

## Ocena stanu technicznego przekładników prądowych typu J110

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano sposób oceny stanu technicznego przekładników prądowych typu J 110 po długoletnim okresie eksploatacji. Analizę wykonano na podstawie oszacowania zawilgocenia izolacji, stopnia degradacji papieru i oleju oraz rewizji wewnętrznej. Ocena stanu technicznego na podstawie zaawansowanych metod badawczych była zbieżna z wynikami rewizji wewnętrznej. Stwierdzono zadowalający stan głównych elementów izolacyjnych. Wsuszenie izolacji papierowo-olejowej oraz wymiana oleju pozwoli na dalszą eksploatację przekładników.

**Abstract.** The paper presents a method for technical condition assessment of current transformers type J 110 after many years of operation. The analysis had been performed on the base of assessment of inner insulation water contents, paper and oil degradation level and inner inspection. The assessment based on the advanced test methods was similar to inspection conclusions. Main insulating elements were found to be in the satisfactory shape. Drying of paper-oil insulation and oil replacement would allow for future operation of current transformers. (**Assessment of the technical condition of the current transformers type J110.**)

**Słowa kluczowe:** przekładniki prądowe, ocena stanu technicznego.

**Keywords:** Current transformers , assessment technical condition.

### Wstęp

W niektórych stacjach elektroenergetycznych od 50 lat są eksploatowane przekładniki prądowe typu J 110. Podczas modernizacji są one sukcesywnie wymieniane na nowe, ale w pewnych przypadkach, ze względu na nietypowe parametry obwodów wtórnych istnieje konieczność przedłużenia ich pracy w ruchu elektrycznym. Z drugiej strony okresowe badania izolacji głównej wykazały, że w większości przypadków, w przekładnikach prądowych typu J110-3 oraz J110-3s w wykonaniu bez mieszka kompensacyjnego zostały przekroczone dopuszczalne wartości współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  oraz rezystancji izolacji. Dlatego w celu zbadania możliwości przedłużenia ich eksploatacji wykonano zaawansowaną ocenę stanu technicznego izolacji z wykorzystaniem spektroskopowych metod pomiaru odpowiedzi dielektrycznej (FDS,PDC), fizykochemicznej analizy oleju oraz rewizji wewnętrznej. W dalszej części artykułu analizę możliwości przedłużenia eksploatacji zaprezentowano na przykładzie dwóch przekładników prądowych typu J110-3 nr fabr.139516 rok prod. 1957 oraz nr fabr. 219042 rok prod. 1963, w których wstępnie stwierdzono znaczne przekroczenie dopuszczalnych wartości współczynnika  $tg\delta$  (odpowiednio  $tg\delta=0,0224$  oraz  $tg\delta=0,019$ ) oraz zbyt niską rezystancję izolacji. Zaawansowaną ocenę ich stanu technicznego oparto na oznaczeniu zawartości wody w izolacji papierowo-olejowej, stopnia degradacji celulozy i oleju, a także rewizji wewnętrznej.

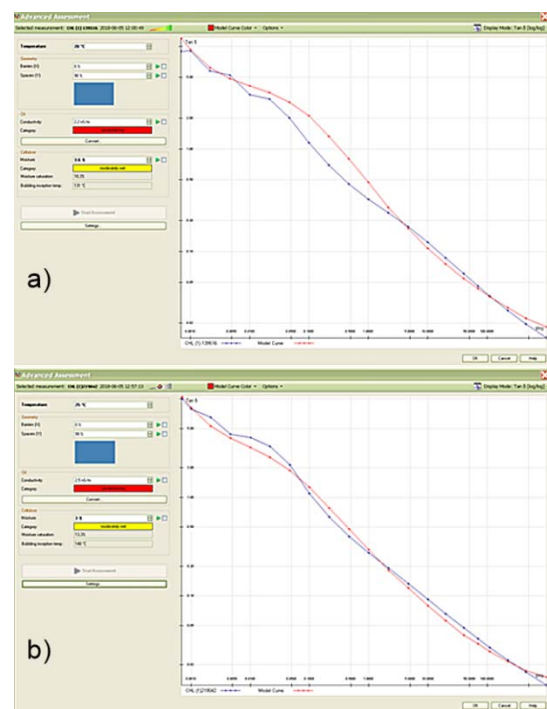
### Oznaczenie zawartości wody w papierowo-olejowej izolacji przekładników

