

О. А. Сахно^{1, 2}
С. В. Доморошин²
Л. С. Скрупська¹

МОНІТОРИНГ КОНЦЕНТРАЦІЙ ГАЗІВ, РОЗЧИНЕНИХ У ТРАНСФОРМАТОРНОМУ МАСЛІ, ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ

¹Національний університет «Запорізька політехніка»;

²ТОВ «Енергоавтоматизація»

Проаналізовані особливості застосування стаціонарних газоаналізаторів силового маслonaповненого обладнання в магістральних та розподільчих мережах, а також на підприємствах генерації електричної енергії. Досліджена проблема розбіжностей в значеннях концентрацій розчинених в маслі газів, отриманих від стаціонарних газоаналізаторів в режимі безперервного моніторингу та за результатами аналізів проб трансформаторного масла, виконаних лабораторними хроматографами. Проведений порівняльний аналіз різних принципів вимірювання концентрацій газів, які базуються на двох групах методів: методу хроматографії і методах спектроскопії в інфрачервоному діапазоні за законом Бугера–Ламберта–Бера. Розглянуті особливості застосування, переваги та недоліки основних методів інфрачервоної спектроскопії. Наведено результати лабораторного порівняння аналізу суміші еталонних газів і аналізу газів, отриманих з маслonaповненого трансформаторного обладнання, яке знаходиться в експлуатації, проведеного стаціонарним газоаналізатором і лабораторією. Встановлено, що і лабораторні прилади, і стаціонарні газоаналізатори мають схожі похибки визначення концентрацій газів в підготовлених лабораторних сумішах. Аналізуючи ті самі проби масла, наведені коефіцієнти лінійної регресії, побудованої як функція залежності показів стаціонарного газоаналізатора від показів лабораторного приладу. Зроблені висновки щодо основних причин, які впливають на розбіжність отриманих результатів. Це дозволило визначити доцільність застосування стаціонарних газоаналізаторів, на основі спектроскопії, як пристроїв, що здатні фіксувати тенденцію збільшення концентрацій газів, та приймати рішення щодо позапланових відборів проб масла для лабораторного аналізу на основі їх показів.

Ключові слова: моніторинг технічного стану, стаціонарний газоаналізатор, діагностування, безперервний контроль, розчинені в маслі гази, маслonaповнене трансформаторне обладнання.

Вступ

Контроль та аналіз концентрацій розчинених у трансформаторному маслі газів (АРГ) є ефективним діагностичним інструментом для визначення поточного технічного стану трансформаторного обладнання. При цьому ефективність цього методу давно доведена, і він активно застосовується службами діагностики як магістральних і розподільних мереж, так і генерувальних підприємств. Однак, планово-попереджувальна система обслуговування та ремонтів, яка передбачає періодичний ручний відбір проб масла для лабораторного аналізу не відповідає сучасним світовим тенденціям до створення підстанцій без постійного обслуговуючого персоналу та переходу до обслуговування за реальним технічним станом. Періодичний відбір проб на аналіз має низку недоліків:

- вплив людського фактора (правильність відбору, зберігання, транспортування проб, правильність обробки проб та аналізу);
- вплив терміну проведення аналізу (легколетючі гази, наприклад, водень можуть зникати навіть з добре закупореної ємності з пробєю);
- у разі періодичного аналізу завжди є ймовірність несвоєчасної фіксації розвинення дефекту

