

О. В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;
Д. Н. БАКЛАЙ, асс., НТУ «ХПИ»;
Т. А. ОСТРИКОВА, студентка, НТУ «ХПИ»;
Н. Ю. МЕЛЬНИК, студентка, НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ТИПОВ ДЕФЕКТОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОТНОШЕНИЙ ПАР ГАЗОВ И ГРАФИЧЕСКИХ ОБРАЗОВ ДЕФЕКТОВ

Выполнена оценка достоверности распознавания типов дефектов трансформаторов при использовании отношений пар газов и графических образов дефектов. Установлено, что наибольшее значение достоверности при распознавании типа дефекта трансформатора, может быть получено при одновременном использовании отношений пар газов и графических образов дефектов.

Ключевые слова: образ дефектов, отношения пар газов, частичные разряды.

Вступление. В настоящее время для определения характера прогнозируемого дефекта в высоковольтных трансформаторах, действующим в Украине нормативным документом [1] предусмотрено использование, как отношений пар газов, так и графических образов дефектов. Несмотря на то, что обе диагностические схемы основаны на том, что каждому из возможных дефектов соответствует свой спектр газов (по которому и определяется как, наличие, так и тип прогнозируемого дефекта), процедуры диагностики при их применении отличаются. Это может привести к тому, что диагнозы поставленные с помощью этих диагностических схем для одного и того же объекта будут различаться. В связи с этим, возникает задача оценки достоверности принятия решений при использовании отношений пар газов и графических образов дефектов.

Анализ последних исследований и литературы. Вопросам оценки достоверности методов интерпретации результатов хроматографического анализа (ХАРГ) посвящено достаточно много исследований. Так с 1990 г. [2] рабочей группой СИГРЭ 15.01, при исследовании трансформаторов сравнивались методы, разрешенные к применению различными национальными или ведомственными правилами в дополнение к международному стандарту МЭК 699. Анализ показал большое различие в нормах и критериях оценки состояния трансформаторов. Соответственно различные методы интерпретации результатов измерений приводят к разным выводам.

© О.В.Шутенко, Д.Н. Баклай, Т.А.Острикова, Н.Ю.Мельник, 2013

Было установлено, что ни один метод не пригоден для универсального применения. В [3] на основе результатов ХАРГ по 250

трансформаторам имеющим дефекты, была выполнена оценка диагностической ценности наиболее известных методов интерпретации. Установлено, что наибольшей диагностической ценностью (93%) обладает методика МЭК (IEC 60599). Там же отмечено, что отношения концентраций анализируемых газов обладают условной диагностической ценностью поскольку, они позволяют распознать вид дефекта, при превышении граничных концентраций хотя бы одного газа углеводородного ряда. В тоже время, в открытых литературных источниках отсутствует информация о достоверности распознавания типов дефектов при использовании графических образов дефектов для интерпретации результатов ХАРГ.

Цель исследований. В статье, выполнен анализ достоверности распознавания типов дефектов трансформаторов при использовании отношений пар газов и графических образов дефектов.

Материалы исследований. Для определения типа прогнозируемого дефекта в Украине [1] используются следующие отношения пар газов: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$, CO_2/CO , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$ и O_2/N_2 .

Отношение CH_4/H_2 используется для случаев, когда водород является газом с максимальной концентрацией, а следующим газом по концентрации является метан. Это отношение указывает на наличие частичных разрядов, в этом случае его значение меньше 0,1. Также отношение CH_4/H_2 используется для диагностирования дефектов термического характера, при которых его значения превышают 1.

Отношение $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ указывает на наличие частичных разрядов малой и большой энергии, достаточной для образования ацетилена в значительных количествах. При таких дефектах значение отношения превышает единицу и растет с увеличением мощности разрядов. Для устойчивого дугового разряда значение отношения достигает 5. Использование этого отношения для результатов ХАРГ из бака контактора устройства переключения позволяет выявить возможное наличие в нем аномального нагрева, в случае если значение отношения составляет меньше 1,5.

