

TRANSFORMATOR YAĞININ XASSƏLƏRİ İLƏ ONUN ELEMENT ANALİZİ ARASINDAKI QARŞILIQLI ƏLAQƏSİ

T.K. NURUBƏYLİ^{1,2}, Ə.N. SULTANLI¹, N.Ş. CƏFƏR¹, Ə.A. ABDULLAYEVA²

1. Azərbaycan Respublikasının Elm və Təhsil Nazirliyi, Fizika İnstitutu,

H. Cavid pr. 131, Bakı, Az-1143, e-mail:

omartarana@gmail.com, sultanli.alisaftar@mail.ru

2. Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Bakı şəh, 16/21 Azadlıq prospekti, AZ1010

e-mail: t.nurubeyli@physics.science.az

Güc transformatorları elektrik, istilik və kimyəvi gərginliklərə məruz qalan enerji sistemləri içərisində ən vacib və bahalı cihazlardan biridir. Bu məqalənin əsas məqsədi transformator yağının kimyəvi parametrləri - yəni həll olunmuş qazlarla induktiv əlaqəli plazmalı kütlə spektrometri ilə alınan nəticələr arasında əlaqənin müəyyən olunmasıdır. Yağın turşuluğu və furfural komponentlərinin bir-birilə tərs mütənəşib olduğu müəyyən edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, yağda dəm qazının (CO) olmasının furfural komponentinin artmasında böyük rol var. Həmçinin, turşuluğun əmələ gəlməsində asetilen qazının (C₂H₂) rolu və onlar arasındakı əlaqə aşkar edilmişdir. Müəyyən olunmuşdur ki, transformator yağlarında mis elementinin çox miqdarda aşkar olunması dolaqlarda və ya bürünc və misdən hazırlanmış hər hansı komponentlərdə problemin olduğunu göstərir. Yağda dəmir elementinin əhəmiyyətli dərəcədə olması transformatorun içliyinin və çəninin, alüminiumun yüksək olması isə keramika qollarında olan nasazlıqdan xəbər verir. Alınan nəticələr 20 transformator yağlarının təcrübə məlumatları əsasında əldə edilmişdir.

Açar sözlər: transformator yağı, furfural komponenti, induktiv əlaqəli plazmalı kütlə spektrometri, turşuluq və s.

UOT: 621.1.050

GİRİŞ

Transformator yağının bir neçə xüsusiyyətlərini analiz etməklə orada olan bir çox nasazlıqları aşkar etmək mümkündür. İstər fiziki, istər kimyəvi, istərsə də fiziki-kimyəvi təcrübələr apararaq transformatorun işlək vəziyyətini bilmək və transformatorada olan problemləri əvvəlcədən proqnozlaşdırmaq olar. Bir çox izolyasiya və dielektrik materiallarında olduğu kimi, transformator yağlarının parametrləri də zaman keçdikcə pisləşir. Buna səbəb temperaturun artması nəticəsində içlikdən və dolaqlardan yağa ötürülən istilikdir [1]. Dielektrik yağlarının xassələrinin pisləşməsinə əsas səbəb isə onun çirklənməsi və tərkibində metal sulfid hissəciklərinin turşu birləşmələrinin olmasıdır. Çirklənmədən savayı, dielektrik yağlar qismi və qövs boşalmaları, həmçinin temperaturun artması hesabına da parçalana bilər. Bildiyimiz kimi, istismar müddəti artdıqca yağların tərkibində kiçik molekulyar çəkili, həll olunan və karbon hissəciklərindən və onların müxtəlif birləşmələrindən ibarət qazlar ola bilər. Dielektrik yağlarının kimyəvi analizi transformatorun işlək vəziyyəti haqqında xəbər verən bir üsuldur. Ümumiyyətlə, dielektrik yağlar həm fiziki, həm də kimyəvi yolla çirklənə bilərlər [2].

