

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Artur Polak
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

BADANIA OFF-LINE IZOLATORA PRZEPUSTOWEGO TRANSFORMATORA WN

OFF-LINE TESTING OF THE HV TRANSFORMER BUSHING

Streszczenie: W artykule przedstawiono schemat zastępczy izolatora i program badań off-line napięciem stałym, to jest: 1) załączenie napięcia stałego o wartości U_p i pomiar prądu ustalonego I_{60} ; 2) odłączenie napięcia U_p i zwarcie układu izolacyjnego na czas t_z ; 3) rozwarcie układu izolacyjnego i pomiar przebiegu napięcia $u_{od}(t)$ do wartości maksymalnej $U_{od\ max}$. Parametrami diagnostycznymi są: napięcie - U_p , rezystancja - R_{60} , czas zwarcia - t_z , napięcie - $U_{od\ max}$ i stała czasowa τ_{od} . Parametry te, wyznaczone dla izolatora nowego i zapisane w jego metryczce, stanowią *finger-print*.

Abstract: The article presents an insulator substitute diagram and an off-line DC voltage test program, that is: 1) switching on DC voltage with the value of U_p and measurement of the steady current I_{60} ; 2) disconnection of the voltage U_p and short-circuit of the insulation system for the time t_z ; 3) opening of the insulation system and measurement of the voltage waveform $u_{od}(t)$ to the maximum value of $U_{od\ max}$. The diagnostic parameters are: voltage - U_p , resistance - R_{60} , short-circuit time - t_z , voltage - $U_{od\ max}$ and time constant τ_{od} . These parameters, determined for the new insulator and recorded in his record are a *finger-print*.

Słowa kluczowe: izolator przepustowy, schemat zastępczy, badanie polaryzacyjne, parametry diagnostyczne
Keywords: bushing, equivalent diagram, polarization test, diagnostic parameters.

1. Wstęp

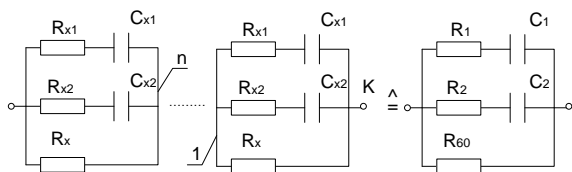
Wyprowadzenia z uzwojeń, w transformatorach olejowych, na zewnątrz są wykonane poprzez izolatory przepustowe. Izolatory są zamocowane na kadzi transformatora w ten sposób, że jedna część izolatora jest w kadzi, a druga część jest na zewnątrz. Izolator przepustowy wysokiego napięcia WN typu OPI (olej-papier-izolator) składa się z czterech głównych elementów: rdzenia papierowo – olejowego umieszczonego w osłonie porcelanowej, rurki metalowej i kołnierza żeliwnego. Część zewnątrz osłony porcelanowej ma talerze pokryte szkliwem lub teflonem zabezpieczając izolator przed zabrudzeniem. Część osłony umieszczona w transformatorze jest gładka. Rdzeń papierowo – olejowy stanowi izolację główną przepustu. Papier izolacyjny jest nawinięty na rurkę metalową i jest umieszczony wewnątrz osłony porcelanowej. Rurka zwykle aluminiowa (czasem miedziana) służy do wyprowadzenia końcówki uzwojenia, tzw. bata. Na górze izolatora jest umieszczony zbiornik z olejem. Olej przenika do warstw papieru, nasycza papier i wypełnia przestrzeń rdzenia między rurką aluminiową i osłoną porcelanową. W przestrzeni między rurką aluminiową i osłoną porcelanową nie powinno być pęcherzyków powietrza. Rdzeń papierowy jest podzielony na n

warstw. Podział ten tworzą powierzchnie ekwipotencjalne. Powierzchnie ekwipotencjalne wykonane są z folii aluminiowej bądź lakieru przewodzącego, np. lakier zmieszany z proszkiem węgla, który pokrywa zewnętrzne warstwy papieru. Powierzchnie ekwipotencjalne wyrównują rozkład natężenia pola elektrycznego w rdzeniu papierowym. Liczba warstw n w rdzeniu izolacyjnym zależy od napięcia izolatora, np. w izolatorze 400 kV jest około 60 warstw papieru. Jedna warstwa ma grubość 2 – 3 mm. Na osłonie porcelanowej jest umieszczony kołnierz mocujący izolator do kadzi transformatora. Bezpośrednio za kołnierzem na części cylindrycznej jest umieszczony przekładnik prądowy. W czasie pracy transformatora na rurce metalowej jest napięcie $U_N/\sqrt{3}$. Kołnierz ma potencjał elektryczny zero. Warstwy papierowo – olejowe, między rurką a kołnierzem, tworzą układ izolacyjny szeregowy. Z pierwszej powierzchni ekwipotencjalnej, licząc od kołnierza, jest wyprowadzony zacisk pomiarowy P (w energetyce jest oznaczany symbolem II). Dostępny jest także punkt K na kołnierzu (w energetyce jest oznaczany symbolem III) i punkt A przyłączeniowy (w energetyce jest oznaczany symbolem I). Punkty P i K są wykorzystywane

