

УДК 621.314

О. В. Шутенко, канд. техн. наук,
Д. Н. Баклай, ассистент
Т. А. Острикова, магистр,
Н. Ю. Мельник, студентка
 Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

АНАЛИЗ ПРИЧИН ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ, НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ РАСТВОРЕННЫМИ В МАСЛЕ ГАЗАМИ

Постановка проблемы.

Согласно действующим нормативным указаниям, по интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ), одним из критериев, позволяющих распознавать наличие дефекта в высоковольтных силовых трансформаторах, является превышение концентрациями растворенных в масле газов некоторых заданных значений, называемых граничными. Однако имеющийся опыт эксплуатации показывает, что превышение граничных концентраций газов, возможно и при отсутствии дефекта в трансформаторе. Рост концентраций газов в бездефектных трансформаторах возможен в силу целого ряда причин, начиная от ошибочных действий персонала при калибровке хроматографа и заканчивая воздействием токов коротких замыканий, перегрузок, перенапряжений и т.д. Как правило, оперативный персонал не располагает информацией о воздействиях аварийных режимов работы электрической сети, что значительно усложняет задачу распознавания. Таким образом, задача распознавания причин роста концентраций газов в трансформаторе, без вывода его из эксплуатации, является крайне актуальной и имеет практическую значимость.

Анализ публикаций.

Эксплуатационными факторами, вызывающими увеличение концентрации растворенных в масле газов бездефектных трансформаторов, согласно [1], являются:

остаточные концентрации газов от устраненного дефекта во время ремонта трансформатора (если не была проведена дегазация масла);

- увеличение нагрузки трансформатора;
- перемешивание свежего масла с остатками старого, насыщенного газами, находящегося в системе охлаждения, баках РПН, расширителе и т.д.;
- доливка маслом, бывшим в эксплуатации и содержащим растворенные газы;
- проведение сварочных работ на баке;
- повреждения масляных насосов с неэкранированным статором;
- перегревы из-за дефектов системы охлаждения (засорение наружной поверхности охладителей, отключение части масляных насосов и др.);
- перегрев масла тепловыми или электронагревателями при его обработке в дегазационных и других установках;
- попадание газов из бака расширителя контактора РПН в бак расширителя трансформатора, имеющего РПН типа РС-3 или РС-4;

- сезонные изменения интенсивности процесса старения;
- воздействие токов короткого замыкания и др.

В работе [2] показано, что при воздействии аварийных режимов работы электрических сетей, концентрации растворенных в масле газов могут на много превышать граничные значения. При этом такое превышение имеет кратковременный характер. В работе [3] отмечается, что рост газов наблюдается во всех трансформаторах на подстанции, правда значения приращений концентраций в разных трансформаторах могут существенно различаться. Там же предложено использовать анализ корреляционных связей для определения причин роста концентраций растворенных в масле газов. Приведенные в данных работах результаты требуют проведения дополнительных исследований.

Цель статьи – В статье, изложена методика распознавания причин газовой выделению в масле силовых трансформаторов, на основе анализа корреляционных связей между газами.

Метод решения.

При проведении исследований предполагалось, что внешние воздействия на трансформатор, должны в той или иной мере оказывать влияние и на соседний трансформатор на подстанции. Естественно, что при этом, значение концентраций газов в соседних трансформаторах может значительно отличаться, что создает объективные сложности при анализе причин роста концентраций газов. Однако, динамика изменения концентраций газов в соседних трансформаторах, на диагностируемом промежутке времени, в случае внешних воздействий, должна быть идентична. Другими словами, если зависимости газов на диагностируемом промежутке времени совпадают, то их изменение обусловлено общей причиной, а не развитием дефекта. В качестве количественной меры, для оценки динамики изменения концентраций газов в соседних трансформаторах на диагностируемом промежутке времени, удобно использовать коэффициент парной корреляции между газами в соседних трансформаторах.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \tag{1}$$

где: x_i, y_i – текущие значения концентраций газов; \bar{x}, \bar{y} – математические ожидания концентраций растворенных в масле газов на диагностируемом промежутке времени; n – объем выборочных значений.