Bildiyimiz kimi, transformatorlarda yaranan nasazlıqların əvvəlcədən aşkarlanmasının ən etibarlı üsulu yağlarda həll olunmuş qazların kimyəvi analizidir. Transformatorlarda izolyasiya mayeləri kimi yüksək dielektrik dayanıqlığına, istilik ötürmə qabiliyyətinə və kimyəvi sabitliyinə malik karbohidrogen (mineral) yağları qismən parçalanır. Lakin istilik artdıqca maye dielektrik və bərk izolyasiya parçalanmağa başlayırlar. Bu zaman ən tez parçalanan qazlar aşağı molekulyar çəkiyə malik qazlar, məsələn hidrogen, metan, etan, etil, asetilen, karbon monoksit və karbon qazları olur-

lar. Çünki, bu təhlükəli qazlar dielektrik mayədə daha tez həll olurlar və bununla belə onların hər birinin analizi tac, qığılcım kimi boşalmaların, ifrat qızma kimi nasazlıq proseslərini müəyyən etməyə imkan verir [4].

Yağların həll olunmuş qazlara görə analizinə əlavə olaraq transformator yağlarının metallara görə element analizi götürülür. Əgər yağların həll olunmuş qazlara görə analizi hər hansı bir nasazlığın olmasından xəbər verirsə, onların element analizi onun yerini dəqiq müəyyənləşdirməyə kömək edir [5].

Yüksək enerji təkə transformatorun izolyasiyasının korlanmasına deyil (yağ, kağız, taxta və s.), həmçinin yağda yaranan metal hissəciklərin əmələ gəlməsinə gətirib çıxarır ki, bunlar da əsasən yağın dövryyəsi nəticəsində transformatorun hər tərəfinə yayılırlar. Temperaturun artması zamanı transformatorun bəzi detalları metal hissəcikləri əmələ gətirə bilərlər. Bu metal hissəcikləri ya ayrı-ayrılıqda, ya da müxtəlif birləşmələr şəklində ola bilər. Məhz bu metalların konsentrasiyalarını təyin etməklə nasazlığı yaranan səbəbləri müəyyənləşdirərək onları əvvəlcədən proqnozlaşdırmaq mümkündür [6].

Transformator yağlarında alüminium, mis, dəmir, qurğuşun, gümüş, qalay və sink kimi metallar aşkar oluna bilər. Transformator yağının metallara görə element analizi atom adsorbsiya (AA) və induktiv əlaqəli plazmalı (ICP) spektrometriya üsulları ilə aparmaq və onların konsentrasiyasını ppm, ppb dəqiqliyinə qədər ölçmək mümkündür. Ümumiyyətlə, yağlarda metalların miqdarını ölçmək üçün induktiv əlaqəli plazmalı kütlə spektrometrdən (ICP-MS) istifadə etmək daha məqsədəuyğun hesab olunur [7].

İOP-KS yüksək göstəricilərinə görə müasir avadanlıqlardan əhəmiyyətli dərəcədə fərqlənir. Hal-hazırda İOP-KS istehsalatda alovlu atom adsorbsiya spektroskopiyasını (AAS) tədricən əvəz edərək qabaq-

cıl cihazlardan biri olmuşdur. İƏP-KS-in üstünlükləri içərisində aşağıdakıları sadalamaq olar [8]:

- kimyəvi elementlərin və izotopların ən aşağı təyinetmə sərhədə malik olması (nq/l səviyyələri və bəzən hətta pq/l);
- analiz olunan maddənin kiçik kütləyə malik olması;
- çox elementli analiz aparmaq imkanı;
- yüksək həssaslıq və ayırdetmə qabiliyyətinə malik olması və s. [9].

Bu məqalənin əsas məqsədi, transformator yağının parametrlərini ölçməklə onlar arasındakı qarşılıqlı əlaqəni aşkar etmək və bu parametrlərin hər birinin yağın keyfiyyətinə təsirini öyrənmək və həmçinin transformatorada olan nasazlığı qabaqcadan proqnozlaşdırmaq üçün yağların kütlə spektrometrik üsulla element analizinin aparılması və onların digər parametrlərdən asılılığını müəyyən etməkdir.