w badaniach on-line w czasie pracy transformatora. W czasie badań izolatora nowego i badań diagnostycznych off-line samego izolatora, po odłączeniu przyłączy, jest dostępny także punkt A. W tym artykule przedstawiono badania off-line prowadzone dla całego izolatora, to jest między punktami A-K.

Izolatory przepustowe mają wyjątkowo dużo izolacji papierowo – olejowej. Interpretacja przebiegów napięcia i prądu upływu w izolatorze jednym prostym schematem zastępczym jest przybliżona. Izolator w normalnych warunkach pracuje przy napięciu przemiennym. Standardowo przy napięciu przemiennym parametrem diagnostycznym jest $\text{tg}\delta$. Schemat zastępczy o rezystancji R i pojemności C połączone równoległe, w sposób dostateczny interpretują $\text{tg}\delta=1/\omega CR$ układu izolacyjnego. Schemat taki jest zbyt uproszczony do interpretacji przebiegów napięcia i prądu przy badaniu układu izolacyjnego napięciem stałym.

Badania napięciem stałym robimy całego izolatora, to jest między punktami A-K. Schemat zastępczy jednej warstwy izolatora odwzorowujemy dwójnikiem zawierającym trzy gałęzie równoległe. W jednej gałęzi jest pojemność C_{x1} i rezystancja R_{x1} połączone szeregowo, w drugiej gałęzi jest pojemność C_{x2} i rezystancja R_{x2} połączone szeregowo, a w trzeciej rezystancja R_x . Dwójniki wszystkich warstw są połączone szeregowo, jak na rys. 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy izolatora przepustowego.

Komasując n dwójników do jednego dwójnika otrzymujemy dwójnik szeregowo – równoległy. W jednej gałęzi równoległej jest impedancja

$$nR_{x1} + \frac{n}{j\omega C_{x1}} = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (1)$$

w drugiej gałęzi równoległej jest impedancja

$$nR_{x2} + \frac{n}{j\omega C_{x2}} = R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \quad (2)$$

a w trzeciej gałęzi równoległej jest rezystancja

$$nR_{x3} = R_{60} \quad (3)$$

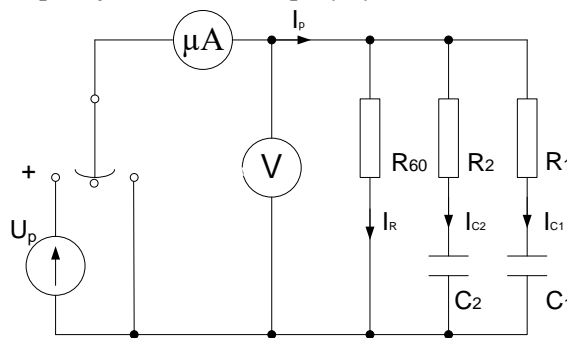
gdzie: indeks 60 jest umownym czasem t_0 w sekundach oznaczający, że po załączeniu napięcia stałego prąd upływu I_{60} układu izolacyjnego po czasie $t_0 = 60$ s jest już ustalony. Czas ustalania się prądu może być dłuższy $t_0 > 60$ s. W literaturze można spotkać oznaczenia I_{300} i I_{600} . W tym artykule przyjmujemy oznaczenie I_{60} , lecz w izolatorze OPI czasy ustalania się przebiegów prądu upływu i odbudowy napięcia mogą być dłuższe od 60 s lecz oznaczeń nie zmieniamy.

W skomasowanym schemacie zastępczym rezystancja $R_1 = nR_{x1}$, a pojemność $C_1 = \frac{C_{x1}}{n}$, rezystancja $R_2 = nR_{x2}$, a pojemność $C_2 = \frac{C_{x2}}{n}$, przy czym $R_1 \ll R_2$ i $C_1 \ll C_2$.

