

## Диагностика высоковольтного маслонаполненного оборудования методом хроматографии.

Надежность современных систем производства и распределения электроэнергии в значительной мере определяется надежностью электрооборудования. Аварийные повреждения, часто сопровождающиеся разрушением оборудования, по характеру их развития можно разбить на такие основные группы:

- дефекты, при которых повреждение оборудования происходит очень быстро - мгновенный отказ;
- локальные повреждения, которые развиваются до отказа в течение нескольких суток или месяцев - быстро развивающиеся;
- повреждения (дефекты) с длительным периодом развития от нескольких месяцев до нескольких лет – медленно развивающиеся.

В первом случае контроль с целью выявления дефектов невозможен. Это область действия защиты сети от развития повреждений. Во втором случае при быстро развивающихся дефектах необходимы автоматизированные системы диагностики, обеспечивающие непрерывный мониторинг или достаточно частый контроль. В третьем случае нужен периодический или учащённый контроль.

Поддержание необходимой степени надежности оборудования в процессе его эксплуатации обеспечивается системой технического обслуживания и ремонтов. Традиционно эта система базируется на периодическом проведении плановых профилактических работ и является системой обслуживания **по времени наработки**. Применительно к электрооборудованию высокого напряжения такая система не является оптимальной, так как приводит к неоправданным отключениям вполне работоспособного оборудования и необоснованным материальным затратам, а в некоторых случаях безосновательное вмешательство в нормально работающее оборудование может вызвать и ухудшение состояния изоляции.

Более современной, технически целесообразной и экономически выгодной есть тенденция к переходу на техническое обслуживание **исходя из действительного состояния оборудования**. Переход к такой форме обслуживания невозможен без использования надежных методов выявления и оценки его текущего технического состояния. Это и определяет необходимость развития системы технической диагностики.

В ГОСТ 11677-85 «Трансформаторы силовые. Общие технические условия» величина срока службы, равная 25 годам, установлена на основании того, что за указанный период может произойти износ целлюлозной витковой изоляции обмоток, которая наиболее подвержена процессам теплового старения и определяет ресурс силового трансформатора. Решающее влияние на изоляцию оказывают: качество самой изоляции, величина нагрузки трансформатора, величина и длительность протекания токов коротких замыканий, величина перенапряжений, качество масла и тип защиты масла от окисления, эффективность системы охлаждения трансформатора и другие особенности конструкции.

Значительная часть парка трансформаторного оборудования уже отработала гарантированный заводом срок эксплуатации. Но при правильной оценке состояния трансформатора, своевременном выявлении дефектов его функциональных систем и предотвращении губительного действия на целлюлозную изоляцию продуктов старения вполне возможна и более длительная эксплуатация. Даже трансформаторы, имеющие дефекты (если это дефекты, медленно развивающиеся или которые не затрагивают основные функциональные системы трансформатора), могут, находясь под контролем, продолжать эксплуатироваться до планового вывода в ремонт, что даёт время на подготовку к ремонту или замене трансформатора.

В процессе работы изоляция претерпевает различные физико-химические изменения. При этом выделяются продукты разложения - твердые, жидкие и газообразные вещества. Процесс разрушения раньше инициируется и существенно ускоряется при наличии увлажнения изоляции. Твердые изоляционные материалы на основе целлюлозы (бумага, картон), а также трансформаторное масло при медленном старении выделяют газы: водород, низкомолекулярные углеводороды, а также окись и двуокись углерода, образующиеся при окислении целлюлозы.

Образование газообразных продуктов разложения изоляционных материалов под действием электрического поля, разрядов и тепла является неперенным явлением любого, даже нормально работающего электроаппарата. В числе газов, растворенных в масле работающих силовых трансформаторов, могут быть **метан  $\text{CH}_4$ , этан  $\text{C}_2\text{H}_6$ , этилен  $\text{C}_2\text{H}_4$ , ацетилен  $\text{C}_2\text{H}_2$ , пропан  $\text{C}_3\text{H}_8$ , пропилен  $\text{C}_3\text{H}_6$ , бутен 1  $\text{C}_4\text{H}_8$ , бутан  $\text{C}_4\text{H}_{10}$** . При разрушении изоляции, связанном с наличием повреждений, интенсивность процессов газовой выделению резко повышается, изменяется также состав газов и их соотношение. Образование газовой фазы в изоляции усложняет работу высоковольтного оборудования, что, в свою очередь, ещё больше увеличивает газообразование.