Отношение $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ является основным при определении термических дефектов. Величина данного отношения растет с увеличением температуры в зоне дефекта. При температурах в диапазоне до 300-350 °С это отношение меньше единицы, при температуре 350 °С – приблизительно равно единице и увеличивается до 4 при температуре 700 °С.

Отношение CO_2/CO может указывать на повреждение целлюлозной изоляции. В случае термического повреждения бумажной изоляции с температурой в зоне дефекта, меньше 150 °С, это отношение больше 10, а при температуре более 250 °С – меньше 3. Данное отношение дает достоверные результаты при достаточно высоких концентрациях этих

газов, не менее 0,5 % об. для CO_2 и 0,05 % об. для CO . Следует учесть, что оба газа в не меньшем количестве чем при повреждениях целлюлозы, могут образовываться при термическом окислении масла, особенно в негерметичном оборудовании при свободном доступе кислорода.

Отношение $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$ используется для трансформаторов с устройством РПН и может указывать на нарушение герметичности между основным баком трансформатора и баком устройства переключения. Образовавшиеся газы через неплотности могут попадать в основной бак. В таком случае отношение обычно равно двум и более, а концентрация C_2H_2 , не менее 30×10^{-6} о.е. Так как водород менее растворим в трансформаторном масле, чем ацетилен, последний быстрее диффундирует из бака РПН в основной бак диффундирует только малое количество водорода. В результате в трансформаторном масле количество ацетилена становится больше, чем водорода.

Отношения O_2/N_2 . Кислород и азот могут попадать в масло в результате прямого контакта с воздухом в негерметичном оборудовании, или из-за нарушения пленочной или азотной защиты в герметичном оборудовании. Когда значение отношения O_2/N_2 снижается до 0,2 и меньше, в негерметичном оборудовании, можно диагностировать окислительные процессы аномально высокой интенсивности. Такое отношение в основном, является характерным для герметичного оборудования, но при высокой интенсивности окислительных процессов может иметь место и в негерметичном оборудовании. При условии достижения равновесной растворимости O_2 и N_2 отношения этих газов в масле приблизительно равно 0,5. Для определения типа дефекта с помощью отношений пар газов использовался табличный метод, который приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Определение типа дефекта по трем основным отношениям газов

Тип дефекта	Код дефекта	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$
Нормальное старение масла	N	Hx	0,1–1	<0,2
Частичные разряды	ЧР	Hx	<0,1	<0,2
Разряды низкой энергии	P1	>1	0,1–0,5	>1
Разряды высокой энергии	P2	>1	0,1–1	>2
Ползучий разряд	P3	<1	0,3–0,5	>5
Термический дефект 150-300 °С	T1	Hx	>1	<1
Термический дефект 300-700 °С	T2	Hx	>1	1–4
Термический дефект >700 °С	T3	<0,2	>1	>4
Примечание Hx – нехарактерное отношение. Для данного типа дефекта не рассматривается.				

Вид развивающихся в трансформаторах дефектов можно определить графически по основным газам: водороду, метану, этилену, этану и ацетилену. Для этого определяется газ, имеющий максимальную

абсолютную концентрацию. Определяются отношения каждого из пяти газов к газу, имеющему максимальную концентрацию. Далее строятся графики. Для этого по оси абсцисс откладываются пять равных отрезков, и обозначаются полученные точки соответствующими газами в следующей последовательности: H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 . По оси ординат откладывается отрезок произвольной величины, и обозначается цифрой "1". Далее для каждого газа по оси ординат необходимо отложить соответствующую величину отношения $a_i / a_{\max i}$. Полученные точки соединяются прямыми линиями. Построенный график сравнивается с эталонными графиками и определяется характер дефекта.

В качестве исходных данных использовались результаты ХАРГ по 100 трансформаторам с установленным видом дефекта. Суть исследований сводилась к сравнению реального диагноза с диагнозами, поставленными по отношениям пар газов и графическим образам дефектов.