Rezystancja

$$R_{60} = \frac{U_p}{I_{60}} \gg R_2 \gg R_1 \quad (4)$$

jest mierzona napięciem stałym U_p w stanie elektrycznie ustalonym. Zjawiska ładowania i rozładowania się pojemności układu izolacyjnego, przy napięciu stałym, w sposób dostateczny interpretuje schemat zastępczy rys. 2.



Rys. 2. Schemat zastępczy izolatora przepustowego w badaniach diagnostycznych napięciem stałym

W badaniach diagnostycznych napięciem stałym problemem może być źródło napięcia probierczego U_p . Napięcie znamionowe transformatora jest wysokie, np. $U_N = 400$ kV. Napięcie na izolatorze $\frac{U_N}{\sqrt{3}} = 231$ kV, a wartość maksymalna napięcia $U_m = \sqrt{2} \cdot 231 = 327$ kV. Źródło probiercze napięcia stałego powinno mieć dostatecznie wysoką wartość, przynajmniej $U_p \geq 0,1U_m$. Źródłem napięcia stałego U_p , w badaniach izolacji, jest zasilacz lampowy -

kenotron. Napięcie kenotronu jest nieliniową funkcją prądu obciążenia. Nieliniowość kenotronu reprezentuje rezystancja R_k . Przy prądzie obciążenia $I_p = 0$, napięcie kenotronu jest równe U_p . Po załączeniu napięcia, prąd pojemnościowy $i_c(t)$ izolatora powoduje skokowe zmniejszenie napięcia $U_{p(t=0)} = U_1$. Z upływem czasu pojemności C_1, C_2 ładują się, napięcie $u_c(t)$ wzrasta, prąd $i_c(t)$ zmniejsza się i napięcie $u_p(t)$ wraca do wartości U_p .

Jeśli założymy $R_k = 0$ wówczas $u_p(t) = U_p = \text{constans}$.

Przebieg prądu $i_p(t)$ po załączeniu napięcia stałego U_p :

$$i_p(t) = \frac{U_p}{R_{60}} + \frac{U_p}{R_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{U_p}{R_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (5)$$

gdzie elektryczne stałe czasowe: $\tau_1 = R_1 C_1 \ll \tau_2 = R_2 C_2$.

W stanie ustalonym, gdy w izolacji nie ma wyładowań niezupełnych, przebiegi napięcia $u_p(t)$ i prądu $i_p(t)$ stabilizują się. W stanie ustalonym:

$$U_{c1} = U_{c2} = U_p, \quad I_{c1} = I_{c2} = 0, \quad I_{60} = \frac{U_p}{R_{60}}$$

Przy dobrze dopasowanych parametrach dwójnika $R_{60}, R_1, R_2, C_1, C_2$, przebiegi napięcia $u_p(t)$ i prądu upływu $i_p(t)$ zarejestrowane na izolatorze i zasymulowane na dwójniku (rys. 2), powinny być zbliżone.

2. Badanie diagnostyczne izolatora napięciem stałym

Parametry, które są bazą do oceny stanu technicznego układu izolacyjnego, nie powinny być zależne od źródła napięcia probierczego $u_p(t)$. Umożliwiają to badania układu izolacyjnego napięciem stałym. Diagnostyka ta obejmuje próby [12]:

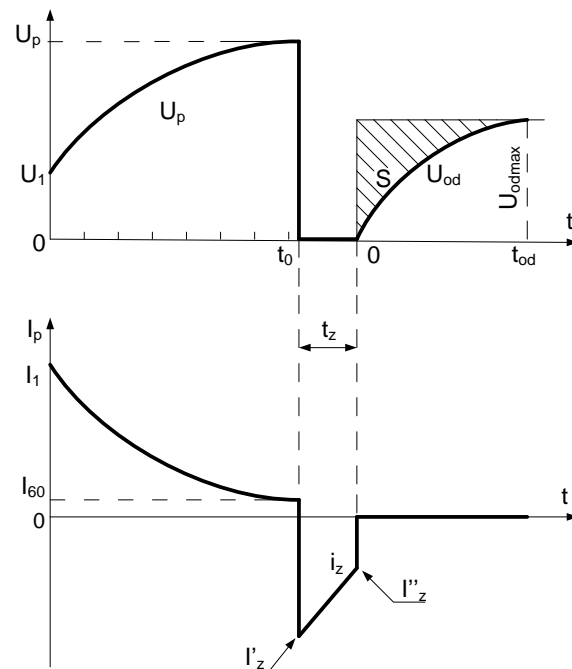
1) załączenie napięcia stałego $u_p(t)$, na całkowicie rozładowany układ izolacyjny, i pomiar przebiegu czasowego prądu upływu $i_p(t)$ do wartości ustalonej I_{60} ,

