

УДК 532.546

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

^{1,2}Баширов М.Г., ^{1,2}Хисматуллин А.С., ²Салиева Л.М., ²Зайнакова И.Ф.

¹ГАНУ «Институт прикладных исследований Республики Башкортостан»;

²Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
Салават, e-mail: lsalieval@mail.ru

Современное предприятие нефтегазового комплекса представляет сложную техническую систему опасных производственных объектов, одним из элементов которой являются пожароопасные силовые масляные трансформаторы, техническое состояние которых влияет на непрерывность и безопасность технологических процессов. В работе представлен анализ аварийных ситуаций на предприятиях, рассмотрены методы идентификации технического состояния силовых масляных трансформаторов. Для совершенствования хроматографического метода предложен интегральный критерий оценки технического состояния трансформаторов в производственных условиях, формируемый искусственной нейронной сетью из совокупности диагностических параметров, полученных по результатам хроматографического анализа трансформаторного масла и спектрального метода. Для обеспечения надежности и безопасности силового электрооборудования разработан алгоритм идентификации технического состояния, позволяющий осуществить переход на систему обслуживания и ремонта трансформаторов по фактическому состоянию.

Ключевые слова: силовой масляный трансформатор, оценка технического состояния, хроматографический метод, алгоритм, интегральный критерий

IMPROVEMENT OF A CHROMATOGRAPHIC METHOD OF THE ASSESSMENT OF TECHNICAL CONDITION OF POWER OIL TRANSFORMERS

^{1,2}Bashirov M.G., ^{1,2}Khismatullin A.S., ²Salieva L.M., ²Zaynakova I.F.

¹The state independent scientific institution «Institute of applied researches of Republic Bashkortostan»;

²Ufa State Petroleum Technological University, Salavat Branch, Salavat, e-mail: lsalieval@mail.ru

Modern oil and gas companies is a complex technical system of hazardous production facilities, one of the elements of which are flammable Power oil transformers, the technical condition which affects the continuity and safety of technological processes. The paper presents an analysis of accidents in enterprises, the methods of identification of technical condition of power oil transformers. To improve chromatographic method proposed integral criterion for assessing the technical condition of transformers in industrial environments, the artificial neural network formed of a plurality of diagnostic parameters derived by the results of the chromatographic analysis of transformer oil and the spectral method. To ensure the safety and reliability of electrical power algorithm identifying technical condition that allows the transition to a system of maintenance and repair of transformers for the actual condition.

Keywords: power oil transformer, assessment of the technical condition, chromatographic method, the algorithm, integral criterion

Современное предприятие нефтегазового комплекса представляет сложную техническую систему опасных производственных объектов, одним из элементов которой являются пожароопасные силовые масляные трансформаторы, техническое состояние которых влияет на непрерывность и безопасность технологических процессов. На предприятиях нефтегазового производства отказ силовых масляных трансформаторов может привести к созданию аварийных ситуаций, сопровождающихся значительным экономическим и экологическим ущербом. Для оценки технического состояния масляных трансформаторов в настоящее время применяется целый комплекс

методов и средств, использующих различные диагностические параметры, одним из наиболее информативных методов является хроматографический анализ трансформаторного масла. Но для комплексной оценки и управления техническим состоянием и безопасностью эксплуатации силовых трансформаторов необходимо совершенствование хроматографического метода с применением критериев, позволяющих интегрированно оценивать их текущее техническое состояние.

По данным МЧС России за последний год около 25 % пожаров в стране происходят по электротехническим причинам, включая возникшие при аварийных ситуациях

на промышленных предприятиях. Анализ данных Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору показывает, что основную опасность для предприятий нефтегазовой отрасли представляют пожары, взрывы и выбросы опасных веществ. Трансформаторы занимают третье место по числу пожаров и аварий, ущерб при этом составляет миллионы рублей, а зачастую и приводит к гибели людей. Рассмотрим основные причины выхода из строя силовых трансформаторов (рис. 1). Около 34% аварийных остановок происходит из-за повреждений вводов, значительную долю повреждений составляют повреждения обмоток (28%) и РПН (около 25%).