Najbardziej rozpowszechnioną metodą określenia stopnia zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej są pomiary współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  oraz pojemności w szerokim zakresie częstotliwości (metoda FDS). Wykorzystuje się przy tym standardowy model X-Y geometrii papierowo-olejowej izolacji transformatorów, w którym względna zawartość barier (parametr X) i przekładek (parametr Y) zmienia się określonym przedziale wartości. Natomiast geometria izolacji przekładników jest znacząco różna. Stąd wiarygodność oszacowania zawilgocenia z wykorzystaniem modelu stosowanego w transformatorach jest mniejsza. Dlatego wskazane jest, aby wynik otrzymany z metody FDS zweryfikować inną metodą, np. pomiarami prądów polaryzacji i depolaryzacji w dziedzinie czasu (metoda PDC). Pozwalają wyznaczyć przewodnictwo celulozy zawartej w izolacji, które zależy od dwóch zmiennych: temperatury i zawartości wody. Z tego

powodu do oznaczenia wody w izolacji przekładników zastosowano obie metody ( FDS oraz PDC).

### Metoda FDS

Pomiary charakterystyk  $tg\delta, C=f(f)$  wykonano w zakresie częstotliwości 10-3÷103 Hz) między zaciskiem pierwotnym a zwartymi zaciskami uzwojenia wtórnego przekładników (rys.1). Do wyznaczenia stopnia zawilgocenia papieru przyjęto zawartość barier 0% oraz przekładek 98%, które realnie odzwierciedlają geometrię izolacji przekładnika [3]. Dla tych założeń oraz temperatury izolacji  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  dokonano modelowania odpowiedzi dielektrycznej ze względu na stopień zawilgocenia papieru (rys.1 – krzywe czerwone). W przypadku przekładnika nr 139516 zawilgocenie izolacji oszacowano na poziomie WFDS = 3,6 % (rys.1.a), a dla przekładnika nr 219042 na poziomie WFDS = 3,0 % (rys.1.b). Dodatkowo wyznaczone przewodnictwo oleju wynosiło odpowiednio  $\sigma = 2,2$  [nS/m] oraz  $\sigma = 2,5$  [nS/].



Rys.1. Zależność  $tg\delta = f(f)$  oraz oznaczenie zawilgocenia izolacji w przekładnikach nr 139516 (a) oraz nr 219042 (b)

Są to wartości co najmniej o 3 rzędy wielkości wyższe niż dla olejów w dobrym stanie technicznym i sygnalizują zaawansowany stopień ich zesterzenia.

#### Metoda PDC

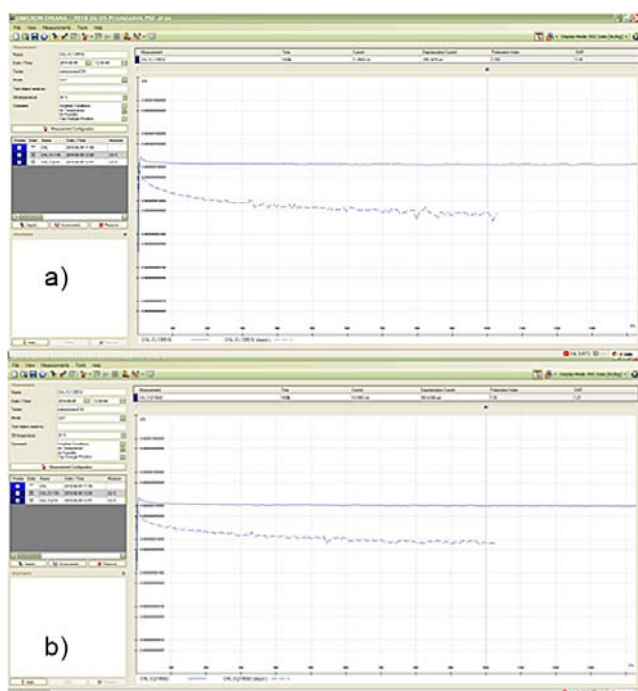
Zastosowano dwa sposoby pomiaru charakterystyk PDC:

- za pomocą miernika Dirana wykorzystując funkcję FDS + PDC (rys.2);
- za pomocą miernika izolacji z dodatkowym pikoamperomierzem.