Результаты исследований. Выполненное сравнение показало достаточно высокую достоверность постановки диагноза как при использовании отношений пар газов, так и с помощью графических образов дефектов. Принципиально важно, что ни для одного из 100 анализируемых трансформаторов отношения пар газов не соответствовали нормальному состоянию. Другими словами, вероятность пропуска дефекта является крайне низкой.

При использовании отношений пар газов полное совпадение поставленного и реального диагнозов составило 96%. Т.е. правильный диагноз получен для 96 из 100 исследуемых трансформаторов. В 4 случаях при постановке диагноза возникли затруднения. Значения концентраций растворенных в масле газов и значения отношений пар газов для данных трансформаторов приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения концентраций и значения отношений пар газов для 4 трансформаторов с нечеткими диагнозами, полученными при диагностике по отношениям пар газов

№	Концентрации газов, % об.					Отношения пар газов		
	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$
1	0,064	0,043	0,005	0,26	0,022	0,0192	0,671	11,818
2	0,041	0,0274	0,0022	0,068	0,0069	0,0323	0,668	9,855
3	0,27	0,025	0,024	0,03	0,007	0,8	0,0925	4,285
4	0,004	0,0077	отсут.	0,0018	0,0027	-	1,925	0,666

Как видно из табл. 2 все дефекты, по которым возникли затруднения с постановкой диагноза, являются комбинацией дефектов термического и электрического типов. Так в трансформаторе №1 (ТДГ-31500/110)

выявлены следы разрядов и перегрев гетинаксовой прокладки и железа стыкового магнитопровода. Из табл. 2 видно, что ключевым газом с максимальной концентрацией является этилен. Т.е. прогнозируемый дефект имеет термический характер с температурой более 700 °С, о чем свидетельствует значение отношения C_2H_4/C_2H_6 . Значения отношения C_2H_2/C_2H_4 меньше 0,2, что также характерно для дефекта ТЗ (табл. 1). Но значение отношения CH_4/H_2 меньше единицы, что не характерно для данного диагноза.

Аналогичная ситуация наблюдается и в трансформаторе №2 (ТДЦТ-125000/220). При вскрытии данного трансформатора выявлен высокотемпературный перегрев магнитопровода со следами разрядов. Газом с максимальной концентрацией является этилен, а значения отношений пар газов идентичны трансформатору №1.

В трансформаторе №3 (ТДЦ-400000/330) выявлены следы разряда и выгорание магнитопровода. Максимальную концентрацию имеет водород, что указывает на наличие электрических разрядов. Однако следующим по концентрации газов является не метан (что характерно для частичных разрядов), а этилен. Несмотря на это отношение CH_4/H_2 меньше 0,1, что указывает на наличие частичных разрядов, но при этом отношение C_2H_4/C_2H_6 значительно превышает значение 0,2, что не позволяет однозначно установить диагноз.

Причиной вывода из эксплуатации автотрансформатора №4 (АТДЦТГУ-120000/220) оказались неустойчивые короткие замыкания из нижнего яра магнитопровода на дно бака. Но при этом, как видно из таблицы 2 ключевым газом является метан, а отношения пар газов соответствуют термическому дефекту с температурой 150-300 °С. Таким образом для трансформатора №4 имеет место постановка ошибочного диагноза.

Графические образы дефектов для этих трансформаторов приведены на рис. 1.

Сравнивая образы дефектов, приведенные на рис. 1 с эталонными образами дефектов из СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 легко увидеть, что образы дефектов трансформаторов №1 и №2 (см. рис. 1.1 и 1.2) соответствуют сумме двух образов высокотемпературному нагреву и разрядам, что полностью совпадает с действительным диагнозом. Образ дефекта трансформатора №3 (см. рис. 1.3) соответствует частичным разрядам с нагреванием, а в трансформаторе №4 (см. рис. 1.4) образ дефекта соответствует нагреванию, переходящему в частичные разряды.