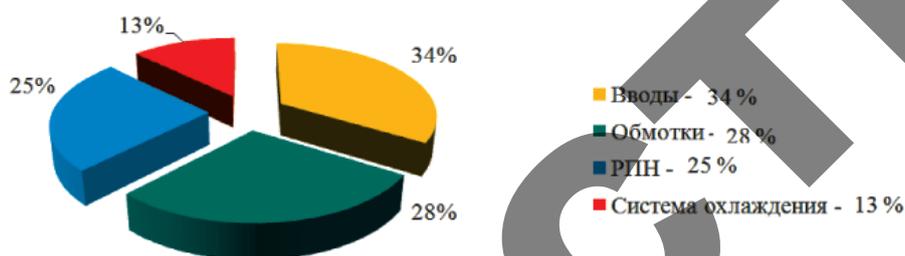


Рис. 1. Соотношение характерных повреждений силовых трансформаторов

Одним из перспективных методов оценки технического состояния силовых трансформаторов является хроматографический анализ, позволяющий по результатам обследования трансформаторного масла на наличие растворенных газов и их концентрацию выявлять дефекты оборудования на ранней стадии их развития, определять характер дефектов и степень имеющихся повреждений. Достоинством этого метода является дистанционная диагностика трансформатора, т.к. отбор пробы масла производится без отключения оборудования.

Для проведения экспериментальных исследований взаимосвязи растворенных в трансформаторном масле газов и их концентрации с характерными повреждениями, и разработки методики хроматографического диагностирования разработана экспериментальная установка в соответствии с требованиями «Межотраслевых правил по охране труда», «Правил устройства электроустановок», «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей», РД 34.46.303-98 «Методические указания по подготовке и проведению хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов». В качестве объекта исследования выбрано трансформаторное масло из бака трансформатора 1Т напряжением 110 кВ.

По результатам исследований закономерности взаимосвязи диагностических па-

раметров с характерными повреждениями маслонаполненного электрооборудования в качестве диагностических параметров выбраны результаты хроматографического и спектрального методов оценки технического состояния электрооборудования. Параметры гармонических составляющих токов и напряжений использованы для оценки технического состояния в работах В.Н. Шикунова, Д.А. Заварихина, И.В. Прахова и др. [1–14]. Практическая реализация методов диагностики, основанных только на анализе параметров гармонических составляющих токов и напряжений или хроматографическом диагностировании, для комплексной оценки технического состояния силовых масляных

трансформаторов недостаточна. Поэтому в работе предлагается совершенствование хроматографического метода путем применения совокупности диагностических параметров, полученных с помощью хроматографического и спектрального анализа, и представление их в интегральном критерии.

В процессе хроматографического анализа с помощью программы «Meta Transformer» проведена диагностика развивающихся дефектов (рис. 2), которая показала наличие двух вероятных дефектов: частичные разряды с низкой плотностью энергии и термический дефект выше 700°C (рис. 3, 4).

Количественная оценка технического состояния трансформаторов осуществляется по совокупности диагностических параметров, представленных в виде интегрального критерия I, формируемого искусственной нейронной сетью с использованием программного обеспечения на основе разработанного алгоритма оценки технического состояния трансформаторов [7]. Для формирования интегрального критерия оценки технического состояния силовых трансформаторов наиболее информативными основными диагностическими параметрами являются полученные в результате спектрального анализа значения коэффициентов гармонических составляющих тока K_{In} и напряжения K_{Un} с 3 по 11 гармоники включительно и соответствующие им углы

сдвига по фазе $\varphi_{ui(n)}$ и выявленные в результате хроматографической диагностики трансформаторного масла (ХАРГ) концентрации газов CH_2 , CH_4 , CO , CO_2 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 .