TƏCRÜBİ HİSSƏ

Transformator yağında metalların konsentrasiyasını ölçmək üçün tədqiqatlar ABŞ istehsalı olan Agilent Technologies 7700 induktiv əlaqəli plazmalı kütlə spektrometridə aparılmışdır. Kiçik həcmli qablarla təchiz edilmiş, temperaturu tənzimləmə bilən Speedwave Xpert mikrodalğalı sistemindən (Almaniya) istifadə etməklə nümunələr minerallaşdırılmışdır. Mikrodalğanın radiasiya gücü 2000 Vt-a (2×1000 Vt) qədər çatır. Müəyyən bir parçalanma proqramına malik olan, 2,45 GHz tezlikli iki davamlı tənzimlənən maqnetronun ibarət olan şüalanma hesabına hərtərəfli və dəqiq isitmə əldə etmək mümkündür. Nümunələri dəqiq ölçmək və saxlamaq üçün həcmi 100-1000 µl və 1-10 ml olan Pipet4u və Eppendorf (Almaniya) dozatorlardan, birdəfəlik ucluqlardan və 15 və 50 ml həcmli polipropilen borulardan istifadə edilmişdir.

Nümunələrin minerallaşdırılması və dərəcələnməmiş məhlulların hazırlanması üçün 65% nitrat turşusu (HNO_3) və 30% peroksiddən (H_2O_2) istifadə edilmişdir. Bütün məhlullar deionsuzlaşmış su ilə (18.2 MΩ·sm) durulaşdırılmışdır. Cihazın düzgün kalibrənməsi içməli suyun standart nümunəsi ilə tənzim olunmuşdur.

Xromatoqrafik üsulla yağda həll olunan qazların (H_2 , CO, CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , N_2 , O_2) tərkibi müəyyən edilmişdir. Yağların tərkibini təyin etmək üçün quraşdırılmış alov ionlaşdırma (FID) və istilik keçiricilik detektorları (TPD) və katarometrə malik olan avtomatlaşdırılmış qaz xromatoqrafı KRISTALLUKS-4000M-dən istifadə olunmuşdur.

NƏTİCƏLƏR VƏ ONLARIN MÜZAKİRƏSİ

İşdə 20 yaxın transformator yağlarının kütlə spektrometrik üsulla element, həll olunmuş qazlara və yağın keyfiyyət parametrlərinə görə analizi aparılmışdır. Təcrübədə həmçinin yağların müxtəlif üsullarla alınan nəticələrin bir – birinə görə dəyişməsi də təyin edilmişdir.

Transformator yağında CO və CO_2 qazlarının əmələ gəlməsi kağız izolyasiyasının dağılmasından xəbər verir [10]. CH_4 , C_2H_4 və C_2H_6 qazları mövcudluğu transformatorun həddən artıq yüklənməsini, C_2H_2

qazının olması isə transformatorada qığılcımın olduğunu göstərir ki, bu da transformatorada keçid kontaktlarının sıradan çıxması ilə əlaqədardır. Dielektrik yağlarında CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO_2 və CO qazlarının eyni vaxtda yaranması transformatorun kağız izolyasiyasının yanmasını və sıradan çıxmasını göstərir. Qeyd edək ki, əksər nasazlıq hallarında yağlarda əmələ gələn H_2 qazı əsasən qismi boşalmanın olmasından xəbər verir [11-12].

Bildiyimiz kimi yağlarda hər zaman oksigen olduğundan CO, CO_2 qazlarını yaranmasına səbəb olur ki, bu da öz növbəsində yağın turşuluğunu artırır. Transformatorada temperatur artdıqda, turşu komponenti su ilə hidroliz reaksiyasına girərək kağız izolyasiyasını parçalayır. Digər tərəfdən, ifrat istiləşmə zamanı kağız izolyasiyası yanaraq müxtəlif birləşmələr əmələ gətirir. Buna piroliz fenomeni deyilir. Hidroliz və piroliz hadisələrindən əmələ gələn məhsullar birləşərək furfural komponentləri əmələ gətirir. Furfural oksigen, turşu, CO və CO_2 qazlarından ibarət olur. Furfuralın turşu və oksigen komponentləri transformator yağının və kağız izolyasiyasının dağılmasına səbəb olur [13-16].