Поэтому газы, выделяющиеся и растворяющиеся в масле, являются бесценным источником информации о наличии и развитии дефектов в оборудовании. Самым эффективным методом определения наличия растворённых газов является **хроматография**.

Метод хроматографии был предложен в 1903 г. русским ученым-ботаником М.С. Цветом. В современной литературе хроматографию определяют как метод разделения, анализа и физико-химического исследования веществ. Наибольшее распространение получил метод газовой хроматографии.

Хроматографический анализ растворённых газов (ХАРГ) в масле трансформатора – наиболее мощный и чувствительный способ выявления дефектов. Для него характерны:

- Наиболее ранняя диагностика дефектов;
- Реакция на весь комплекс возможных дефектов;
- Реакция на дефекты в начальной стадии их возникновения;
- Удобство использования для контроля динамики развития дефектов.

Отбор проб масла на ХАРГ чаще всего не требует снятия напряжения и производится непосредственно из работающего оборудования в любое время года и при любой погоде, благодаря чему, отражает реальное состояние его функциональных систем. Для диагностики отбирается ничтожно малое количество масла, поэтому после отбора пробы не требуется доливка свежего масла. Диагностирование по содержанию растворенных в масле газов включает в себя выявление объектов с дефектами, оценку скорости развития дефектов, а также определение их характера и опасности.

В настоящее время проведение ХАРГ регламентируется требованиями ряда действующих в Украине нормативных документов, а именно:

„Нормы испытания электрооборудования” – СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007;

„Диагностика маслонаполненного трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа” – СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006;

„Трансформаторы силовые. Типовая инструкция по эксплуатации” – СОУ 40.1-21677681-07:2009;

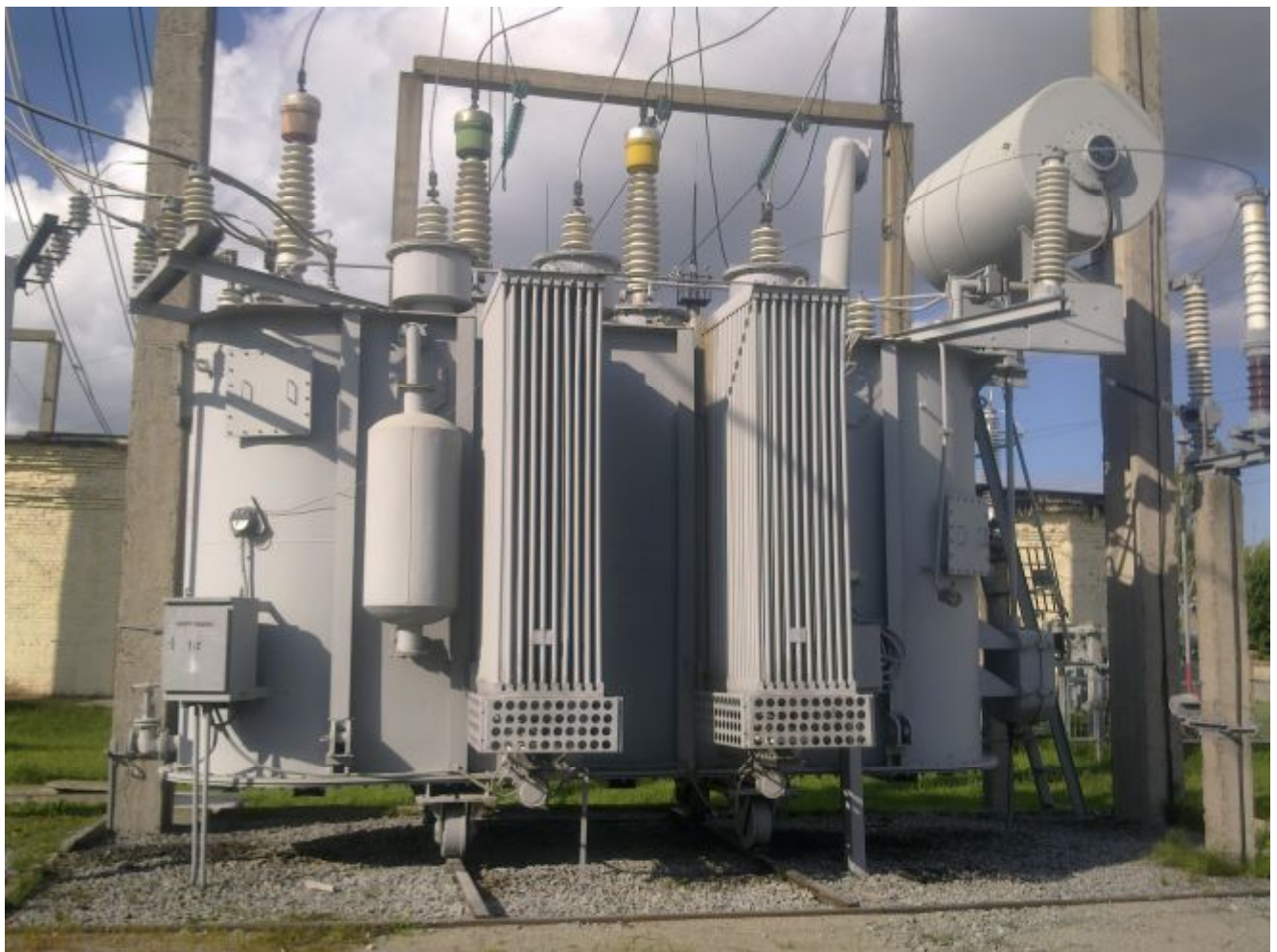
В частности, из всего парка маслонаполненного оборудования, которое эксплуатируется в ПАО „ЭК „Житомироблэнерго”, а также из оборудования абонентских подстанций на территории Житомирской области (ПС- Химволокно-110, ПС- Керамический Завод-110 и др) масло для ХАРГ отбирается из:

- баков всех силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и 35 кВ;

- баков контакторов трансформаторов, т.к. в них кроме дефектов электрического характера (повреждение изоляции, износ контактов) часто возникают механические дефекты подвижных частей;
- герметичных и негерметичных высоковольтных маслонаполненных вводов, установленных на трансформаторах и выключателях.

Диагностика по результатам хроматографического анализа является чувствительной к любым повреждениям даже в начальной стадии развития, когда обычными методами измерений и испытаний (электрические параметры оборудования и изоляции, химический анализ) выявить повреждение ещё нельзя. Исследование состояния оборудования при помощи ХАРГ производится для любых видов маслонаполненного оборудования всех классов напряжения. Помимо силовых трансформаторов это шунтирующие и дугогасящие реакторы, измерительные трансформаторы тока и напряжения, трансформаторы собственных нужд подстанций, выключатели.

Служба Изоляции и Защиты от Перенапряжений ПАО „ЭК „Житомироблэнерго” в сотрудничестве с ООО „ТРИДЭС” (г. Запорожье) при помощи хроматографического анализа уже 10 лет успешно производит контроль состояния 70 силовых трансформаторов 110 кВ и 125 силовых трансформаторов 35 кВ.



Оценка характера и опасности дефекта производится по наличию определенных диагностических газов, соответствующих каждому виду повреждения, а также по соотношениям концентрации этих газов и динамике изменения этих величин.

К наиболее часто встречающимся причинам повреждения внутренней изоляции оборудования высокого напряжения относятся процессы двух типов:

- во-первых, явления разрядного характера – вследствие высоких локальных напряженностей поля и неравномерности структуры, загрязнения или увлажнения

изоляция возникают частичные, искровые, ползущие и дуговые разряды, приводящие к электрическому пробое изоляции.

- во-вторых, причина ухудшения органической изоляции бывает связана с тепловыми воздействиями. Перегревы токоведущих частей приводят к нарушению целостности токоведущей цепи, а также к перегревам контактирующей с ней изоляции. А перегревы изоляции приводят к резкому снижению ее диэлектрической прочности, что, опять-таки, создает условия для развития пробоя.

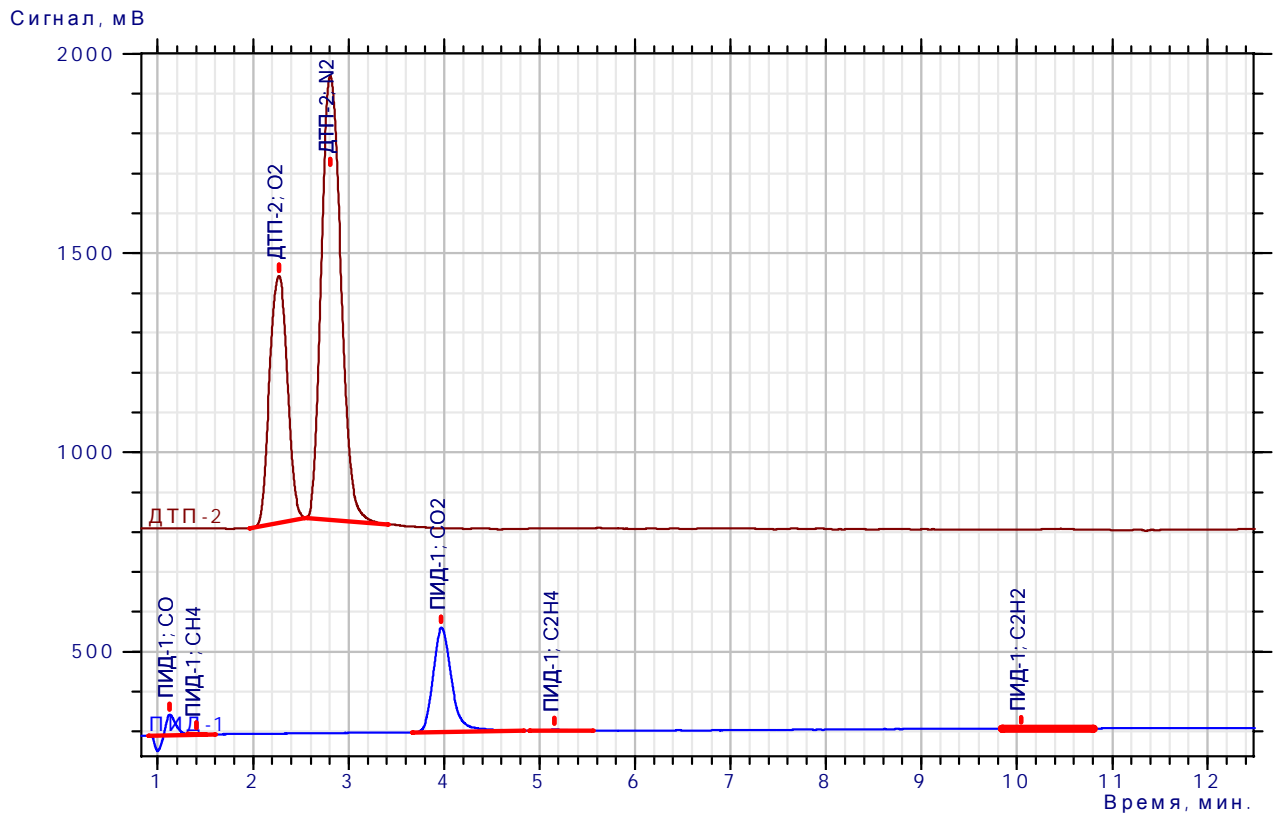
Главными признаками появления дефектов является концентрация диагностических газов и скорость её нарастания. Из опыта эксплуатации установлены соответствующие нормы - граничные значения этих концентраций. Соотношения между концентрациями различных газов и изменение скорости газовыделения являются более важными для диагноза данными, чем сведения о наличии газов и их концентрации. Так, в частности, нормальное состояние объекта можно констатировать и в случае превышений нормативной концентрации ряда газов, если изменения этих концентраций малы. Однако при высокой скорости повышения концентрации даже ничтожно малое абсолютное значение концентрации (в пределах нормированных значений) может быть признаком наличия скрытого дефекта, который очень скоро приведёт к ухудшению электрических и химических характеристик оборудования. Это сигнал-предупреждение о необходимости учащенного контроля за всеми параметрами оборудования.

Для непосредственного определения концентраций диагностических газов и применяется **метод газодсорбционной хроматографии**, основанный на разделении компонентов газовой смеси при помощи различных адсорбентов - пористых веществ с сильно развитой поверхностью. Процесс газовой хроматографии состоит из двух этапов: разделение анализируемой смеси на компоненты (качественный анализ) и определение их концентраций (количественный анализ). Различия в физико-химических свойствах отдельных газов смеси вызывают различия в скорости их продвижения через адсорбент. Поэтому на выходе разделительной колонки будут последовательно появляться составляющие анализируемой пробы. Это дает информацию о составе анализируемой смеси. Последовательность (время) вывода из разделительной колонки конкретных газов известна. Для получения количественных данных определяется площадь пиков хроматограммы, которая на основании данных калибровки приводится к значениям концентрации соответствующих газов.

В ПАО „ЭК „Житомироблэнерго” этот метод реализуется на практике с помощью Хроматографического аппаратно-программного комплекса «Купол-55», **рис.1.**



Примерный вид хроматограмм изображён на **рис. 2**



**Рис 2 (а)**

На рисунке 2 (а) приведен пример хроматограммы газов, растворённых в масле силового трансформатора, который не имеет отклонений в работе. В его масле в растворённом виде содержатся, в основном, воздушные газы – кислород  $O_2$ , азот  $N_2$ , углекислый газ  $CO_2$  и угарный газ  $CO$ .