Тогда интегральный критерий I, формирующий количественную оценку технического состояния силового масляного трансформатора будет иметь вид

$$I = F(K_{InA}, K_{UnA}, \varphi_{ui(n)A}, K_{InB}, K_{UnB}, \varphi_{ui(n)B}, K_{InC}, K_{UnC}, \varphi_{ui(n)C}, C_{H_2}, C_{CH_4}, C_{CO}, C_{CO_2}, C_{C_2H_6}, C_{C_2H_4}, C_{C_2H_2}) =$$

$$= f\left(w_{j0} + \sum_{i=1}^m (w_{InAi} K_{InAi} + w_{UnAi} K_{UnAi} + w_{ui(n)Ai} \varphi_{ui(n)Ai} + w_{InBi} K_{InBi} + w_{UnBi} K_{UnBi} + w_{ui(n)Bi} \varphi_{ui(n)Bi} + w_{InCi} K_{InCi} + w_{UnCi} K_{UnCi} + w_{ui(n)Ci} \varphi_{ui(n)Ci} + w_{H_2i} C_{H_2i} + w_{CH_4i} C_{CH_4i} + w_{COi} C_{COi} + w_{CO_2i} C_{CO_2i} + w_{C_2H_6i} C_{C_2H_6i} + w_{C_2H_4i} C_{C_2H_4i} + w_{C_2H_2i} C_{C_2H_2i})\right).$$

где w – весовые коэффициенты нейронной сети для соответствующих диагностических параметров; K_p , K_u – коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения; C – концентрации газов, полученных в результате ХАРГ.

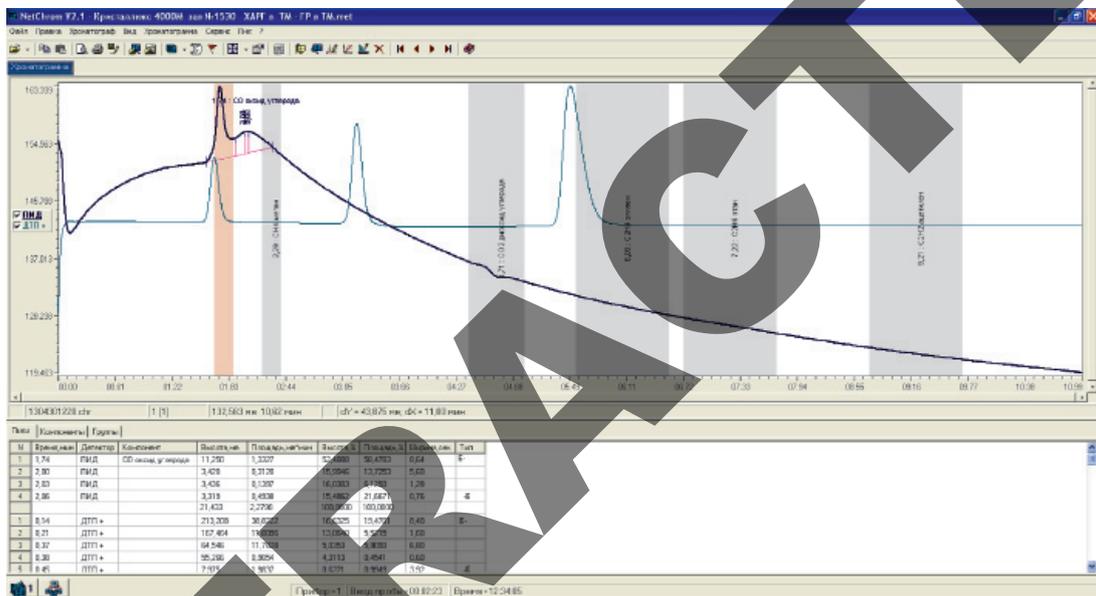


Рис. 2. Результаты хроматографического анализа диагностирования масла из бака трансформатора 110 кВ с помощью программы «Meta Transformator»