Zastosowano przy tym trzy napięcia pomiarowe 200 V, 2000 V oraz 10 kV, a przewodnictwo papieru wyznaczono z zależności [1]:

$$(1) \quad \sigma = 29,2 \cdot \frac{i_{lad} - i_{dep}}{U_{pom} \cdot C_{uz}}$$

gdzie:  $i_{lad}$ ,  $i_{dep}$  - odpowiednio prądy ładowania i depolaryzacji izolacji po czasie 100 [s],  $C_{uz}$  - pojemność układu,  $U_{pom}$  - napięcie pomiarowe.



Rys.2. Zmiany w czasie prądów ładowania i depolaryzacji w izolacji przekładników nr 139516 (a) oraz nr 219042 (b) zmierzone miernikiem Dirana

Otrzymane średnie wartości przewodnictwa papieru wynosiły odpowiednio  $\sigma = 21,1$  pS/m dla przekładnika nr 139516 oraz  $\sigma = 15$  pS/m dla przekładnika nr 219042. Wykorzystując charakterystyki wzorcowe zmian przewodnictwa papieru w funkcji zawilgocenia i temperatury [2] wyznaczono zawilgocenie izolacji papierowo-olejowe, które wynosiło odpowiednio  $W_{PDC} \approx 3,8 \pm 3,9\%$  oraz  $W_{PDC} \approx 3,0 \pm 3,2\%$ .

#### Analiza właściwości olejów

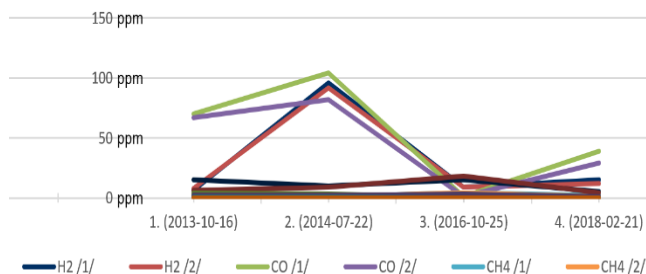
##### Analiza fizykochemicznych właściwości olejów

Stopień zesterzenia i zanieczyszczenia olejów określono wykonując badania właściwości fizykochemicznych w zakresie: napięcia przebicia, liczby kwasowej, współczynnika stratności dielektrycznej  $tg\delta$  w temp. 50 °C, zawartości cząstek stałych. Badania wykazały, że w obu przekładnikach oleje nie spełniały wymagań w zakresie napięcia przebicia ( $U_p$  28,1 kV oraz 37,9 kV),

liczby kwasowej (odpowiednio  $KOH = 0,32$  oraz  $KOH=0,39$ ) zawartości wody rozpuszczonej (47,5 ppm oraz 48,7 ppm) oraz wartości współczynnika  $tg\delta$  (odpowiednio  $tg\delta=0,0224$  oraz  $tg\delta=0,019$ ). Powyższe dane wskazują na znaczne zesterzenie się olejów. Z tych powodów powinny być one wymienione na nowe.

##### Analiza gazów rozpuszczonych w oleju (DGA)

Stwierdzono, że interpretacja wyników badań DGA w aspekcie oceny stanu technicznego przekładników może być obarczona dużym błędem. Bowiem z historii badań DGA wynika, że po 2014 roku obserwowano spadki stężenia wodoru, gazów palnych oraz tlenku i ditlenku węgla w oleju. Prawdopodobnie wynika to z niehermetyzowanej konstrukcji przekładników typu J 110-3, gdzie istnieje możliwość uwalniania się wodoru oraz innych gazów z oleju. Ponadto powstający podczas starzenia izolacji tlenek węgla (CO) utlenia się do ditlenku  $CO_2$ , co również utrudnia ocenę kondycji izolacji. Stąd wyniki analizy DGA uznano za drugorzędne i w mniejszym stopniu uwzględniono je w diagnozie stanu technicznego izolacji przekładników.



Rys. 3. Zmiany stężenia gazów palnych rozpuszczonych w oleju przekładników w latach 2013-2018

#### Ocena procesu degradacji izolacji celulozowej

Podstawowe znaczenie diagnostyczne ma 2FAL, który jest generowany głównie podczas termicznego starzenia celulozy, a ponadto nie ulatnia się z oleju do atmosfery podczas eksploatacji izolacji papierowo-olejowej. Kumulacja 2FAL w oleju powoduje, że na podstawie wartości jego stężenia w oleju można pośrednio oszacować stopień degradacji izolacji celulozowej DP. Przyjmuje się przy tym, że krytyczna długość łańcucha celulozy, poniżej której traci ona właściwości mechaniczne zawiera się w granicach  $DP = 250 \div 350$ . Wartość DP celulozy po długim okresie eksploatacji można określić na podstawie fenomenologicznych zależności podawanych przez różnych autorów [3,4].