Сигнал, мВ

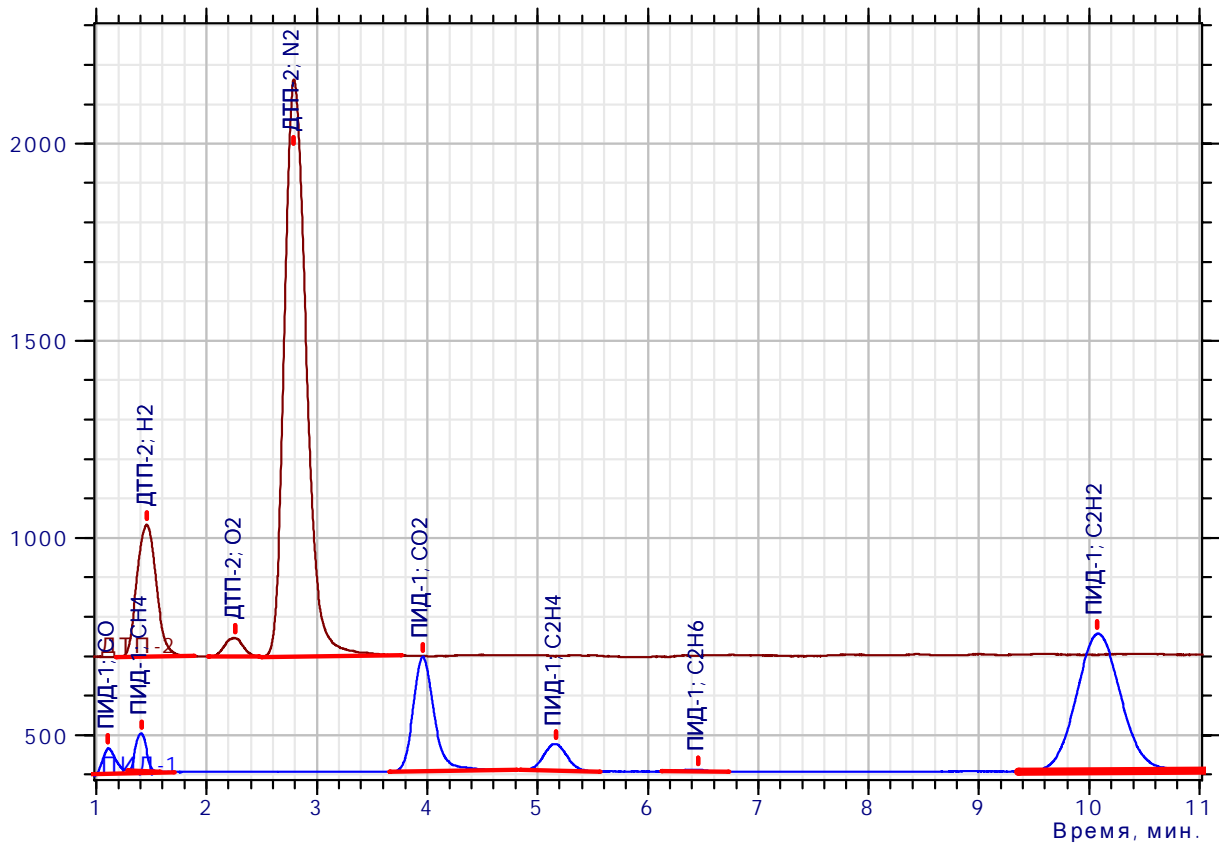


Рис. 2 (б)

При разрушении изоляции, связанном с наличием повреждений, интенсивность процессов газовыделения резко повышается; меняется также состав газов и их соотношение.

На рисунке 2 (б) приведен пример хроматограммы газов, растворённых в масле силового трансформатора, который имеет явно выраженный развитый дефект. Помимо воздушных газов в масле этого трансформатора в больших количествах содержатся водород  $H_2$ , метан  $CH_4$ , этан  $C_2H_6$ , этилен  $C_2H_4$  и ацетилен  $C_2H_2$ . Для того, чтобы избежать аварии, необходимо немедленно вывести данный трансформатор в ремонт. В случае своевременного обнаружения дефектов затраты на ремонт будут на порядок ниже, чем расходы на восстановление аварийного трансформатора (в том случае, если после аварии трансформатор подлежит восстановлению в принципе).