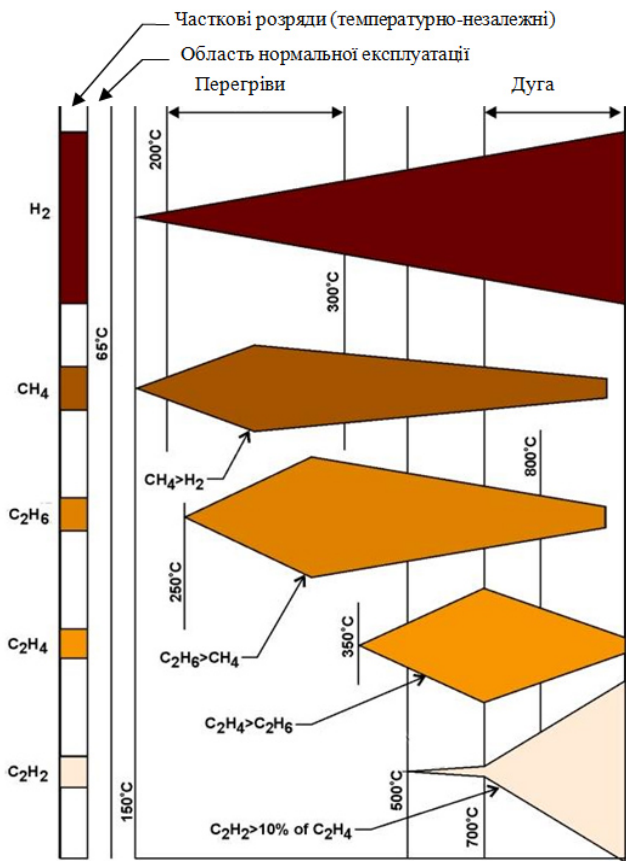


Рис. 1. Результати вимірювань хроматографом об'ємів генерації газів за зростання температури в місці дефекту [6]

бути актуально через вищезазначений факт відсутності позитивного тренда в об'ємах генерації всіх газів зі зростанням температури в місці дефекту.

Методики інтерпретації отриманих значень концентрацій розчинених газів викладені у вітчизняних і зарубіжних стандартах, наприклад, [3], [5], [6], давно відомі і мають позитивний досвід використання. Однак, варто зауважити, що більшість методик розроблено на базі статистичного аналізу експериментальних результатів, отриманих більшою частиною за допомогою хроматографічного аналізу. На рис. 2 подана інформація щодо можливості діагностування різних типів дефектів за концентраціями основних діагностичних газів.

Дефект / Газ	CO	CO ₂	H ₂	C ₂ H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	O ₂	H ₂ O
Пошкодження целюлози									
Пошкодження масла									
Негерметичність баку, прокладок, зварних швів									
Термічні дефекти в целюлозі									
Термічні дефекти в маслі 150...300 °C									
Термічні дефекти в маслі 300...700 °C									
Термічні дефекти в маслі 700 °C									
Часткові розряди									
Дуга									

Рис. 2. Види дефектів та пов'язані з ними газів

Досвід експлуатації стаціонарних газоаналізаторів показує, що часто у порівнянні результатів, що видаються такими приладами, з результатами, отриманими від лабораторних досліджень, існує низка розбіжностей у показах. При тому, що і лабораторні прилади, і стаціонарні газоаналізатори мали схожі похибки визначення концентрацій в лабораторіях на підготовлених тестових сумішах. У цій статті авторами не будуть називатися торгові марки приладів та їх виробники, позаяк вказівка на конкретні прилади для приведення деяких даних може скласти помилкове враження про те,

(особливо враховуючи відомий факт того, що обсяги генерації метану, етилену і етану починають падати після досягнення певних температур в місці дефекту (рис. 1).

У зв'язку з вищезазначеними фактами, в останні 20 років на ринку почали з'являтися прилади для моніторингу (умовно безперервного контролю) концентрацій розчинених в маслі газів. На сьогодні рекомендації щодо оснащення трансформаторів стаціонарними газоаналізаторами викладені в роботах [1]—[3], проте відсутні рекомендації щодо інтерпретації показів таких приладів і пояснення застосовуваних у них методів, а також причин можливих відмінностей від показів лабораторних аналізів.

Метою роботи є дослідження особливостей застосування стаціонарних аналізаторів, з метою ефективного виявлення дефектів, що розвиваються в трансформаторному обладнанні в процесі їхнього використання.