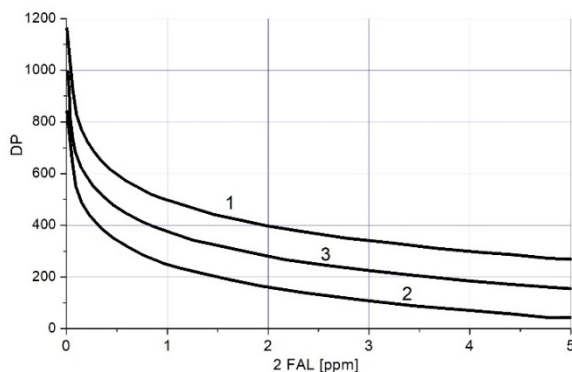
- (2)  $DP = \frac{1,51 - \log(2FAL)}{0,0035}$  wg Chendonga,
- (3)  $DP = \frac{2,5 - \log(2FAL)}{0,005}$  wg Burtona,
- (4)  $DP = \frac{2,6 - \log(2FAL)}{0,0049}$  wg Vuarchexa,
- (5)  $DP = \frac{1,5655 - \log(2FAL)}{0,0035}$  wg Stebbinsa.

Niektóre prace [5,6] podają także charakterystykę pasmową  $DP=f(2FAL)$ , która zawiera zakres prawdopodobnych zmian wartości współczynnika DP. Jest ona definiowana jako:

- (6)  $DP_{max} = 500 - 333 \cdot \log(2FAL_{ppm})$
- (7)  $DP_{sr} = 375 - 316 \cdot \log(2FAL_{ppm})$
- (8)  $DP_{min} = 250 - 300 \cdot \log(2FAL_{ppm})$

W formie graficznej funkcje  $DP=f(FAL)$  wyznaczone według wzorów (6), (7), (8) pokazano na rysunku 4.

W szerokim zakresie zmian wartości 2FAL obliczone z równań (2), (5) oraz (7) stopnie polimeryzacji celulozy DP są bardzo zbliżone. Natomiast znaczne rozbieżności w szacowaniu wartości DP występują przy stosowaniu zależności (3) (4) oraz (8), zwłaszcza w przypadku dużych zawartości 2FAL w oleju. W rezultacie, jak to pokazano na rysunku 3, dla przykładowego stężenia 2FAL=1 ppm oszacowany maksymalny stopień polimeryzacji mieści się w granicach  $DP \approx 500-530$ , natomiast minimalny w granicach  $DP \approx 250$ . W pierwszym przypadku kondycję papieru można uważać za zadowalającą, natomiast w drugim papier jest krańcowo zdegradowany bez jakichkolwiek właściwości mechanicznych. Dlatego do dalszej analizy stanu technicznego przekładników przyjęto wartości stopnia polimeryzacji papieru określonych według zależności (2), (5) oraz (7), które umieszczono w tabeli 1.



Rys.4. Zależność współczynnika DP celulozy od stężenia 2FAL w oleju wg wzorów (6), (7), (8). Wartości  $DP_{max}$  – krzywa 1, wartości  $DP_{min}$  – krzywa 2, wartości  $DP_{sr}$  – krzywa 3

Wskazują one, że w przypadku przekładnika nr 139516 stopień degradacji izolacji można określić jako średni, natomiast w przypadku przekładnika nr 219042 był on niewielki. Stąd można wnioskować, że izolacja papierowo-olejowa obu przekładników charakteryzuje się dobrymi właściwościami mechanicznymi, ponadto nie należy oczekiwać nadmiernej ilości produktów degradacji celulozy. Brak symptomów degradacji celulozy potwierdzają wyniki analizy DGA, w których nie stwierdzono przekroczenia krytycznych stężeń  $CO$  oraz  $CO_2$  dla tego typu urządzeń WN (4500 ppm) [7].