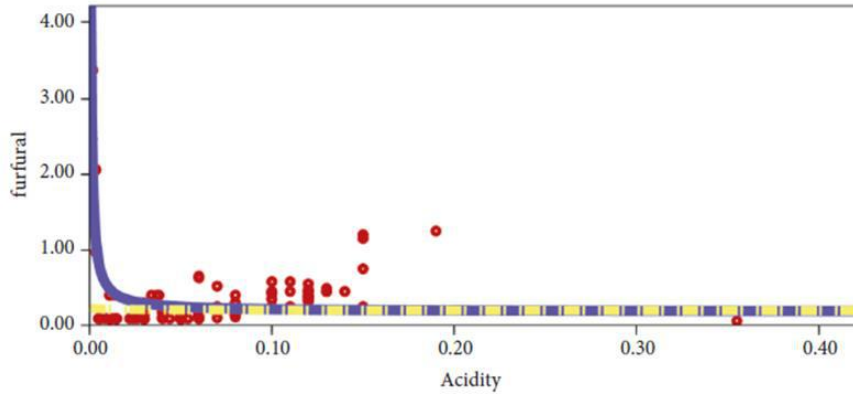
Şəkil 1-də transformatorun kağız izolyasiyasının dağılması nəticəsində əmələ gələn furfural komponentinin turşuluq komponenti ilə tərs mütənəsbibliyi göstərilmişdir. Belə ki, transformator yağında turşuluğun 1 ppm artması furfural komponentinin 0,569 ppm azalmasına səbəb olur.

Yağın oksidləşməsi transformator yağının turşuluğunun əmələ gəlməsinə gətirir. Hidroliz (su ilə parçalanma) və piroliz (termik parçalanma) hadisələri və oksigenin varlığı transformatorların kağız izolyasiyasının deqradasiyasına və bununla da furfural komponentin əmələ gəlməsinə səbəb olur [17]. Şəkil 1-də turşu ilə furfural komponentlər arasındakı tərs mütənəsbilik aydın şəkildə göstərilmişdir. Furfural komponentinin artması yağda turşuluğun azalmasına gətirib çıxarır.

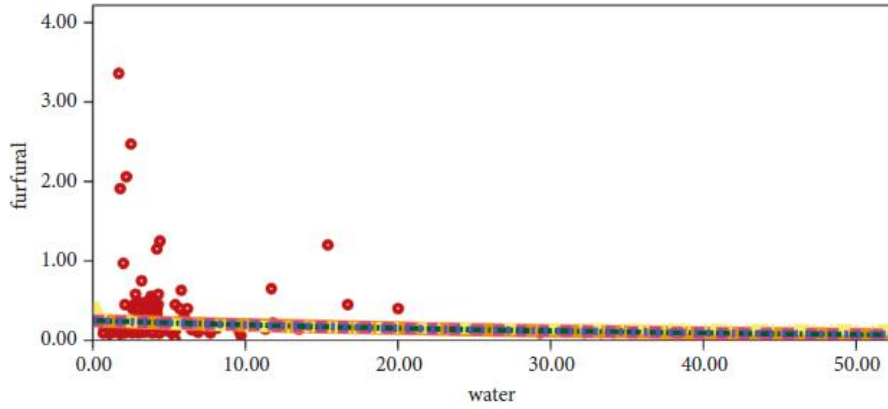
Şəkil 2-də, yağın tərkibində suyun miqdarından asılı olaraq furfuralın tərkibinin dəyişməsi göstərilmişdir. Transformator yağının tərkibində nəmliyin artmasına səbəb təkcə ətraf mühitin rütubətliyi deyil, həm də kağız izolyasiyasının hidrolizi, yəni suyun parçalanmasıdır [18]. Temperaturun yüksək qiymətində transformator yağının tərkibində olan su qabarcıqlara çevilərək qismi boşalmanın yaranmasına və hidrogenin əmələ gəlməsinə səbəb olur.

Transformator yağında suyun miqdarı artdıqca yağın elektrik keçiriciliyi artır, lakin elektrik gərginliklərinə görə yağın dielektrik nüfuzluğu azalır.