2) odłączenie napięcia zasilającego U_p i zwarcie układu izolacyjnego na czas t_z i rejestrację przebiegu prądu zwarcia $i_z(t)$,

3) rozwarcie układu izolacyjnego i pomiar przebiegu odbudowy napięcia $u_{od}(t)$, to jest napięcia powrotnego na układzie izolacyjnym do wartości maksymalnej $U_{od \max}$.

Przebieg prądu zwarcia $i_z(t)$ układu izolacyjnego i przebieg odbudowy napięcia $u_{od}(t)$ są

niezależne od napięcia zasilania $u_p(t)$, determinują je wyłącznie parametry elektryczne układu izolacyjnego. Przebiegi prądu $i_z(t)$ i napięcia $u_{od}(t)$ uzyskane na układzie izolacyjnym, przedstawione na rys. 3, mogą być zasymulowane na schemacie zastępczym (rys. 2). Schemat ten jest ekwiwalentny dla izolatora przepustowego badanego napięciem stałym.



Rys. 3. Przebiegi napięcia i prądu uzyskane w czasie testu diagnostycznego izolatora OPI

Po ustabilizowaniu się prądu upływu $i_p(t = t_0) = I_{60}$, w chwili t_0 odłączamy źródło napięcia i zwieramy układ izolacyjny. Energia $(0,5C_1U_p^2 + 0,5C_2U_p^2)$ zgromadzona na pojemnościach C_1, C_2 izolatora rozładowuje się. Przy $u_p(t) = U_p = \text{const.}$, prąd zwarcia $i_z(t)$ ma przebieg odwrócony w stosunku do prądu ładowania $i_z(t) = -i_p(t)$. Izolator jest zwarty, równanie prądu zwarcia ma postać

$$i_z(t) = -I_{z1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} - I_{z2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (6)$$

W równaniu (6) czas zwarcia t_z jest liczony od zera. Bezpośrednio po zwarcia ($t = +0$) prąd zwarcia równa się: $I'_{z(t=+0)} = -I_{z1} - I_{z2}$.

Założmy czas zwarcia: $5\tau_1 \leq t_z \leq \tau_2$.

W czasie zwarcia $t_z = 5\tau$ pojemność C_1 rozładowuje się całkowicie, a pojemność C_2 rozładowuje się częściowo.

$$U_{c1(t=t_z)} = 0$$

$$U_{c2(t=t_z)} = U_p \left(1 - e^{-\frac{t_z}{\tau_z}} \right) \quad (7)$$

Prąd zwarcia zmniejsza się do wartości

$$I_z'' = -I_{z2} e^{-\frac{t_z}{\tau_z}} \quad (8)$$

Po czasie t_z zwarcie rozłączamy. Czas wyłączenia zwarcia liczymy od zera.

W chwili wyłączenia ($t = +0$) kondensator C_1 jest rozładowany. W schemacie zastępczym przyjmujemy $R_{60} = \infty$, napięcie na pojemności C_1 determinuje napięcie na izolatorze, $U_{(t=+0)} = 0$. Energia ($0,5C_2U_{c2(t=t_z)}^2$) odbudowuje napięcie na izolatorze.

$$u_{od}(t) = U_{od \max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{od}}} \right) \quad (9)$$

Pojemność C_1 ładuje się prądem

$$i_c(t) = I_c e^{-\frac{t}{\tau_{od}}} \quad (10)$$

$$\tau_{od} = (R_1 + R_2) \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2)$$

Rejestrujemy przebieg napięcia $u_{od}(t)$. Przykładowe przebiegi napięcia i prądu przedstawiono na rys. 3.

Elektryczną stałą czasową τ_{od} oblicza się z powierzchni S nad krzywą napięcia $u_{od}(t)$,

$$\begin{aligned} \tau_{od} &= \frac{1}{U_{od \max}} \int_0^{t_{od}} S dt \quad (2) \\ &= \frac{1}{U_{od \max}} \int_0^{t_{od}} [U_{od \max} - u_{od}(t)] dt \end{aligned}$$

Wywody powyższe przeprowadzono przy $R_{60} = \infty$, lecz napięcie $u_{od}(t)$, po osiągnięciu wartości maksymalnej $U_{od \max}$ zmniejsza się. W izolatorze rezystancja $R_{60} \neq \infty$ i pojemności C_1 i C_2 rozładowują się poprzez rezystancję R_{60} , czas samorozładowania jest długi może wynosić kilka godzin.