Tabela1. Stopień polimeryzacji celulozy w przekładnikach

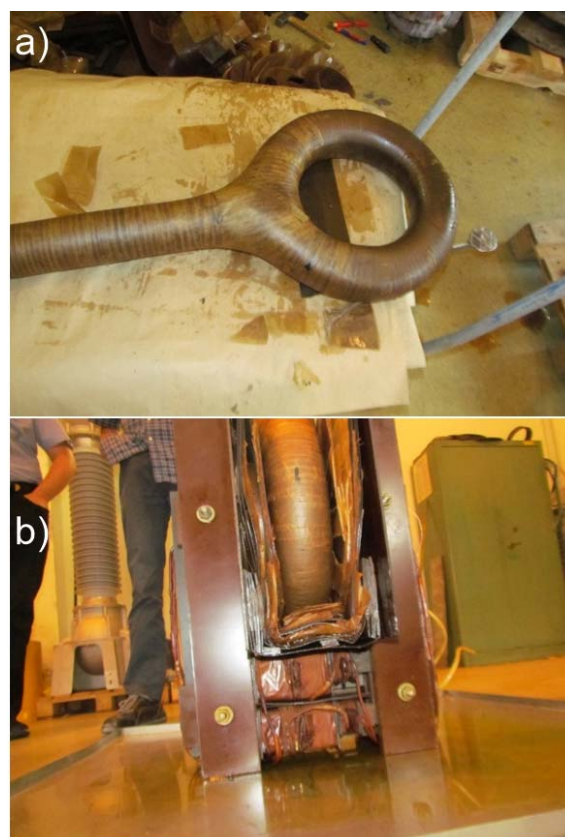
Przekładnik Nr fabr.	2FAL [mg/kg]	DP wg(2) [-]	DP wg(5) [-]	DP wg(7) [-]
139516	0,48	523	538	476
219042	< 0,05	803	819	786

### Rewizja przekładnika typu J 110-3s nr fabr. 139516

W celu potwierdzenia oceny stanu technicznego dokonanej na podstawie pomiarów zawilgocenia, stopnia zatarzenia celulozy oraz badań oleju wykonano rewizję wewnętrzną przekładnika J 110-3s nr fabr. 139516, który został zdemontowany po 61 latach eksploatacji [8,9]. Podczas szczegółowych oględzin przekładnika stwierdzono, że zacisk pomiarowy podłączony jest do rdzeni (uziemiony podczas normalnej pracy), a izolacja stała nie ma wystawienia pojemnościowego. Ponadto papier jest czysty i niełamiwy, bez śladów wosków i degradacji termicznej. Nie zauważono również śladów przebiegów i innych uszkodzeń w izolacji. Tym samym oględziny wykazały, że ocena stanu technicznego przekładnika na podstawie zaawansowanych pomiarów pomiarów elektrycznych i chemicznych jest zgodna z wynikami rewizji wewnętrznej.

### Wydłużenie eksploatacji przekładników

Zastosowane metody badawcze oraz wewnętrzna rewizja przekładnika dały podstawę do stwierdzenia, że ich zły stan techniczny wynika głównie z nadmiernego zawilgocenia izolacji stałej oraz dużego zatarzenia oleju. Nie stwierdzono przy tym skutków dużej aktywności wyladowań niezupełnych, zadowalającą kondycję papieru oraz brak defektów mechanicznych i uszkodzeń struktury układu izolacyjnego. Stąd przyjęto, że poprawę stanu technicznego i przedłużenie eksploatacji przekładników uzyskać poprzez suszenie izolacji papierowej oraz wymianę lub regenerację oleju. Wydaje się przy tym, że czynności te najlepiej jest wykonać w warunkach warsztatowych po zdemontowaniu przekładników. Bowiern, podjęcie próby regeneracji i suszenia przekładnika w warunkach stacyjnych, ze względu na bardzo małą ilość oleju w przekładniku (ok. 70 kg) wymaga bardzo małej kolumny regeneracyjnej oraz konieczności wykonania indywidualnej instalacji wymuszającej obieg oleju w przekładniku.



Rys.5. Widok toru prądowego (a) oraz konstrukcji rdzeni i uzwojeń wtórnych (b) po demontażu przekładnika prądowego J 110 po 61 latach eksploatacji [9]

### Wnioski

W przekładnikach typu J 110 nie jest możliwe zastosowanie standardowej metody pomiarów współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  oraz pojemności izolacji w układzie UST-Y. Jest to spowodowane brakiem wystawienia pojemnościowego w papierowo-olejowej izolacji toru prądowego WN. Z tego powodu pomiary właściwości dielektrycznych należy wykonywać między torem prądowym WN a zwartymi wyprowadzeniami uzwojeń wtórnych i uzemień rdzeni.