Зависимости концентраций газов в соседних трансформаторах от продолжительности эксплуатации считались идентичными, если расчетное значение коэффициента парной корреляции превышало критическое при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f = n-2$.

Анализ корреляционных связей между газами, растворенными в масле соседних трансформаторов на подстанции. Как правило, на подстанциях, имеющих два и более трансформатора, отбор проб масла для хроматографического анализа выполняется в один день, что значительно облегчает проведение исследований. В ряде случаев, на основе анализа корреляционных связей между газами растворенными в масле соседних трансформаторов, можно выявить причину роста концентраций газов не прибегая к дополнительным исследованиям. Наиболее показательным является пример трансформатора Т-2 ПС «Шахта 21» Луганскоблэнерго. Результаты хроматографического анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения концентраций растворенных в масле газов в трансформаторе ПС «Шахта-21» Т-2», % об.

Дата	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
20.07.2007	0,0039	0,0094	0,00001	0,0353	0,0039	0,0257	0,1899

Как видно из таблицы по результатам ХАРГ, были выявлены превышения граничных значений метаном, этиленом, этаном и водородом, что может быть интерпретировано как наличие дефекта. Критериальные отношения пар газов имеют следующие значения:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 0,00028; \quad \frac{CH_4}{H_2} = 2,410; \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 9,051,$$

что согласно п. 8.2.1 СОУ-НН 46.501:2006 можно интерпретировать как термический дефект с температурой более 700°С. Графический образ дефекта (см. рис. 1 а) показал, что имеет место высокотемпературный нагрев. Однако, причиной роста концентраций растворенных в масле газов оказался не дефект трансформатора, а нарушение контактных соединений на низкой стороне трансформатора Т-2, фаза А. Причем данное нарушение было обнаружено с помощью проведения тепловизионного анализа, термограмма данного дефекта приведена на рисунке 1 б.

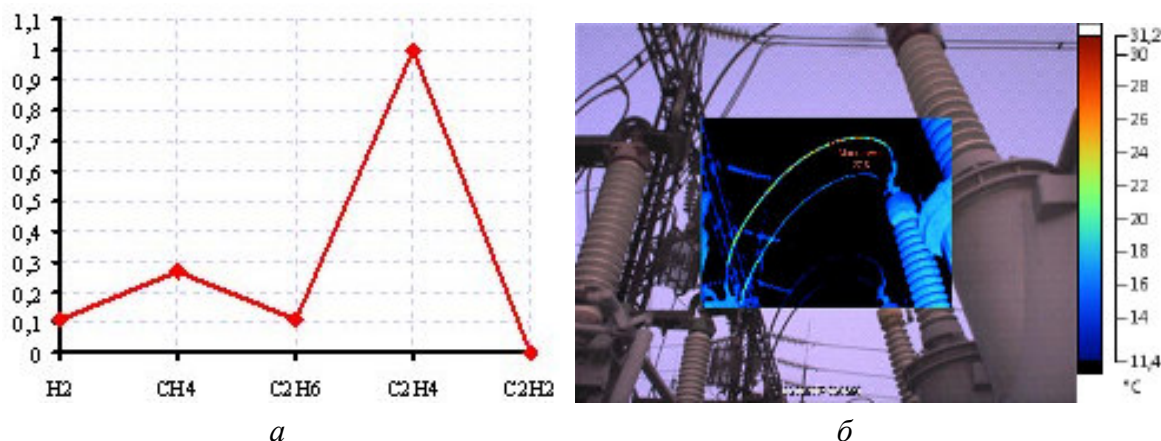


Рис. 1 – Эксплуатационный образ и результаты тепловизионного контроля контактных соединений на стороне НН трансформатора ПС «Шахта-21» Т-2»

Установить, что причиной роста концентраций растворенных в масле газов, является внешнее воздействие можно было и не прибегая к тепловизионному контролю. Для этого достаточно было выполнить анализ коэффициентов парной корреляции между газами из трансформаторов Т2 и Т-1. На рис. 2 приведены зависимости газов углеводородного ряда и водорода от длительности эксплуатации для трансформаторов Т-1 и Т2 ПС «Шахта 21», а значения коэффициентов парной корреляции между газами данных трансформаторов приведены в табл. 2.