Результати дослідження

Контроль концентрацій газів у режимі моніторингу дозволяє не тільки зафіксувати наявність дефекту в трансформаторному обладнанні, а й зафіксувати динаміку зміни концентрацій діагностичних газів у часі, що може

що проблема притаманна конкретному типу приладу. Кожному типу приладу притаманні свої характерні проблеми, а проблема, що описується в цій статті може вважатися як загальна.

В табл. 1 наведено результати лабораторних досліджень, наданих авторам одним з виробників газоаналізаторів. Ці дані отримані в незалежній лабораторії TJ/H2b Analytical Services Inc., що виконує послуги з аналізу проб масла згідно зі стандартом ASTM D-3612. Покази лабораторних приладів і стаціонарного газоаналізатора отримані за еталонними сумішами, що містять чисті «діагностичні» гази (CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6). Також у таблиці подано коефіцієнт лінійної регресії, побудованої як функція залежності показів стаціонарного газоаналізатора від показів лабораторного приладу тих самих проб масла. Для всіх газів отримані прямо-пропорційні лінійні залежності. Всього проведено 368 порівнянь.

Таблиця 1

Результати порівняння показів лабораторних приладів і стаціонарного газоаналізатора еталонних сумішей

Газ	Середня відносна похибка (приведена до значення) лабораторного вимірювання, %	Середня відносна похибка (приведена до значення) стаціонарного газоаналізатора, %	Формула регресії (y — показ стаціонарного аналізатора; x — показ з лабораторії)
CO	6,6	4,5	$y = 0,9926x + 21,154$
CO_2	14,2	4,9	$y = 0,9816x + 52,468$
H_2	9,4	2,5	$y = 0,9967x + 2,0499$
CH_4	6,6	6,3	$y = 0,9957x + 2,1036$
C_2H_2	5,4	11,4	$y = 0,9993x + 0,6551$
C_2H_4	5,2	11,4	$y = 0,9994x + 0,7826$
C_2H_6	5,7	6,7	$y = 1x + 0,2984$

Таблиця 2

Результати порівняння показників аналізованого масла з трансформаторного обладнання, що знаходиться в експлуатації

Газ	Покази концентрацій розчинених газів, ppm								Формула регресії (y — покази стаціонарного аналізатора, x — покази з лабораторії)
	Бак № 1		Бак № 2		Бак № 3		Бак № 4		
	Газоаналізатор	Лабораторія	Газоаналізатор	Лабораторія	Газоаналізатор	Лабораторія	Газоаналізатор	Лабораторія	
H_2	1	4,5	14	20,8	8	4,5	5	6,9	$y = 0,5939x + 1,5507$
CO	247	270,4	246	304,7	3	32	68	76	$y = 0,9036x - 13,307$
CO_2	1807	1647,5	558	239,3	280	61,6	1178	1183	$y = 0,8869x + 261,41$
CH_4	116	27,7	103	34,5	0	0,4	49	24,9	$y = 3,2009x - 3,0207$
C_2H_2	0	0	0	0	0	0	0	0	—
C_2H_4	45	2,4	21	1	0	0	10	12,6	$y = -0,4827x + 20,931$
C_2H_6	85	6	221	6,9	0	0,1	0	6,9	$y = 15,904x - 2,623$
N_2	32260	16485,4	79180	15876,3	13090	4249,5	8110	5800	$y = 3,8556x - 7720,2$
O_2	10004	1428,4	14348	1083,8	11345	1375,1	3957	4000	$y = -3,0471x + 15922$

З табл. 1 і 2 випливає, що найбільші розбіжності в показах в експлуатаційному контролі отримані для трьох газів — CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 . Також у деяких випадках спостерігалось завищення показів вуглекислого газу (CO_2) у стаціонарного аналізатора порівняно з лабораторією.