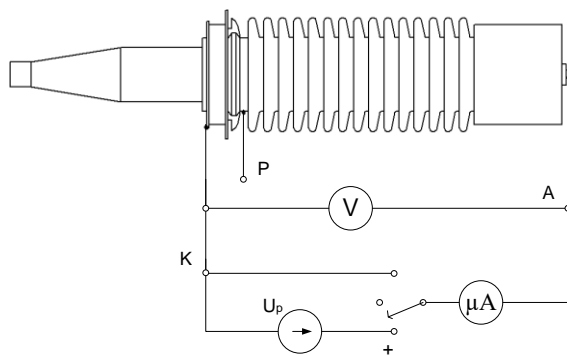
3. Przykład

Na rysunku 4 pokazano izolator przepustowy górnego napięcia (GN) zdemontowany z fazy L3 transformatora blokowego 240 MVA; DN-15,75 kV; GN-420 kV.

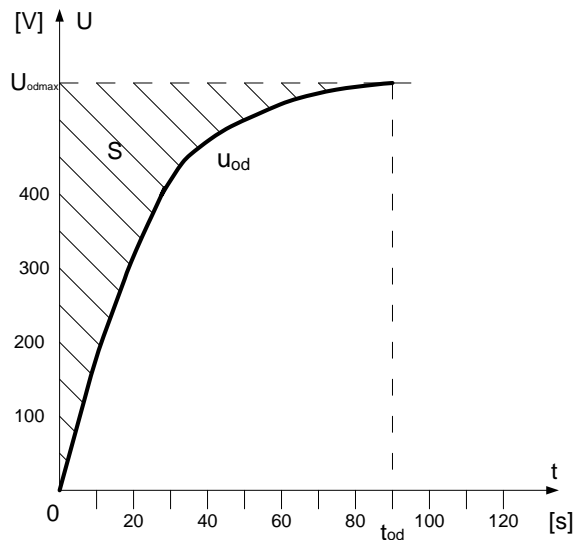


Rys. 4. Izolator przepustowy GN na stanowisku pomiarowym, kąt zawieszenia izolatora jak w transformatorze (zdjęcie własne)

Korzystnie jest wykonać badania polaryzacyjne napięciem stałym całego izolatora, to jest między punktami A-K. Pomiary takie przeprowadzono w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 5. Izolator naładowano napięciem $U_p = 10$ kV i zmierzono ustaloną wartość prądu $I_{60} = 5,4$ μ A. Naładowany izolator zwarto, czas zwarcia $t_z = 30$ s, a następnie rozwarło i rejestrowano przebieg odbudowy napięcia $u_{od}(t)$ na izolatorze – rys. 6.



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego izolatora przepustowego GN



Rys. 6. Przebieg odbudowy napięcia i obliczenie powierzchni S (zakreskowanej)

Wartość maksymalna odbudowanego napięcia $U_{od\ max} = 580\ V$. Czas odbudowy napięcia $t_{od} \approx 90\ s$. Powierzchnia S obliczona z rys. 6 wynosi: $S = 11600\ Vs$.

Rezystancja R_{60} wynosi

$$R_{60} = \frac{U_p}{I_{60}} = \frac{10^4}{5,4 \cdot 10^{-6}} = 1,85\ G\Omega \quad (2)$$

Elektryczna stała czasowa odbudowy napięcia

$$\tau_{od} = \frac{S}{U_{od\ max}} = \frac{11600}{580} = 20\ sek. \quad (2)$$

Dla badanego izolatora parametry: $U_p = 10\ kV$, $R_{60} = 1,85\ G\Omega$, $t_z = 30\ s$, $U_{od\ max} = 580\ V$, $\tau_{od} = 20\ s$ opisują aktualny stan techniczny izolatora.

Jeśli parametry: U_p , R_{60} , t_z , $U_{od\ max}$, τ_{od} byłyby zapisane w metryczce nowego izolatora, to właściciel transformatora miałby *fingerprint* i mógłby je wykorzystać do oceny aktualnego stanu technicznego izolatora. Jeśli nie ma *fingerprint* lecz badania diagnostyczne napięciem stałym są robione okresowo co parę lat, to porównując wyniki z lat poprzednich można śledzić postępującą degradację izolacji.