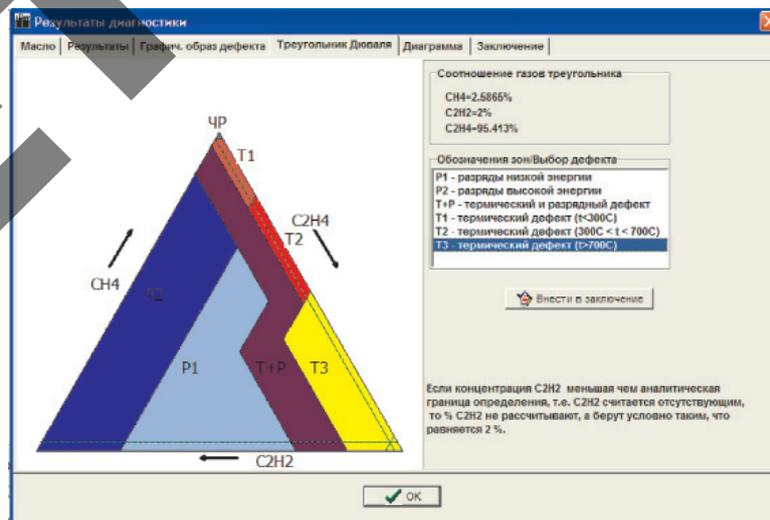


Рис. 3. Результаты диагностики трансформаторного масла с помощью программы «Meta Transformator»

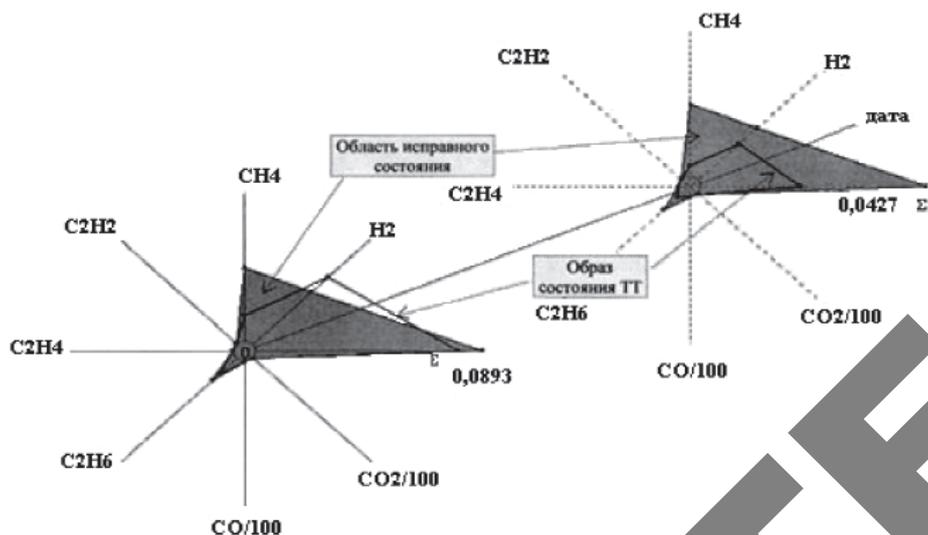


Рис. 4. Лепестковая диаграмма результатов АРГ. Значения интегрального критерия I , по аналогии с методом экспертных оценок, соответствуют шести уровням: в интервале 0...5% соответствуют уровню «Отличное» (ухудшений не обнаружено), в интервале 6...15% – уровню «Очень хорошее» (незначительное ухудшение состояния отдельных узлов), в интервале 16...30% – «Хорошее» (ухудшение состояния отдельных узлов), в интервале 31...50% – «Нормальное» (значительное ухудшение состояния отдельных узлов), в интервале 51...70% – «Плохое» (существенное ухудшение трансформатора), в интервале 71...100% – «Очень плохое» (обширное повреждение трансформатора).