Варто зазначити, що в лабораторних умовах для отримання значень концентрацій розчинених газів, зазвичай, використовуються хроматографи, а наявні на ринку стаціонарні газоаналізатори засновані в основному на двох групах методів: хроматографія і методи, основані на поглинанні молекулами газів випромінювання в ІК-діапазоні згідно з законом Бугера–Ламберта–Бера (далі спектроскопія). Існує декілька видів методів спектроскопії:

1) недиспергуючий інфрачервоний аналізатор (nondispersiveinfrared, NDIR) — спектроскопічний сенсор не містить диспергуючого пристрою (розкладаючого спектр випромінювання). Складається з джерела інфрачервоного випромінювання, камери з аналізованою газовою сумішшю, світлофільтра (поглинає весь спектр, за винятком тієї частини, яку має поглинути газ) і детектора.

Зазвичай у детекторі присутній паралельний оптичний канал, в якому стоїть камера з газом, який не має ефекту поглинання випромінювання в ІК-діапазоні, наприклад, з азотом. За різницею між зафіксованою інтенсивністю випромінювання через досліджувану суміш і еталонний газ визначають концентрацію конкретного газу в суміші;

2) фотоакустичний аналізатор (Photoacoustic Spectroscopy (PAS)) — молекули газу, поглинаючи електромагнітне випромінювання, збуджуються до вищого електронного, коливального або обертового квантового стану. Зазвичай, вихід з цього стану відбувається або за рахунок флуоресценції, або за рахунок зіткнень, які викликають підвищення температури газу. Інтенсивність теплових коливань залежить від кількості поглинутої енергії (тобто від кількості молекул певного газу). Акустичну хвилю від цих коливань у газовій фазі можна виявити за допомогою чутливого мікрофона;

3) інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є (FTIR) — від двох попередніх цей метод відрізняється тим, що замість монохроматичного променя (що складається тільки з однієї довжини хвилі) використовується промінь, що містить одразу кілька частот, а після детектування променя, що пройшов через камеру з досліджуваною сумішшю газів і еталонною відбувається математичне розкладання променя на складові і розрахунок поглинання по кожній спектральній складовій, тобто частина повторних вимірювань з різними фільтрами замінена на математичну обробку.

4) спектроскопія в ближній інфрачервоній області (БІК-спектроскопія, near-infrared spectroscopy, NIR) — її відмінність від вищезазначених методів полягає у використанні діапазону довжин хвиль випромінювання від 0,78 до 2,5 мкм. Зазвичай цей метод має дешевшу реалізацію і меншу точність, порівняно з описаними вище методами.

Прилади та методи контролю суми горючих газів, із застосуванням паливної комірки, та інші прилади, що контролюють один або два гази з використанням різних технологій, основаних на зміні провідності металів, напівпровідників тощо, в цій статті не розглядаються.

Принцип роботи хроматографів полягає в тому, що суміш виділених з масла газів «розділяється» шляхом продування суміші з використанням інертного газу-носія через одну або кілька хроматографічних колон. Детектор наприкінці колони реєструє кількість газу, при цьому кожний газ залишає колону з чітко визначеним часом затримки, характерним для нього. Концентрація розраховується приладом на основі порівняння показів детектора у разі пропускання досліджуваної суміші і відомої «калібрувальної» суміші.

Всі прилади призначені для реалізації однакового завдання (аналіз концентрацій розчинених газів в маслі). Основні відмінності полягають у принципі функціонування цих приладів. Особливості хроматографів: використання витратного матеріалу — газу-носія і калібрувального газу. Що водночас також є і його перевагами: замкнута система, що забезпечує високу точність і повторюваність результатів. Особливістю спектроскопії є те, що двохатомні молекули газів (водень, кисень) не мають абсорбційних частот в інфрачервоному діапазоні і не можуть бути вимірними. Питання з реєстрацією двохатомних газів вирішено в таких приладах установкою додаткових датчиків (електрохімічних, термохімічних, резистивних тощо). Перевагою таких приладів є відсутність зовнішнього балона з газом-носієм і балона з калібрувальним газом.