Z pomiarów zawilgocenia izolacji przekładników metodami FDS oraz PDC otrzymano zbliżone wyniki, które mieszczą się w granicach dokładności obu metod ( $\Delta W = \pm 0,2\%$ ). Jednak odmienne geometrie układu izolacyjne przekładników i transformatorów powodują, że

oszacowanie zawilgocenia z pomiarów PDC wydaje się bardziej wiarygodne.

Wyznaczone z pomiarów PDC przewodnictwo celulozy było niezależne od wartości napięcia pomiarowego w granicach 200–10000 V. Stąd możliwe wydaje się oszacowanie zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej przekładników przy zastosowaniu klasycznych mierników izolacji posiadających funkcję pomiaru prądu.

Ocena stanu technicznego przekładników na podstawie zaawansowanych metod badawczych była zbieżna z wynikami rewizji wewnętrznej przekładników. Wykazała ona, że pogorszenie się stanu technicznego wynika głównie z nadmiernego zawilgocenia izolacji stałej oraz dużego zesterzenia oleju.

Przekładniki J 110 charakteryzują się dużymi запасami izolacyjnymi, co powoduje że proces starzenia izolacji papierowo-olejowej przebiega znacznie wolniej w porównaniu do współczesnych konstrukcji. Stwarza to warunki do przedłużenia ich eksploatacji po przeprowadzeniu stosunkowo prostych zabiegów regeneracyjnych polegających na suszeniu izolacji stałej oraz wymianie lub regeneracji oleju.

Usunięcie wilgoci z papieru można wykonać tylko poprzez suszenie izolacji stałej w piecu próżniowym. Natomiast ze względów technicznych wymiana oleju na nowy jest zbiegiem mniej skomplikowanym w stosunku do regeneracji. Po wykonaniu tych czynności przekładniki będą charakteryzowały się prawidłowymi parametrami i nadawały się do dalszej eksploatacji zgodnie z przyjętymi kryteriami jak dla współczesnych konstrukcji.

**Autorzy:** mgr inż. Maciej Lechman, Polskie Sieci Elektroenergetyczne, Departament Eksploatacji, ul. Warszawska 165, 05-520 Konstancin-Jeziorna, E-mail: [maciej.lechman@pse.pl](mailto:maciej.lechman@pse.pl) ; prof. dr hab. inż. Jan Subocz, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: [jan.subocz@zut.edu.pl](mailto:jan.subocz@zut.edu.pl).

## LITERATURA

- [1] Subocz J. (red): „Ocena stanu technicznego i zarządzanie populacją transformatorów”, *OBRE*, (2013), ISBN 978-83-924464-3-9
- [2] Zhukowski P., Kołtunowicz T., Kierczyński K., Gutten M, Subocz J., Szrot M.: “ Assessment of water content in an impregnated pressboard based on DC conductivity measurements. Theoretical assumptions”: *IEEE Trans. on DEI*, vol.21, (2014), pp.1268-1275
- [3] L. Selgado, A. de Pablo, Significance of Low Degree of Polymerization of Papers in Transformers, *TJ/ H2B, Transformer 17 – Toruń 9-11.maj 2017 r.*
- [4] Furanic Compounds for Diagnosis, *CIGRE Brochure 494*, (2012).
- [5] Kazimierski M., Olech W.: Diagnostyka techniczna i monitoring transformatorów, *ZPBE Energopomiar-Elektryka Sp. z o.o., Gliwice (2013)*.
- [6] Piotrowski T.: Wykorzystanie związków furanu do oceny zesterzenia izolacji celulozowej transformatorów, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 93 NR 7/2017.
- [7] Instrukcja badania DGA oleju w przekładnikach, *PSE-INST.DGA-Eksploatacja/2015/v1.0*
- [8] Mikulski P., I. Warchlewski I.: Podsumowanie prac badawczych przekładników typu J110-3s i J110-3. *Fabryka Aparatów Elektrycznych „ZWARPOL” Sp. z o.o., 4.07.2018 r.*
- [9] Mikulski P., I. Warchlewski I.: Protokół z rewizji przekładnika prądowego typu J110-3s. *Fabryka Aparatów Elektrycznych „ZWARPOL” Sp. z o.o., 4.07.2018 r.*