Наличие значимой положительной корреляции между оксидом углерода, ацетиленом, этиленом, этаном и водородом в трансформаторах Т-1 и Т-2 свидетельствует о том, что газы в трансформаторах Т-1 и Т-2 имеют общую динамику

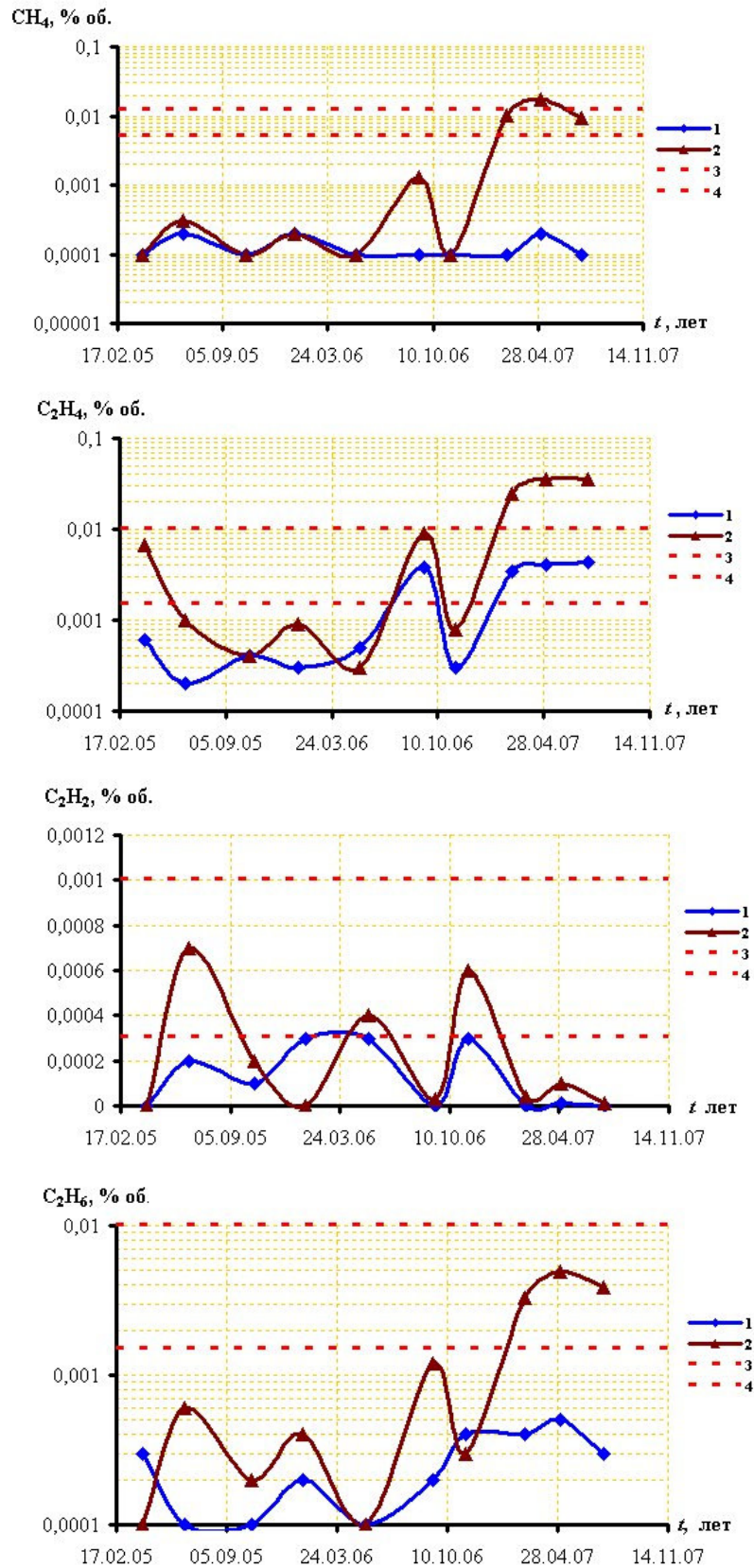


Рис. 2 – Динамика изменений концентраций газов углеводородного ряда во времени для трансформаторов ПС «Шахта 21» Луганскоблэнерго
 1 – трансформатор ПС «Шахта 21» Т-1; 2 – трансформатор ПС «Шахта 21» Т-2;
 3, 4 – граничные концентрации газов согласно СОУ-НЕС 46.501:2006

Таблица 2

Значения коэффициентов парной корреляции между газами растворенными в масле трансформаторов Т-1 и Т-2 ПС «Шахта 21» Луганскоблэнерго

$N_i=10, \rho_{крит, 8, 0,95} = 0,632$						
СО	СО ₂	СН ₄	С ₂ Н ₂	С ₂ Н ₄	С ₂ Н ₆	Н ₂
СО	СО ₂	СН ₄	С ₂ Н ₂	С ₂ Н ₄	С ₂ Н ₆	Н ₂
0,899	0,569	0,565	0,633	0,891	0,636	0,869

изменения. Из рис. 2 видно что, несмотря на то, что концентрации газов углеводородного ряда в данных трансформаторах отличаются почти на порядок, динамика их изменения во времени идентична. При этом максимальные значения концентраций в обоих трансформаторах, приходится на один момент времени. Это значит, что причиной роста концентраций растворенных в масле газов в трансформаторе Т-2 являются внешние эксплуатационные воздействия, а не дефект в трансформаторе.

В табл. 3 приведены значения коэффициентов парной корреляции между газами, соседних трансформаторов, при различных внешних воздействиях на трансформаторы.

Таблица 3

Значения коэффициентов парной корреляции между газами, растворенными в масле соседних трансформаторов

Корреляция между газами						
СО	СО ₂	СН ₄	С ₂ Н ₂	С ₂ Н ₄	С ₂ Н ₆	Н ₂
СО	СО ₂	СН ₄	С ₂ Н ₂	С ₂ Н ₄	С ₂ Н ₆	Н ₂
ПС «Брянка», Т1/Т2, n=17, $\rho_{крит, 15, 0,95}=0,482$						
0,797	0,899	0,345	0,397	0,821	-0,340	–
ПС «Бурынь», Т1/Т2, n=15, $\rho_{крит, 13, 0,95}=0,514$						
–	0,802	0,832	0,494	0,903	-0,089	–
ПС «Боково», Т1/Т2, n=11, $\rho_{крит, 9, 0,95}=0,602$						
0,708	0,917	0,512	-0,275	0,941	0,267	0,814
ПС «Боково», Т2/Т3, n=11, $\rho_{крит, 9, 0,95}=0,602$						
0,586	0,487	0,656	0,061	0,714	-0,237	0,364
ПС «Боково», Т2/3, n=11, $\rho_{крит, 9, 0,95}=0,602$						
0,527	0,534	0,428	-0,541	0,717	0,398	0,461

Как видно из табл. 3, при наличии внешних воздействий наблюдается одновременный рост концентраций газов не только в диагностируемом, но и соседнем трансформаторе, что приводит к появлению значимой статистической связи между газами. Данное обстоятельство позволяет использовать значения коэффициентов парной корреляции между газами, растворенными в масле соседних трансформаторов, на диагностируемом промежутке времени в качестве источника диагностической информации.

Анализ корреляционных связей между газами, растворенными в масле трансформаторов из разных подстанций. В некоторых случаях важным источником диагностической информации являются результаты корреляционного анализа между газами, растворенными в масле трансформаторов из разных подстанций. В качестве примера рассмотрим трансформаторы подстанций «Сумы» и «Воронеж» Сумьоблэнерго. Зависимости концентраций газов углеводородного ряда от

длительности эксплуатации для этих трансформаторов приведены на рис. 3.

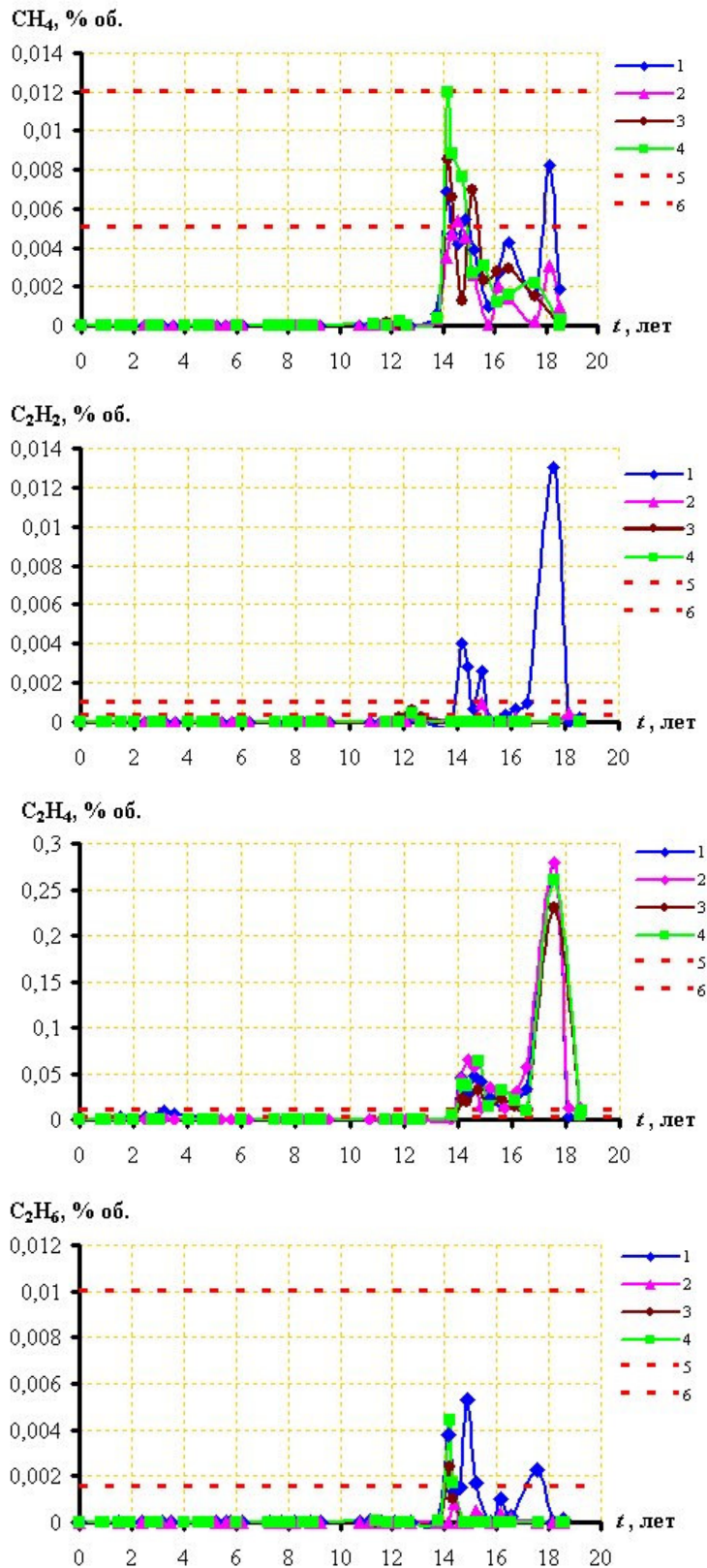


Рис. 3 – Динамика изменений концентраций газов углеводородного ряда во времени для трансформаторов ПС «Воронеж» и ПС «Сумы», Сумыоблэнерго.

- 1 – трансформатор ПС «Воронеж» Т-1; 2 – трансформатор ПС «Воронеж» Т-2;
- 3 – трансформатор ПС «Сумы» Т-1; 2 – трансформатор ПС «Сумы» Т-2;
- 5, 6 – граничные концентрации газов согласно СОУ-НЕС 46.501:2006

Как видно из рисунка концентрации этилена в масле намного превысили граничные значения во всех четырех трансформаторах, также наблюдается повышенное значение концентраций метана. А в трансформаторе ПС «Воронеж» Т-1 наблюдается значительное увеличение концентрации ацетилена. В табл. 4 приведены значения коэффициентов парной корреляции между газами углеводородного ряда для трансформаторов из этих подстанций.

Таблица 4

Значения коэффициентов парной корреляции между газами, растворенными в масле трансформаторов подстанций «Сумы» и «Воронеж»

Корреляция между газами			
СН ₄	С ₂ Н ₂	С ₂ Н ₄	С ₂ Н ₆
СН ₄	С ₂ Н ₂	С ₂ Н ₄	С ₂ Н ₆
ПС «Воронеж» Т1/ ПС «Воронеж» Т2, n=31, ρ _{крит.} 29, 0,95=0,350			
0,871	0,072	0,981	0,187
ПС «Воронеж» Т1/ ПС «Сумы» Т1, n=31, ρ _{крит.} 29, 0,95=0,350			
0,504	-0,097	0,980	0,167
ПС «Воронеж» Т1/ ПС «Сумы» Т2, n=31, ρ _{крит.} 29, 0,95=0,350			
0,520	-0,062	0,976	0,160
ПС «Воронеж» Т2 / ПС «Сумы» Т1, n=31, ρ _{крит.} 29, 0,95=0,350			
0,716	0,102	0,955	0,708
ПС «Воронеж» Т2 / ПС «Сумы» Т2, n=31, ρ _{крит.} 29, 0,95=0,350			
0,804	0,155	0,946	0,716
ПС «Сумы» Т1 / ПС «Сумы» Т2, n=31, ρ _{крит.} 29, 0,95=0,350			
0,830	0,895	0,992	1,000

Как видно из табл. 4 и рис. 3 динамика изменения этилена на диагностируемом промежутке полностью идентична для всех 4-х трансформаторов. Значимая статистическая связь выявлена и для метана. Несколько неожиданные результаты получены для этана, связь между этаном в трансформаторах соседних подстанций («Воронеж» Т-2-«Сумы» Т-1 и «Воронеж» Т-2-«Сумы» Т-2) более тесная, чем в трансформаторах ПС «Воронеж». Таким образом, не прибегая к выводу трансформаторов из эксплуатации можно утверждать, что рост концентраций газов анализируемых трансформаторах вызван внешним воздействием, а следовательно дефекты в трансформаторах отсутствуют.

Анализ корреляционных связей между газами, растворенными в масле различных узлов трансформатора. Часто причинами роста концентраций газов являются дефекты внутри отдельных узлов трансформатора (например, устройства РПН). Газы, попадая из бака расширителя контактора РПН в бак расширителя трансформатора, могут привести к серьезным трудностям при интерпретации результатов ХАРГ. В качестве примера рассмотрим трансформатор ПС «Диканька» Т-2, Полтаваоблэнерго. По результатам ХАРГ в баке трансформатора ПС «Диканька» Т-2 наблюдалось длительное превышение концентрациями метана, этилена и этана граничных значений (см. рис. 4). Критериальные отношения пар газов составили:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 0,00568; \frac{CH_4}{H_2} = 4,924; \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 5,370; \frac{CO_2}{CO} = 8,536,$$

что, согласно СОУ-НЕС 46.501:2006 соответствует термическому дефекту с температурой выше 700°С. Построенный графический образ дефекта, также показал наличие перегрева. Критериальное отношение С₂Н₂/Н₂, характеризующее проникновения газов из РПН в общий бак не превышало 2, что свидетельствует об отсутствии проникновения.