Важливим моментом є те, що за використання тестових лабораторних сумішей, всі стаціонарні газоаналізатори показують результати, що задовольняють заявленим у своїх технічних специфікаціях характеристикам. Але на практиці, в реальній експлуатації обладнання, в його маслі утворюються не тільки зазначені в таблиці 2 «діагностичні» гази, але й можуть міститися і різноманітні вуглеводневі гази, приміром, пропан (C_3H_8), пропілен (C_4H_6), 1-бутен (C_4H_8) та інші газові сполуки, спирти, кислоти. При цьому слід звернути увагу, що спектри поглинання, наприклад, метану (CH_4), пропану (C_3H_8) і пропілену (C_4H_6) близькі, також близькі спектри поглинання молекул вуглекислого газу (CO_2) і води (H_2O). Детальніше про спектри поглинань написано в спеціалізованих роботах і базі даних [7]—[9].

Методи спектроскопії (включаючи NDIR, NIR, PAS, FTIR і т. д.) не поділяють газові складові, а оцінюють концентрації конкретних газів у загальній суміші. «Паразитні» (ті, які прилад не повинен фіксувати) сполуки можуть впливати на вимірювання, викликаючи додаткове ІК-поглинання в тих самих спектральних зонах, які використовуються для оцінки концентрацій «діагностичних» газів. Впливи «паразитних» сполук можуть призвести до значних відхилень з негативними і позитивними зміщеннями у показах приладів у порівнянні з показами лабораторних хроматографів, під час реальної експлуатації маслонаповненого обладнання. Однак, облік цих «паразитних» з'єднань під час діагностики може мати і позитивний ефект, після достатнього вивчення цього питання.

Таблиця 3

Коефіцієнти розчинності газів в маслах за даними ІЕС 60567

Щільність масла, кг/м ³	Нафтові масла	Парафінові масла
	0,864	0,849
Гази	Коефіцієнти розчинності газів за температури 70 °С	
H ₂	0,074	0,036
O ₂	0,17	0,18
N ₂	0,11	0,12
CH ₄	0,44	0,37
CO	0,12	0,073
CO ₂	1,02	0,64
C ₂ H ₂	0,93	0,89
C ₂ H ₄	1,47	1,27
C ₂ H ₆	2,09	1,73
C ₃ H ₆	5,04	4,36
C ₃ H ₈	5,37	4,72

Також на величини показів можуть впливати конструктивні рішення аналізаторів: метод виділення газів з масла (наприклад, вакуумний насос або мембрана), застосування різних типів детекторів (до прикладу, акустичний або оптичний). Потрібно враховувати і те, що коефіцієнти розчинності газів залежать не тільки від температури масла, але і від його стану та типу.

Наприклад, в табл. 3 наведені дані залежності коефіцієнтів розчинності від щільності масла за температури 70 °С, за даними, наведеними в ІЕС 60567 [10], що також може впливати на результати порівнянь концентрацій газів, виконаних різними приладами для одного зразка в експлуатації.