Предлагается отображать состояние объекта на основе результатов АРГ (анализа растворённых в трансформаторном масле газов) в виде 8-лепестковой диаграммы, где по 7 лучам откладываются значения концентраций газов (рис. 4), а по восьмому лучу – их сумма в абсолютных значениях (объемных процентах или ppm). Параметры откладываются от центра в следующем порядке: вертикальная ось вверх – CH_4 , далее по ходу часовой стрелки по радиальным осям через 45 градусов: H_2 , сумма газов, $\text{CO}_2 \times m$, $\text{CO} \times m$, C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 . Концентрации откладываются от окружности, показывающей границу обнаружения газов средствами измерения, которая для удобства принята равной 2 ppm по всем газам.

Полученные при этом точки соседних радиальных лучей соединяются отрезками прямых. В результате получаем образ состояния диагностируемого объекта.

Список литературы

1. Баширов М.Г., Шикун В.П. Диагностика электрических сетей и электрооборудования промышленных предприятий – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. – 220 с.
2. Баширов М.Г., Минлибаев М.Р., Хисматуллин А.С. Повышение эффективности охлаждения силовых масляных трансформаторов // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2014. – № 2. – С. 347–357.
3. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Хуснутдинова И.Г. Применение барботажа в системе охлаждения силовых трансформаторов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 3. – С. 29–32.

вых трансформаторов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 3. – С. 29–32.

4. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Камалов А.Р. Исследование изменения теплопроводности масла при барботаже в системе охлаждения силовых трансформаторов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 338.

5. Баширов М.Г., Миронова И.С. Разработка интегральных критериев для оценки технического состояния и ресурса машинных агрегатов нефтегазового производства // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2015. – Т. 1. – С. 46–55.

6. Гольберт К.А. Введение в газовую хроматографию / К.А. Гольберт, М.С. Вигдергаус. – М.: Изд-во Химия, 1990 – 340 с.

7. Миронова И.С., Акшенцева А.А. Совершенствование хроматографического метода оценки технического состояния и прогнозирование ресурса силовых трансформаторов // Наука и образование в жизни современного общества: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 14 томах. – 2015. – С. 89–90.

8. Хисматуллин А.С., Баширов М.Г., Исхаков Р.Р. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015614073 Программа анализа выходных данных эксперимента по определению коэффициента температуропроводности трансформаторного масла с всплывающими элегазовыми пузырьками.

9. Хисматуллин А.С., Баширов М.Г., Исхаков Р.Р. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015614072. Программа записи выходных данных эксперимента трансформаторного масла с всплывающими элегазовыми пузырьками.

10. Хисматуллин А.С. Теоретическое и экспериментальное исследование теплопереноса в жидкости с газовыми пузырьками: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Уфа, 2010. – С. 34–42.

11. Хисматуллин А.С., Камалов А.Р. Повышение эффективности системы охлаждения мощных силовых трансформаторов // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 6–2. – С. 316–319.
12. Хисматуллин А.С., Гареев И.М. Исследование переноса интегрального параметра в жидкости с газовыми пузырьками // *Экологические системы и приборы*. – 2015. – № 7. – С. 38–42.
13. Хисматуллин А.С. Расчет теплового поля в силовых масляных трансформаторах с элегазовым охлаждением // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. – 2015. – № 2. – С. 23–30.
14. Филиппов А.И. Установка для исследования коэффициента температуропроводности в жидкости / А.И. Филиппов, М.Р. Минлибаев, А.С. Хисматуллин // *Новые промышленные технологии*. – 2010. – № 2. – С. 62–63.
15. Nigmatulin R.I., Filippov A.I., Khismatullin A.S. Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2012. – Т. 19. – С. 589.

References

1. Bashirov M.G., Shikunov V.P. Diagnostika jelektricheskikh setej i jelektroroborudovanija promyshlennyh predpriyatij. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2004. 220 p.
2. Bashirov M.G., Minlibaev M.R., Hismatullin A.S. Povysheniej effektivnosti ohlazhdenija silovyh masljanyh transformatorov // *Jelektronnyj nauchnyj zhurnal Neftegazovoe delo*. 2014. no. 2. pp. 347–357.
3. Bashirov M.G., Hismatullin A.S., Husnutdinova I.G. Primenenie barbotazha v sisteme ohlazhdenija silovyh transformatorov // *Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodородного syr ja*. 2014. no. 3. pp. 29–32.
4. Bashirov M.G., Hismatullin A.S., Kamalov A.R. Issledovanie izmenenija teploprovodnosti masla pri barbotazhe v sisteme ohlazhdenija silovyh transformatorov // *Sovremennye problem nauki i obrazovanija*. 2014. no. 6. pp. 338.
5. Bashirov M.G., Mironova I.S. Razrabotka integralnyh kriteriev dlja ocenki ehnicheskogo sostojanija resursa mashinnyh agregatov neftegazovogo proizvodstva // *Nauchnye trudy NIPI Neftegaz GNKAR*. 2015. T. 1. pp. 46–55.
6. Golbert K.A. Vvedenie v gazovujuhromatografiju / K.A. Golbert, M.S. Vigdergaus. Moskva: Izd-vo Himija, 1990 340 p.
7. Mironova I.S., Akshenceva A.A. Sovershenstvovanie hromatograficheskogo metoda ocenki tehnicheskogo sostojanija

i prognozirovanie resursa silovyh transformatorov // *Nauka i obrazovanie v zhizni sovremennogo obshhestva: sbornik nauchnyh trudov po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: v 14 tomah*. 2015. pp. 89–90.

8. Hismatullin A.S., Bashirov M.G., Ishakov R.R. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii program dlja JeVM no. 2015614073 Programma analiza vyhodnyh dannyh jeksperimenta po opredelenija koeficienta temperaturoprovodnosti transformatorного masla s vsplyvajushhimij elegazovymi puzyr kami.

9. Hismatullin A.S., Bashirov M.G., Ishakov R.R. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii program dlja JeVM no. 2015614072 Programma zapisi vyhodnyh dannyh jeksperimenta transformatorного masla s vsplyvajushhimij elegazovymi puzyr kami.

10. Hismatullin A.S. Teoreticheskoe i jeksperimentalnoe issledovanie teploperenosa v zhidkosti s gazovymi puzyr kami: dis. kand.fiz.-mat. nauk. Ufa, 2010. pp. 34–42.

11. Hismatullin A.S., Kamalov A.R. Povysheniej effektivnosti sistemy ohlazhdenija moshnyh silovyh transformatorov // *Fundamentalnye issledovanija*. 2015. no. 6–2. pp. 316–319.

12. Hismatullin A.S., Gareev I.M. Issledovanie perenosa integralnogo parametra v zhidkosti s gazovymi puzyr kami // *Jeologicheskie sistemy i pribory*. 2015. no. 7. pp. 38–42.

13. Hismatullin A.S. Raschet teplovogo polja v silovyh masljanyh transformatorah s jelegazovym ohlazhdeniem // *Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodородного syr ja* 2015. no. 2. pp. 23–30.

14. Filippov A.I. Ustanovka dlja issledovanija koeficienta temperaturoprovodnosti v zhidkosti / A.I. Filippov, M.R. Minlibaev, A.S. Hismatullin // *Novye promyshlennye tehnologii*. 2010. no. 2. pp. 62–63.

15. Nigmatulin R.I., Filippov A.I., Khismatullin A.S. Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2012. T. 19. pp. 589.

Рецензенты:

Жирнов Б.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ХТП, филиал, ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Салават;

Вильданов Р.Г., д.т.н., профессор кафедры ЭАП, филиал, ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Салават.