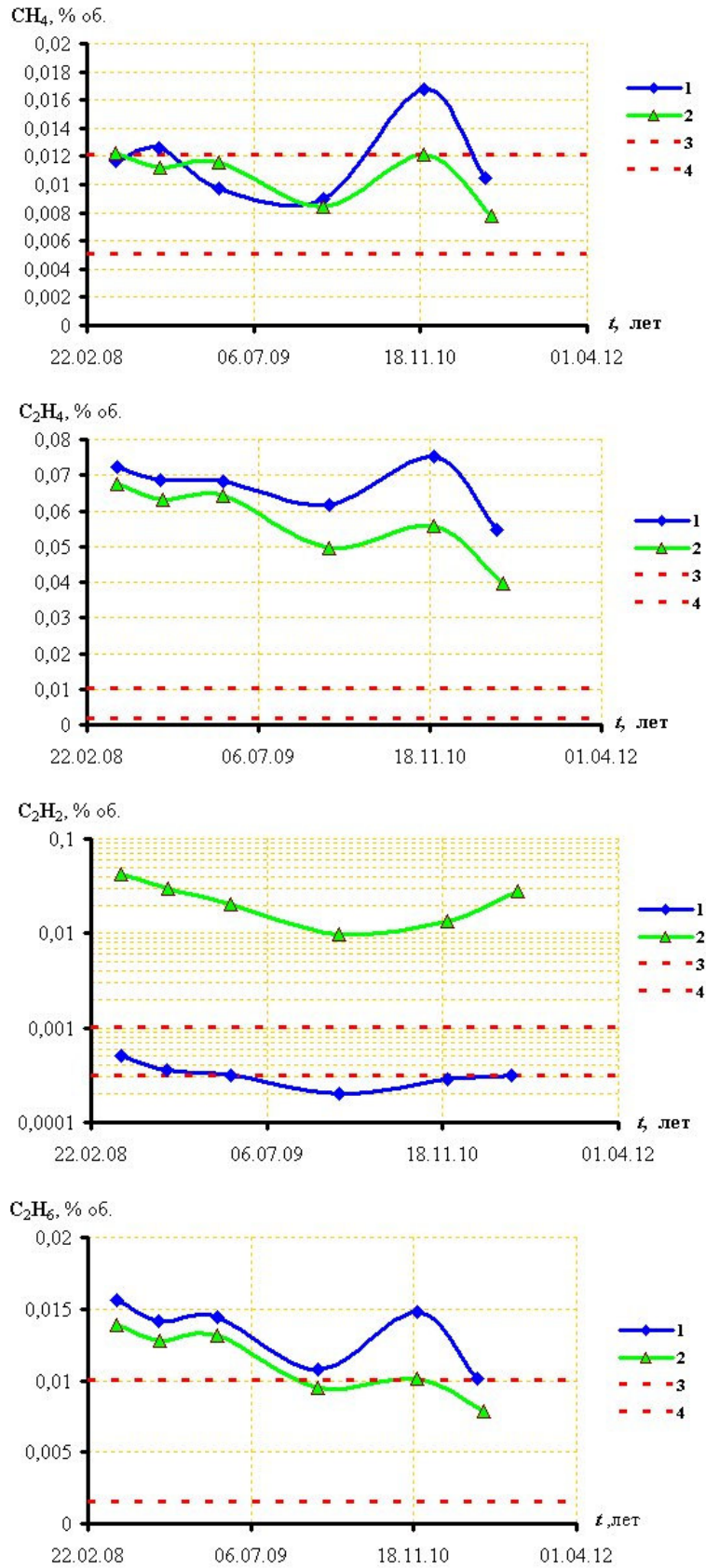


Рис. 4 – Динамика изменений концентраций газов углеводородного ряда во времени в баке РПН и баке трансформатора ПС Диканька» Т-2 Луганскоблэнерго
 1 – бак трансформатора ПС «Диканька» Т-2; 2 – бак РПН трансформатора ПС «Диканька» Т-2;
 3, 4 – граничные концентрации газов согласно СОУ-НБЕ 46.501:2007.