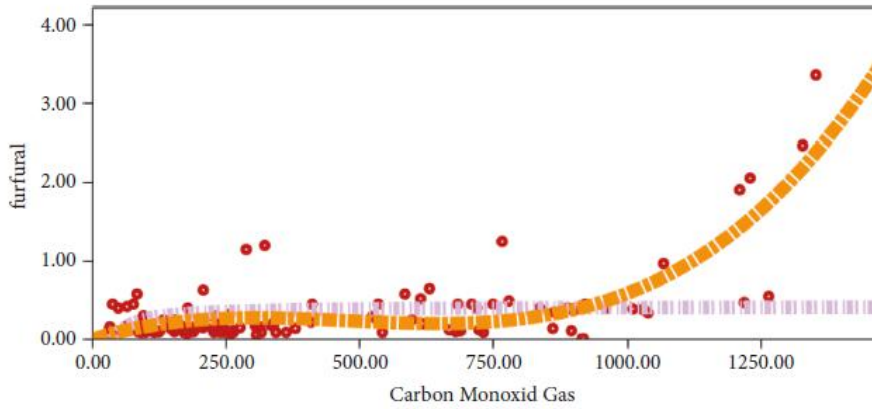
Transformator kağızının izolyasiyasının parçalanmasına səbəb olan qazlardan biri də dəm (CO) qazıdır. Bu qaz furfural komponentinə ən çox təsir edən qazdır. Şəkil 3-ə əsasən, transformator yağında CO qazının miqdarı az olduqda furfuralın da miqdarının az olduğu müşahidə olunur. İstiliyin təsiri altında transformatorun kağız izolyasiyasının parçalanması və yağda karbon qazının miqdarının artması səbəbindən furfuralın tərkibi də artır. Transformatorun kağız izolyasiyasının polimerləşmə dərəcəsini və işlək müddətini müəyyən edən furfural komponentləri əsas parametrlərdən biri sayılır.



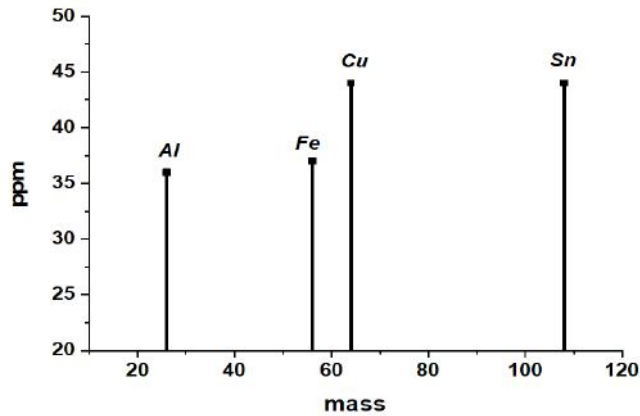
Şəkil 1. Transformator yağının turşuluğu və furfural komponentləri arasındakı asılılıq.



Şəkil 2. Suyun miqdarından asılı olaraq furfuralun tərkibinin dəyişməsi.



Şəkil 3. Furfuralun dəm qazından asılılığı.



Şəkil 4. Transformator yağının induktiv əlaqəli kütlə spektrometri vasitəsi ilə element analizi.

Transformator yağlarının tərkibində olan metalların miqdarının limit səviyyəsinə malik olmamasına baxmayaraq, aparılan təcrübələr və toplanılan məlumatlar göstərir ki, yağlarda metalların analizinin olduqca vacibdir. Çünki, transformatorun nasazlığını ciddi problemə çevirməzdən əvvəl, onu aşkar etmək çox vacibdir. Lakin təkcə metalların element analizi onun yağın vəziyyəti haqqında tam məlumat əldə etmək kifayət deyil, bunun üçün kompleks təcrübə aparmaq və alınan nəticələri bir-biri ilə müqayisə etmək lazımdır.

