оборудования и эффективно их устранять (в частности, используя рассчитанные нами показатели повреждаемости).

Эксплуатирующим организациям данный алгоритм позволит определить оборудование, в наибольшей мере нуждающееся в ремонте, наиболее надёжных поставщиков оборудования, и выявлять наиболее квалифицированный и неквалифицированный персонал.

Отметим, что алгоритм анализа надежности СТ и результаты такого анализа, изложенные в статье, могут быть полезны специалистам эксплуатирующих, а также проектных

организаций и заводов-изготовителей, выполняющим такой анализ. Найденные вероятности отказа узлов и систем трансформатора могут быть использованы в процедурах диагностирования и оценки рисков отказов трансформаторов, применяемых при их ранжировании.

Исследование показало, что повреждаемость СТ разных классов напряжения и сроков эксплуатации отличается доминирующими причинами, видами и местами (узлами, системами) повреждений, а также их виновниками и последствиями. В статье рассмотрены особенности повреждений отдельных узлов и систем трансформатора в зависимости от срока эксплуатации.

Список литературы

[1] Давиденко И.В., Овчинников К.В., Халикова Е.Д. «Вопросы анализа надежности трансформаторного оборудования 35-110 кВ». ЭнергоInfo. - 2013, № 9. - С. 60-63.

[2] О.И. Карандаева. «Характеристика повреждаемости сетевых и блочных трансформаторов ОАО ММК», Вестник ЮУрГУ – 2011, №34. – С. 15-20.

[3] S. Tenbohlen, F. Vahidi, J. Gebauer, M. Krüger «Assessment of power transformer reliability» XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.

[4] M. Foata, C. Rajotte, A. Jolicoeur. «On-load tap changer reliability and maintenance strategy». CIGRE 2006, paper A2-102

Algorithm of analysis of power transformers damageability and examples of applying»

Davidenko I.V., PhD (UrFU); Ovchinnikov K.V. (Elmash (UETM) Company Limited)

Abstract: Algorithm of damageability analysis of power transformers is described in the paper. Cases of practice application of the algorithm have given (with using author's sample consist from 349 examples of damage of different transformers). It was pointed out that this algorithm may be useful for consumers and manufacturers of electrical equipment. Results of damageability analysis of windings, magnetic core and OLTC were shown.

Key words: Reliability and damageability of power transformers; Reliability and damageability of windings, magnetic core and OLTC; expert, informational and diagnostic systems