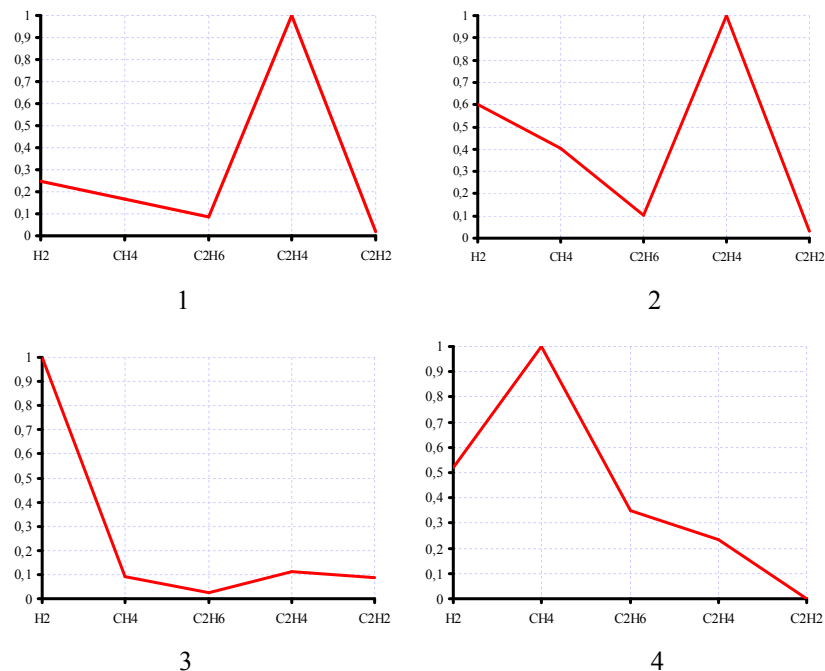


Рис. 1 – Графические образы дефектов для 4 трансформаторов с нечеткими диагнозами, полученными при диагностике по отношениям пар газов

Таким образом, использование графических образов дефектов позволило установить правильный диагноз в тех случаях, когда использование отношений пар газов вызвало затруднение при постановке диагноза.

В тоже время, при использовании графических образов дефектов полное совпадение поставленного и реального диагнозов составило 94%, что является более низким показателем по сравнению с отношением пар газов. Рассмотрим подробнее данные трансформаторы. Графические образы дефектов приведены на рис. 2, а значения концентраций растворенных в масле газов, значения отношений пар газов и типы дефектов данных трансформаторов приведены в табл. 3.

Как видно из рис. 2.1 образ дефекта в трансформаторе ТДН-16000/150 соответствует дуговому разряду. Отношения пар газов из табл. 3 также соответствуют разрядам высокой энергии. Однако причиной роста концентраций газов в баке трансформатора являлся не дуговой разряд, а нарушения герметичности бака устройства РПН, что вызвало

попадание масла из бака РПН в бак трансформатора. Уточнить характер повреждения и не допустить ошибочного вывода трансформатора из эксплуатации позволило отношение C_2H_2/H_2 , значение которого равно 2.

Таблица 3 – Значения концентраций и значения отношений пар газов для 6 трансформаторов, с нечеткими диагнозами, полученные при диагностике с помощью графических образов дефектов

№	Концентрации газов, % об.					Отношения пар газов				
	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	CH_4	C_2H_4	CO_2	C_2H_2
						C_2H_4	H_2	C_2H_6	CO	H_2
1	0,0012	0,0006	0,0024	0,0018	0,00015	1,333	0,5	12	-	2
2	0,00301	0,00981	0,00017	0,0394	0,00231	0,0043	3,259	17,05	10,5	-
3	0,03	0,0095	0,0111	0,0113	0,0016	0,982	0,316	7,062	-	-
4	0,005	0,001	0,81	0,039	0,009	20,769	0,2	4,333	-	-
5	0,094	0,043	0,247	0,238	0,025	1,037	0,457	9,52	-	-
6	0,048	0,044	0,4	0,35	0,15	1,142	0,916	2,333	-	-

Образ дефекта автотрансформатора АТДЦТГ-120000/220 (см. рис. 2.2) полностью соответствует высокотемпературному перегреву, который и был зафиксирован в данном трансформаторе. Однако данный дефект сопровождался деструкцией твердой изоляции, о чем свидетельствует значение отношения CO_2/CO из табл. 3.