Висновки

Досліджено можливі причини розбіжностей результатів аналізу концентрацій газів, розчинених в маслі, виконаних стаціонарними газоаналізаторами та лабораторними хроматографами. Питання про те, чи потрібно враховувати концентрації, наприклад, пропану (C₃H₈), пропілену (C₄H₆), 1-бутену (C₄H₈) та низки інших газових сполук під час діагностики, вимагає вивчення, позаяк ці сполуки також утворюються внаслідок впливу температурних і дугових процесів в ізоляції обладнання. Для обґрунтованих висновків з цього питання наразі не вистачає експериментальних даних. З досвіду впровадження стаціонарних газоаналізаторів ясно, що покази хроматографів і спектроскопів в експлуатації для того самого зразка масла можуть відрізнятися, особливо для обладнання, що відпрацювало значну частку свого ресурсу. При цьому очевидно, що всі прилади здатні зафіксувати тенденцію погіршення стану обладнання, що і є основним завданням безперервного контролю (моніторингу). Тому, враховуючи переваги режиму моніторингу, застосування таких приладів для запобігання аварійних випадків доцільно. Однак, варто зазначити, що наявні методики інтерпретації результатів аналізу розчинених газів і граничні критерії розроблені для даних, отриманих від лабораторних хроматографів, а не від стаціонарних газоаналізаторів (більше того, не від тих, що працюють на принципі спектроскопії). Якщо робити акцент на необхідності ідентифікації типу дефекту та інтерпретації результатів концентрацій розчинених газів на основі методів, викладених у стандартах, то найправильнішим рішенням буде аналіз зразка масла на лабораторному хроматографі, відібраному за сигналом від приладу моніторингу. Зауважимо, що в організації моніторингу призначення приладів полягає у відстеженні характеру зміни концентрацій газів, а не в точному їх вимірюванні. Тому, різке підвищення швидкості наростання газів, зафіксоване приладом, є сигналом до позапланового відбору проб для аналізу на лабораторному хроматографі та застосування методик інтерпретації згідно з нормативними документами. При цьому необхідно проводити подальші дослідження з аналізу концентрацій газів, розчинених в маслі і зафіксованих в режимі моніторингу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] WANO SOER 2011-1. *Сообщение о значительном опыте эксплуатации*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cfin.ru > forum > attachmen> .
- [2] CIGRE WG D1.01 (TF 15), "Report on Gas Monitors for Oil-Filled Electrical Equipment," *Technical Brochure*, # 409, Feb. 2010.
- [3] СОУ-Н ЕЕ 46.501.2006, *Диагностика маслонаполненного трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа свободных газов, отобранных из газового реле, и газов, растворенных в трансформаторном масле*. [Дата введения 29.12.2006]. Киев: ОЕП «ГРІФРЕ», 92.
- [4] *FIST 3-30. Transformer Maintenance*. Facilities instructions, standards, and techniques. US Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 2000. [Electronic resource]. Available: https://www.usbr.gov/power/data/fist/fist3_30/fist3_30.pdf

- [5] IEEE C 57-104. *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*. [Electronic resource]. Available: <https://pdfcoffee.com/ieee-c57104-2019pdf-5-pdf-free.html> .
- [6] IEC 60599. “Mineral oil-impregnated electrical equipment in service,” *Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis*. [Electronic resource]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/5cbbf2dc-01c5-4437-868d-bd00afffd318/en-60599-1999> .
- [7] D. Popa, and F. Udrea, “Towards Integrated Mid-Infrared Gas Sensors,” *Sensors*, № 19 (9), 2076 c., 2019. <https://doi.org/10.3390/s19092076> .
- [8] I. E. Gordon, et al., “The HITRAN2016 molecular spectroscopic database,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 203: 3-69. 2017. Bibcode: 2017JQSRT.203....3G. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.06.038> .
- [9] *The HITRAN Database*. [Electronic resource]. Available: <https://hitran.org/> .
- [10] IEC 60567:2011, *Oil-filled electrical equipment – Sampling of gases and analysis of free and dissolved gases – Guidance*. [Electronic resource]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/04d72cde-a3ae-46f0-b5fe-fe25c5d566f8/en-60567-2011> .

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.10.2021

Сакно Олександр Анатолійович — канд. техн. наук, доцент кафедри електричних та електронних апаратів Національного університету «Запорізька політехніка»; виконавчий директор — головний електрик, e-mail: a.asakhno@yahoo.com ;

Доморошин Сергій Вікторович — інженер-електрик 1 категорії відділу систем моніторингу.

ТОВ «Енергоавтоматизація», Запоріжжя;

Скруська Людмила Степанівна — старший викладач кафедри електричних та електронних апаратів.

Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя

O. A. Sakhno^{1,2}
S. V. Domoroshchyn²
L. S. Skrupska¹

Monitoring of Gas Concentrations Dissolved in Transformer Oil During Operation of Power Transformer Equipment

¹National University “Zaporizhzhia Polytechnic”;

²Society with limited responsibility “Energy Automation”