Şəkil 4-də transformator yağlarının kütlə spektrometrik analizi göstərilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, bəzi nümunələrdə A, B, C, D qrupları ilə adlandırılan eyni miqdarda metalların konsentrasiyaları qeyd olunmuşdur. A qrupuna daxil olan 5-ə yaxın nümunənin analizi alüminiumun konsentrasiyası, B qrupuna daxil olan 10-yə yaxın nümunədən alınan nəticədə isə dəmirin konsentrasiyasının normadan artıq olduğu müşahidə olunmuşdur. C qrupuna daxil olan, təxminən 8 nümunədən alınan nəticələrdə misin konsentrasiyasının artımı, D qrupuna aid 30 nümunədə aparılan təcrübələrdə isə qalayın miqdarının icazə verilən konsentrasiyanın qiymətindən iki dəfə artıq olduğu müşahidə olunmuşdur.

Aparılan tədqiqatlardan belə nəticəyə gəlmək olar ki, transformator yağlarında çox miqdarda mis

elementinin olması sarğılarda, eləcə də bürünc və ya misdən hazırlanmış hər hansı komponentlərdə problemlərin olduğu göstərir. Dəmirin əhəmiyyətli miqdarda çox olması transformatorun içliyinin və çəninin, alüminiumun konsentrasiyasının çox olması isə keramik qollarının nasazlığını göstərir. Yağda qalayın miqdarının çox olması isə ucluqların, boltların dağılmasını göstərir.

NƏTİCƏLƏR

Beləliklə, belə nəticəyə gəlmək olar ki, transformatorun işlək qabiliyyətini ən çox azaldan parametrlər, istinadların nəticələrinə əsasən yağın tərkibində olan suyun miqdarıdır. Furfurol komponenti turşuluq komponenti ilə tərs mütənəsidir, yəni yağın turşuluğu artdıqca furfurolun qiyməti azalmış olur. CO₂ və CO qazları transformatorun işlək vəziyyətinə ən çox təsir edən komponentlərdir. Transformator yağının tərkibində CO₂ və CO qazlarının olması onun kağız izolyasiyasının parçalanmasına gətirib çıxarır. Transformator yağlarının kütlə spektrometrik metodu ilə element analizinin üstünlüklərindən biri də onun tərkibindəki metalların təyin edilməsi ilə problemlərin dəqiq diaqnozunun verilməsidir.

-
- [1] *W. Chen, Z. Gu, J. Zou, F. Wan and Y. Xiang.* "Analysis of furfural dissolved in transformer oil based on confocal laser Raman spectroscopy," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 2, pp. 915–921, 2016.
 - [2] *A. M. Abd-Elhady, M. E. Ibrahim, T. A. Taha, and M. A. Izzularab.* "Effect of temperature on AC breakdown voltage of nanofilled transformer oil," *IET Science Measurement and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 138–144, p 2018.
 - [3] *D. Peng, D. Yang, C. Wang and M. Li.* "The influence of transformer oil aging to dielectric dissipation factor and its insulating lifetime," in *Proceedings of the Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, IEEE, Wuhan, China, 2009.
 - [4] *S. Forouhari and A. Abu-Siada.* "Remnant life estimation of power transformer based on IFT and acidity number of transformer oil," in *Proceedings of the IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, IEEE, Sydney, Australia, 2015.
 - [5] *I.G.N. Satriyadi Hernanda, A.C. Mulyana, D.A.Asfani, I.M.Y. Negara, and D.Fahmi.* *Application of Health Index Method for Transformer Condition Assessment*, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2014.
 - [6] *M. Augusta.* "Martins "Condition and risk assessment of power transformers: a general approach to calculate a Health Index"," *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 26, no. No. 1, pp. 9–16, 2014.
 - [7] *T.K. Nurubeyli.* The Effect of Plasma Density on the Degree of Suppression of Analyte Signals in ICP-MS. *Technical Physics*, –2020, v. 65, No. 12, –p. 1963–1968.
 - [8] *T.K. Nurubeyli, Kh.N. Ahmadova.* The role of the spectral matrix effect in the element analysis of biological fluids in ICP-MS. *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 35, No. 05, 2150094 (2021)
 - [9] *T.K. Nurubeyli, Z.K. Nurubeyli, K.Z. Nuriyev.* Standardless analysis of solids by mass spectrometry with inductively coupled plasma. *Technical Physics*, –2017, v. 62, No.2, –p. 305–309.
 - [10] *A. Cigre,* "Condition assessment of power transformers," *Technical Brochure CIGRE*, vol. 49, 2019.
 - [11] *A. Azmi, J. Jasni, N. Azis and M. A. Kadir.* "Evolution of transformer health index in the form of mathematical equation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 687–700, 2017.
 - [12] *J.I. Aizpurua, B.G. Stewart, S.D.J. McArthur, B. Lambert, J.G. Cross and V.M. Catterson.* "Improved power transformer condition monitoring under uncertainty through soft computing and probabilistic health index," *Applied Soft Computing*, vol. 85, Article ID 105530, 2019.
 - [13] *H. Zeinoddini-Meymand and B. Vahidi.* "Health index calculation for power