Причиной вывода из эксплуатации автотрансформатора 330 кВ (№3 в табл. 3), стал ползучий разряд. На, что указывают и результаты вскрытия и отношения пар газов из табл. 3. Однако, образ дефекта, приведенный на рис. 2.3 в большей степени соответствует дуговому разряду.

Рост концентраций газов в трансформаторе №4 (ТДН-16000/110/6), обусловлен разрядами высокой энергии из-за ослабление гайки на шпильке ввода обмотки НН. Построенный образ дефекта, (см. рис. 2.4) не соответствует не одному из эталонных образов рекомендуемых в [1, 4]. Однако отношения пар газов (табл. 3) четко указывают на разряды большой энергии.

Автотрансформатор АТДЦТН-125000/220/110 (№5 в табл. 3) был поврежден из-за ползучего разряда по поверхности и в толщине главной изоляции. Отношения пар газов приведенные в табл. 3 соответствуют ползучему разряду. Однако образ дефекта, построенный по значениям концентраций газов, больше соответствует дуговому разряду.

Причиной вывода из эксплуатации трансформатора ОЦГ-135000/500 (№6 в табл. 3) стало разрушения поверхности правого поперечного бруса, клина, прижимной пластины, болта и прямоугольной замковой шайбы, в результате разрядов высокой энергии. Отношения пар газов, из таблицы 3,

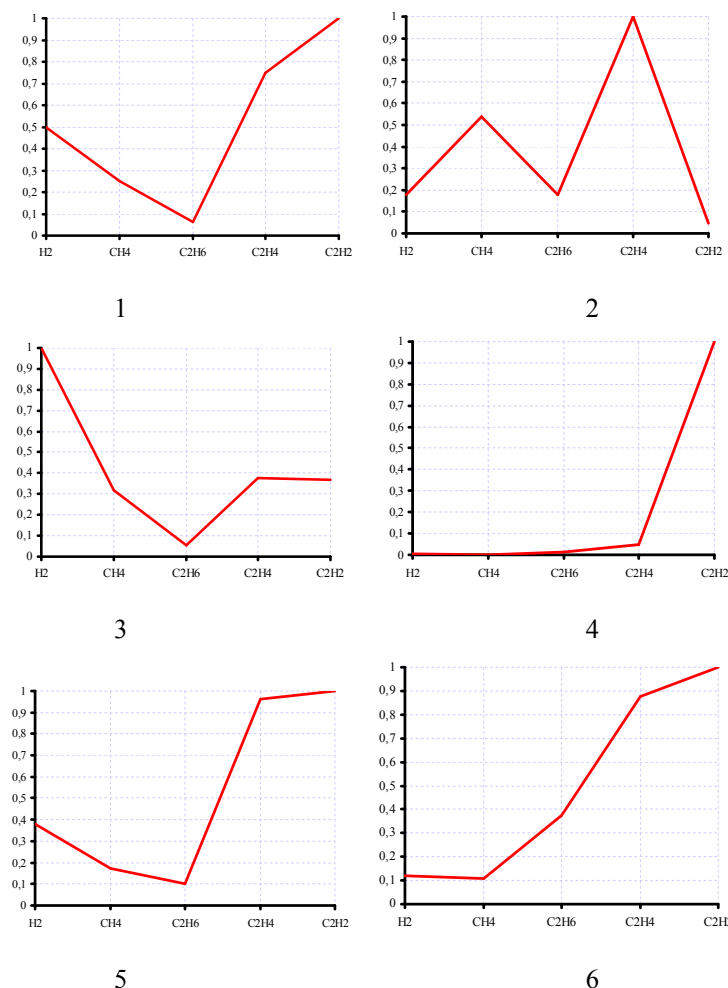


Рис. 2 – Графические образы дефектов для 6 трансформаторов, с нечеткими диагнозами, полученные при диагностике с помощью графических образов дефектов

однозначно определяют данный дефект. В тоже время, построенный образ дефекта (см. рис. 2.6) не соответствует не одному из эталонных образов, рекомендуемых в [1, 4].

Таким образом, выполненный анализ позволил установить, что с помощью графических образов дефектов невозможно распознавать деструкцию основной изоляции и разгерметизацию бака РПН. Также

определенные сложности возникают с диагностированием тех электрических дефектов (кроме дугового разряда), для которых газом с максимальной концентрацией является ацетилен. Это обусловлено ограниченным числом эталонных образцов приведенных в нормативных документах.

Кроме того, необходимо отметить, что все дефекты распознавание, которых по графическим образам оказалось затруднительным были распознаны по отношениям пар газов. В результате одновременного использования двух диагностических схем, были распознаны все 100% дефектов в анализируемой выборке.

Выводы.

1. Выполнен анализ достоверности распознавания типа дефектов в высоковольтных силовых трансформаторах с помощью отношений пар газов и графических образов дефектов. Установлено, что обе диагностические схемы обладают достаточно высокой достоверностью. Так при использовании отношений пар газов совпадение поставленного и реального диагнозов составило 96%, а при использовании графических образов дефектов – 94%. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследований, приведенных в открытой печати;

2. Установлено, при использовании отношений пар газов, затруднения с постановкой диагноза возникают при распознавании комбинаций дефектов термического и электрического типов;

3. Выполненный анализ позволил установить, что с помощью графических образов дефектов не возможно распознавать деструкцию основной изоляции и разгерметизацию бака РПН. Также определенные сложности возникают с диагностированием тех электрических дефектов (кроме дугового разряда), для которых газом с максимальной концентрацией является ацетилен. Это обусловлено ограниченным числом эталонных образцов приведенных в нормативных документах;

4. Сравнительный анализ показал, что дефекты, распознавание которых с помощью отношений пар газов вызвало затруднение, могут быть распознаны с помощью графических образов дефектов, и наоборот. Наибольшее значение достоверности при распознавании типа дефекта трансформатора, может быть получено при одновременном использовании отношений пар газов и графических образов дефектов.

Список литературы: 1. Диагностика маслонеповненного трансформаторного оборудования за результатами хроматографического анализа вольных газов, взятых из газового реле, и газов, растворенных в изоляционном масле СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. – Київ. – 2007.; 2. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Б. А. Алексеев – М. НЦ ЭНАС, 2002 г. – 216 с.; 3. Львов М.Ю. Оценка информативности показателей контроля технического состояния изоляции трансформаторного оборудования / М.Ю. Львов // Электрические станции. – 2002. – №12. – С. 44 – 51; 4. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам

хроматографического анализа газов, растворенных в масле: РД 153-34.0-46.302-00. – Офиц. изд. М.: НЦ ЭНАС, 2001. – (Отраслевой руководящий документ действует с 01.01.2001).

Поступило в редколлегию 12.12.2012

УДК 621.31

Анализ достоверности распознавания типов дефектов трансформаторов при использовании отношений пар газов и графических образов дефектов / Шутенко О. В., Баклай Д. М., Острикова Т. А., Мельник Н. Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. - №.17 (990). – С.178-187. Бібліогр.:4. Лл.:2. Табл.:3.

Виконано оцінку достовірності розпізнавання типів дефектів трансформаторів при використанні відносин пар газів і графічних образів дефектів. Встановлено, що найбільше значення достовірності при розпізнаванні типу дефекту трансформатора, може бути отримано при одночасному використанні відносин пар газів і графічних образів дефектів.

Ключові слова: образ дефектів, відносини пар газів, часткові розряди.

The evaluation of the reliability of detection of defects types of transformers using relations gas and graphic images of defects. Found that the maximum reliability in recognizing defect type transformer can be obtained while using the relationship pairs of gases and graphic images of defects.

Keywords: image of defects, relationship pairs of gases, partial discharges.