The peculiarities of application of stationary gas analyzers of power oil of filled equipment in main and distribution networks, as well as at power generation enterprises are analyzed. The problem of discrepancies in the values of concentrations of gases dissolved in oil obtained from stationary gas analyzers in the mode of continuous monitoring and obtained by the results of tests of transformer oil samples performed by laboratory chromatographers is investigated. A comparative analysis of different principles for measuring gas concentrations based on two groups of methods: chromatography method and infrared spectroscopy methods by Bouguer–Lambert–Beer law. The features of application, advantages and disadvantages of the main methods of infrared spectroscopy are considered. The results of the laboratory comparison of the analysis of the mixture of reference gases and the analysis of gases obtained from oil-filled transformer equipment, which is in operation, conducted by a stationary gas analyzer and laboratory. It is established that both laboratory devices and stationary gas analyzers have similar errors in determining gas concentrations in prepared laboratory mixtures. The coefficients of linear regression, constructed as a function of dependence of the indications of a stationary gas analyzer on the indications of a laboratory device, are given, when analyzing the same oil samples. Conclusions were made about the main reasons that affect the discrepancy of the obtained results, which allowed to determine the feasibility of using stationary gas analyzers, on the basis of spectroscopy, as devices capable of fixing the trend of increasing gas concentrations, and to make decisions on unscheduled oil samples for laboratory analysis based on their indications.

Keywords condition monitoring, online gas monitor, diagnostics, online monitoring, gases dissolved in oil, oil-filled transformer equipment.

Sakhno Oleksandr A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Electrical and Electronic Devices; Executive Director — Chief electrician, e-mail: a.asakhno@yahoo.com ;

Domoroshchyn Serhii V. — Electrical Engineer of Monitoring Department;

Scrupska Lyudmila S. — Senior Lecturer of the Chair of Electrical and Electronic Devices

А. А. Сахно^{1,2}
С. В. Доморошин²
Л. С. Скрупская¹

Мониторинг концентраций газов, растворенных в трансформаторном масле, при эксплуатации силового трансформаторного оборудования

¹Национальный университет «Запорожская политехника»;

²ООО «Энергоавтоматизация»

Проанализированы особенности применения стационарных газоанализаторов силового маслonaполненного оборудования в магистральных и распределительных сетях, а также на предприятиях генерации электрической энергии. Исследована проблема расхождений в значениях концентраций растворенных в масле газов, полученных от стационарных газоанализаторов в режиме непрерывного мониторинга и по результатам анализов проб трансформаторного масла, выполненных лабораторными хроматографами. Проведен сравнительный анализ различных принципов измерения концентраций газов, базирующихся на двух группах методов: метода хроматографии и методах спектроскопии в инфракрасном диапазоне по закону Бугера–Ламберта–Бера. Рассмотрены особенности применения, преимущества и недостатки основных методов инфракрасной спектроскопии. Приведены результаты лабораторного сравнения анализа смеси эталонных газов и анализа газов, полученных из маслonaполненного трансформаторного оборудования, находящегося в эксплуатации, которое проведено стационарным газоанализатором и лабораторией. Установлено, что и лабораторные приборы, и стационарные газоанализаторы имеют похожие погрешности определения концентраций газов в подготовленных лабораторных смесях. Приведены коэффициенты линейной регрессии, построенной как функция зависимости показаний стационарного газоанализатора от показаний лабораторного прибора, при анализе одних и тех же проб масла. Сделаны выводы относительно основных причин, влияющих на расхождение полученных результатов, что позволило определить целесообразность применения стационарных газоанализаторов, на основе спектроскопии, в качестве устройств, способных фиксировать тенденцию увеличения концентраций газов, и принимать решения по внеплановым отборам проб масла для лабораторного анализа на основе их показаний.

Ключевые слова: мониторинг технического состояния, стационарный газоанализатор, диагностирования, непрерывный контроль, растворенные в масле газы, маслonaполненное трансформаторное оборудование.

Сахно Александр Анатольевич — канд. техн. наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов, исполнительный директор — главный электрик, e-mail: a.asakhno@yahoo.com ;

Доморошин Сергей Викторович — инженер-электрик 1 кат. отдела систем мониторинга;

Скрупская Людмила Степановна — старший преподаватель кафедры электрических и электронных аппаратов