- transformers using technical and economic parameters,” IET Science, Measurement and Technology, vol. 10, no. 7, pp. 823–830, 2016.
- [14] A.D. Ashkezari, H.Ma, T.K. Saha and C.Ekanayake. “Application of fuzzy support vector machine for determining the health index of the insulation system of in-service power transformers,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, no. 3, pp. 965–973, 2013.
- [15] R. A. Prasojo, K. Diwyacitta and H. Suwarno. “Gumilang transformer paper expected life estimation using ANFIS based on oil characteristics and dissolved gases (Case study: Indonesian transformers),” Energies, vol. 10, 2017.
- [16] F.R. Barbosa, O.M. Almeida, A.P.S. Braga, C.M. Tavares, M.A.B. Amora and F.A.P. Aragao. “Artificial neural network application in estimation of dissolved gases in insulating mineral oil from physical-chemical datas for incipient fault diagnosis,” in Proceedings of the IEEE 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, IEEE, Curitiba, Brazil, Nov 2009.
- [17] D. Rediansyah, R. A. Prasojo, and A. Abu-Siada. “Artificial intelligence-based power transformer health index for handling data uncertainty,” IEEE Access, vol. 9, pp. 150637–150648, 2021.
- [18] A. Cigre. “Guidelines for life management techniques for power transformers”, Technical Brochure, vol. 227, 2002.

T.K. Nurubeyli, A.N. Sultanly, N.Sh. Jafar, E.A. Abdullayeva

INTERACTION OF TRANSFORMER OIL PARAMETERS AND ITS ELEMENTARY ANALYSIS

Power transformers are one of the most responsible and expensive devices in power systems exposed to electrical, thermal, and chemical stresses. The purpose of this article as a new idea is to determine the relationships between the chemical parameters of transformer oil, dissolved gases and indicators obtained by a mass spectrometer with inductively coupled plasma. The inverse dependence between acidity and furfural components was determined. The relationship between gaseous C_2H_2 as a parameter that plays the largest role in the formation of an acidic component is established. It is found that a large amount of copper predicts problems in the windings, as well as in any components made of bronze or brass. The concentration of iron in significant quantities indicates problems with the core and tank of the transformer, and aluminum with ceramic bushings. Test data related to 120 transformers were also considered.

T.K. Нурубейли, А.Н. Султанлы, Н.Ш. Джафар, Е.А. Абдуллаева

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА И ЕГО ЭЛЕМЕНТНЫМ АНАЛИЗОМ

Силовые трансформаторы являются одним из наиболее ответственных и дорогостоящих устройств в энергосистемах, подвергающихся воздействию электрических, тепловых и химических напряжений. Целью данной статьи как новой идеи является определение взаимосвязей между химическими параметрами трансформаторного масла, растворенными газами и показателями, полученными масс спектрометром с индуктивно связанной плазмой. Определено обратная зависимости между кислотностью и фурфурольными компонентами, Выявлено что, газообразное CO как параметр, играющей наибольшую роль в производстве фурфурольного компонента. Установлено взаимосвязь между газообразным C_2H_2 как параметр, играющего наибольшую роль в образовании кислотного компонента. Выявлено что большое количество меди прогнозирует о проблемах в обмотках, а также в любых компонентах из бронзы или латуни. Концентрация железо в значительных количествах показывает о неполадках сердечнике и баке трансформатора, а алюминий — керамических втулках. А также были рассмотрены данные испытаний, относящиеся к 120 трансформаторам.