Для выявления причин роста концентраций газов, проанализирована корреляция между газами в трансформаторах Т-2 и Т-1 ПС «Диканька». Результаты анализа приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения коэффициентов корреляции между одноименными газами трансформаторов Т-1 и Т-2 ПС «Диканька», $N=6$, $\rho_{крит, 4, 0,95} = 0,811$

H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2	O_2	N_2
0,631	0,499	-0,218	0,321	0,400	0,756	0,344	0,352	-0,312

Как видно из табл. 5 значимая корреляция между газами трансформаторов Т-1 и Т-2 ПС «Диканька», отсутствуют. Это значит, что причина повышенных концентраций газов в трансформаторе «Диканька» Т-2, находится быстрее всего внутри трансформатора. На основании данных выводов, проведено исследование наличия значимой корреляции между газами в баке трансформатора Т-2 и масла в баке РПН данного трансформатора. Результаты расчета приведены в таблице 6.

Таблица 6

Значения коэффициентов корреляции между одноименными газами в баке трансформатора Т-2 и баке РПН трансформатора Т-2 ПС «Диканька», $N=6$, $\rho_{крит, 4, 0,95} = 0,811$

H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2	O_2	N_2
0,467	0,591	0,943	0,809	0,852	0,924	0,835	0,960	0,795

Как видно из таблицы 6 шесть из девяти газов имеют значимую корреляцию, это значит что изменение концентраций газов в масле бака трансформатора и в масле бака РПН взаимосвязаны, см. рис. 4. Исходя из того, что превышение концентраций растворенных в масле газов в баке трансформатора ПС «Диканька» Т-2 наблюдается в течение последних 11 лет эксплуатации, при этом скорости нарастания газов минимальны или даже отрицательны, причиной повышенных концентраций газов может быть периодически возникающий дефект. Учитывая статистически значимую взаимосвязь в динамике изменения концентраций газов растворенных в баке трансформатора и в баке РПН, можно сделать вывод о том, что повышенные значения концентраций газов в баке трансформатора и в устройстве РПН вызваны одной причиной.

Выводы.

Полученные результаты наглядно продемонстрировали, что анализ корреляционных связей между растворенными в масле газами из соседних трансформаторов, является дополнительным и важным источником диагностической информации, которая позволяет определить причину (внешнюю или внутреннюю) роста концентраций растворенных в масле газов, не прибегая к выводу трансформатора из эксплуатации.

Список литературы:

1. Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. – Київ. – 2007. – 92 с;
2. Шутенко О.В. Анализ влияния аварийных режимов работы электрической сети на изменение концентраций растворенных в масле газов: інформація по XVII міжнародній науково-практичній

конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», (Харків, 20-22 травня 2009 р.) / *О.В. Шутенко*. Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 550 с.

3. *Шутенко О.В.* Дослідження впливу експлуатаційних факторів на результати хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів / *О.В. Шутенко* // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків. – 2008. – Том 1, випуск 73. – С. 45–48.

АНАЛІЗ ПРИЧИН ГАЗОВИДІЛЕННЯ В СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ, НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ЗВ'ЯЗОК МІЖ РОЗЧИНЕНИМИ В МАСЛІ ГАЗАМИ

О. В. Шутенко, Д. М. Баклай, Т. А. Острікова, Н. Ю. Мельник

В статті запропоновано використовувати результати аналізу кореляційних зв'язків, для розпізнавання причин зростання концентрацій газів, розчинених у маслі силових високовольтних трансформаторів. За результатами аналізу експлуатаційних даних, доведена висока ефективність запропонованої методики.

ANALYSIS OF THE CAUSES OF GASSING IN THE POWER TRANSFORMER, BASED ON A STUDY OF CORRELATIONS BETWEEN DISSOLVED IN OIL GASES

O. V. Shutenko, D. N. Baklay, T. A. Ostriкова, N. Y. Melnik

In article, it is offered to use results of the analysis of correlation connections, for recognition of the reasons of growth of concentration of the gases dissolved of oil of power high-voltage transformers. According to the analysis of operational data, proved the high efficiency of the proposed method.