4. Podsumowanie

Izolatory przepustowe WN mają wyjątkowo dużo skupionej w jednym miejscu izolacji papierowo – olejowej. Ocena izolacji bazująca na pomiarze $tg\delta$ wykorzystuje schemat zastępczy izolatora o dwóch parametrach C, R , jest to model mocno uproszczony.

W badaniu off-line samego izolatora napięciem stałym wykorzystuje się schemat zastępczy o pięciu parametrach (rys. 2), a program badań obejmuje trzy próby:

1. załączenie napięcia stałego U_p , na rozładowany układ izolacyjny i rejestrację prądu upływu $i_p(t)$ do wartości ustalonej I_{60} ,
 2. odłączenie napięcia zasilającego U_p i zwarcie układu izolacyjnego na czas t_z i rejestrację prądu zwarcia $i_z(t)$,
 3. rozwarzenie układu izolacyjnego i pomiar przebiegu odbudowy napięcia $u_{od}(t)$ na układzie izolacyjnym do wartości maksymalnej $U_{od\ max}$.
- Schemat zastępczy (rys. 2) jest wykorzystany do zdefiniowania parametrów diagnostycznych, którymi są: napięcie probiercze - U_p , rezystancja - R_{60} , czas zwarcia - t_z , wartość maksymalna odbudowanego napięcia powrotnego - $U_{od\ max}$ i stała czasowa odbudowy napięcia τ_{od} . Parametry: U_p , R_{60} , t_z , $U_{od\ max}$, τ_{od} wyznaczone dla izolatora nowego i zapisane w jego metryczce, stanowią *fingerprint* izolatora, a wyniki wcześniejszych badań, wykonywanych okresowo co kilka lat, mogą być wykorzystane w ocenie stanu technicznego izolatora, śledzeniu postępującej degradacji izolacji i prognozowaniu czasu jego dalszej bezpiecznej eksploatacji.

5. Literatura

- [1]. Bernatt J., Gawron S., Glinka T., Polak A.: Badania polaryzacyjne izolatora przepustowego typu OPI napięciem stałym. *Energetyka* ISSN 0017-7294. Nr /2022.
- [2]. Bernatt J., Glinka T., Mních M., Wilk M: Układ do diagnostyki izolatorów przepustowych typu OPI. *Patent PL 235587* z dnia 18.02.2019 r.
- [3]. Glinka T.: DC Testing of the OPI-type 400 kV Bushings (Badanie napięciem stałym izolatorów przepustowych typu OPI 400 kV). *Automatyka – Elektryka – Zakłócenia*. Vol. 10, nr 4 (38), 2019. ISSN 2082-4149, www.epismo.aez.pl. ss. 8 – 31.
- [4]. Glinka T., Szymaniec S.: Eksploatacja i diagnostyka maszyn elektrycznych i transformatorów. *WNT*, Warszawa 2019, ss. 578, ISBN 978-83-01-20115-9.
- [5]. *IEC 61198* Ed. 1.0 b:1993, Mineral Insulating Oils – Methods for the Determination of 2-Furfural and Related Compounds.
- [6]. Kaźmierski M.: Diagnostyka i monitoring transformatorów w eksploatacji. *Mat. Forum „Transformatory Energetyczne”*. Łódź 20-21.11.2007. ss 141 - 187.
- [7]. Kazimierski M., Olech W.: Diagnostyka techniczna i monitoring transformatorów. *Energopomiar-Elektryka Sp. z o.o.*, Gliwice 2013, ISBN 978-83-916040-5-2.

- [8]. Łukaszewski J.: Uszkodzenia izolatorów zagrożeniem dla transformatora i otoczenia, *BOT Elektrownia Bełchatów*, www.igeos.pl/doc/2007/11/2015r.
- [9]. Olech W., Buchacz J., Warczyński P.: Instrukcja badań transformatorowych izolatorów przepustowych, *ZPBE Energopomiar – Elektryka*, Gliwice, 12.2008-02.2009.
- [10]. *PN-81/E-04070.01* Transformatory. Metody badań. Badanie oleju.
- [11]. Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów, *ZPBE Energopomiar-Elektryka*, Gliwice 2012, ISBN 83-916040-4-5.
- [12]. *Zgłoszenie patentowe P.439590*. Diagnostyka off-line izolatorów przepustowych. Łukasiewicz – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL.