

doi:10.15199/48.2015.02.05

Rozkład zawilgocenia w rdzeniu izolatora przepustowego o izolacji typu RBP

Streszczenie. W artykule przedstawiono rozkład zawilgocenia w rdzeniu izolatora przepustowego o izolacji papierowej powleczonej a następnie utwardzonej z użyciem żywicy (izolacja typu RBP – Resin Bonded Paper). Zastosowano dwie metody wyznaczania zawilgocenia, metodę spektroskopii dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości oraz metodę Karla-Fischera. Przedstawione w artykule badania, umożliwiły weryfikację wzorca odpowiedzi dielektrycznej izolacji żywicznej, stosowanego przez autorów do oceny zawilgocenia izolatorów o izolacji typu RBP.

Abstract. The article presents the distribution of moisture in the core of the bushing, insulated by resin coated and then curing paper (RBP - Resin Bonded Paper). Two methods of determining moisture, the method of spectroscopy in the frequency domain and Karl-Fischer method were used. Presented studies made it possible to verify the insulation dielectric response pattern of the resin-paper insulation, which is used by the authors to assess the moisture content in RBP bushings. **Moisture distribution in RBP bushing core.**

Słowa kluczowe: izolator przepustowy, izolacja RBP, spektroskopia dielektryczna w dziedzinie częstotliwości, zawilgocenie.

Keywords: bushing, RBP insulation, frequency domain spectroscopy, moisture

Wstęp

Izolatory przepustowe wysokiego napięcia pracujące obecnie w polskim systemie elektroenergetycznym to głównie izolatory o izolacji papierowo-olejowej (OIP – Oil Impregnated Paper) oraz izolatory o izolacji żywicznej (RBP). Z szacowanej na około 1200 sztuk populacji izolatorów przepustowych transformatorowych wysokiego napięcia około 90% przepustów posiada izolację rdzenia należąca do wspomnianych dwóch rodzajów [1]. Oba typy izolacji są wrażliwe na obecność wody, stąd rekomenduje się badania zawilgocenia tych izolatorów [2, 3, 4].

Obecnie ocena zawilgocenia izolacji izolatorów przepustowych będących w eksploatacji jest możliwa tylko w oparciu o metody pośrednie (metody polaryzacyjne, takie jak metoda prądów polaryzacji i depolaryzacji – PDC lub metoda spektroskopii dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości – FDS). Metody te wymagają jednak wiarygodnych wzorców, którymi mogą być zależności pojemności elektrycznej i strat dielektrycznych od częstotliwości, zawilgocenia i temperatury lub zależności prądów polaryzacji i depolaryzacji od czasu, podanych dla różnych wartości zawilgocenia i temperatury. Dostępne na rynku rozwiązania systemów pomiarowych są wspomagane przez oprogramowanie, w którym zaimplementowano wzorec dla izolacji papierowo-olejowej. Nie jest on niestety odpowiedni dla oceny zawilgocenia izolacji papierowo-żywicznej.

Na Międzynarodowej Konferencji Transformatorowej, Transformator 2013, przedstawiono wzorec zawilgocenia przygotowany dla izolacji papierowo-żywicznej (RBP) [5]. Wzorec ten został przygotowany na bazie specjalnie wykonanych modeli izolacji papierowo-żywicznej (technologia wykonania modeli została opisana w [6]), które spreparowano w taki sposób, aby posiadały różny stopień zawilgocenia (od 0,5 do 3,5%). W niniejszym artykule przedstawiono weryfikację przygotowanych wzorców na obiekcie rzeczywistym, jakim jest rdzeń izolatora przepustowego wykonany w technologii RBP. Przedstawiony tu eksperyment zaplanowano w taki sposób, aby poza weryfikacją wzorca umożliwić określenie rozkładu zawilgocenia w rdzeniu izolatora.

Obiekt badań

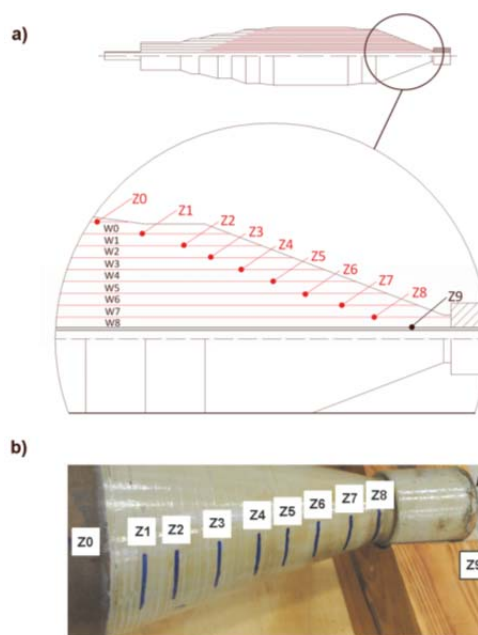
Obiektem badań był rdzeń izolatora przepustowego o izolacji zwijanej typu kondensatorowego wykonany w technologii RBP (rys. 1). Sterowanie pola elektrycznego w izolatorze zapewniało 45 aluminiowych okładzin. Rdzeń pracował w izolatorze przepustowym transformatorowym,

po awarii osłony był przechowywany w warunkach napowietrznych i mógł absorbować wodę z atmosfery.



Rys.1. Rdzeń izolatora przepustowego transformatorowego typu kondensatorowego, wykonany w technologii RBP

Autor zdecydował, aby mierzyć odpowiedź dielektryczną między kolejnymi warstwami izolacji, przy czym, jako warstwę izolacji przyjęto obszar objęty pięcioma kolejnymi ekranami sterującymi (okładzinami aluminiowymi). W ten sposób utworzono dziewięć warstw, oznaczonych kolejno od warstwy zewnętrznej symbolami od W0 do W8 (rys. 2a). Co piąty ekran sterujący oznaczono symbolami od Z0 do Z8, oraz trzpień izolatora jako Z9 (tak więc warstwa W0 zawiera się między ekranami Z0 i Z1, warstwa W1 między ekranami Z1 i Z2 itd), co przedstawiono na rysunku 2b.

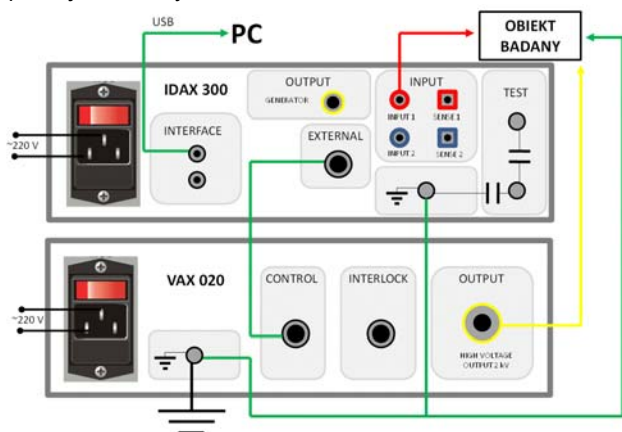


Rys.2. Rdzeń izolatora z oznaczeniem warstw (od W0 do W8) oraz wybranymi na elektrody pomiarowe okładzinami aluminiowymi oznaczonymi od Z1 do Z8; trzpień izolatora oznaczono jako Z9

Ekran Z0 jest podczas pracy izolatora uziemiony (zazwyczaj przez zacisk pomiarowy, wykorzystywany w diagnostyce izolatora przepustowego).

Układy pomiarowe i metodyka badań

Odpowiedź dielektryczną w postaci zależności pojemności elektrycznej oraz tangensa kąta strat dielektrycznych od częstotliwości mierzono z użyciem systemu pomiarowego IDAX 300 wyposażonego dodatkowo w zewnętrzne źródło wysokiego napięcia (VAX 020), które umożliwiało podanie na badany obiekt napięcia sinusoidalnie zmiennego o wartości szczytowej 2 kV o częstotliwości (zmienianej z krokiem trzech wartości na dekadę) w zakresie od 0,1 do 1000 Hz. Połączenie obu urządzeń było zrealizowane zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 3. Sterowanie sekwencją pomiarową oraz akwizycję danych realizowano z użyciem aplikacji „IDAX System Control”.



Rys.3. Schemat połączenia systemu pomiarowego IDAX 300 ze wzmacniaczem VAX 020, obiektem badań oraz komputerem służącym do serowania procesem pomiaru i akwizycji danych

Pomiary odpowiedzi dielektrycznej przeprowadzono w dwóch układach połączeń przedstawionych w tabeli 1. W pierwszym układzie pomiaru dokonywano przykładając napięcie do trzpienia izolatora, podczas gdy elektrodę pomiarową stanowiły kolejno wybrane (opisane w punkcie

2) ekrany oznaczone od Z0 do Z8. W tym wypadku wartość szczytowa napięcia wymuszającego wynosiła 2000 V.

W drugim układzie połączeń mierzono odpowiedź dielektryczną warstw izolacji (od W0 do W8) podłączając wybrane ekrany kolejno parami, np. pomiar między Z0 i Z1, następnie między Z1 i Z2, itd., aż do pary Z8-Z9. Ze względu na niewielkie odległości między końcami ekranów sterujących napięcie pomiarowe obniżono do 200 V wartości szczytowej.

Wszystkie pomiary wykonywano w układzie połączeń typu UST (układ trój elektrodowy z separacją prądów płynących do elektrody separującej). Jako elektrodę separującą wykorzystano specjalnie nawiniętą warstwę folii miedzianej umieszczonej w obszarze, gdzie podczas normalnej pracy izolatora znajduje się kołnierz przepustu. Element ten był podłączony do zacisku uziemiającego układu pomiarowego.

Połączenie przewodów pomiarowych do poszczególnych elektrod realizowano poprzez wbicie stalowej igły w izolację w miejscu, gdzie kończyły się aluminiowe ekrany przepustu. Po stronie olejowej przepustu końce ekranów były umieszczone praktycznie przy powierzchni izolatora, co umożliwiło podłączenie do wybranego ekranu bez ryzyka zwarcia do pozostałych.

Temperatura obiektu w trakcie wykonywania badań wynosiła $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Temperaturę mierzono przy użyciu termopar umieszczonych wewnątrz rury toru prądowego przepustu oraz przyklejonych na powierzchni elektrody uziemionej.

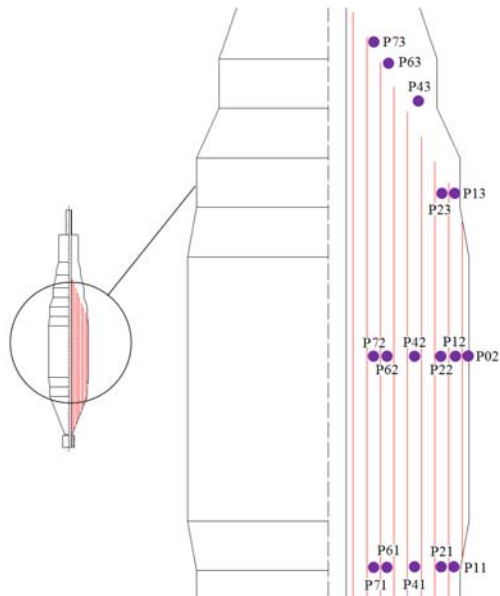
Po przeprowadzeniu pomiarów odpowiedzi dielektrycznej pobrano próbki izolacji do badań zawartości wody przy użyciu metody fizykochemicznej Karla-Fischera. Miejsca, z których pobrano próbki przedstawiono na rysunku 4a. Rdzeń izolatora umieszczono w kłach tokarki, a następnie skrawano kolejne warstwy izolacji. Po zdjęciu odpowiedniej liczby warstw pobierano próbki, a następnie skrawano kolejne warstwy. Jak widać na rysunku 4a próbki pobierano dla każdej z warstw w trzech miejscach: w części olejowej, środkowej i napowietrznej. Poszczególne próbki oznaczono symbolem „Pxy”, gdzie x oznacza numer warstwy, natomiast y lokalizację miejsca pobrania wzdłuż izolatora (1 – część olejowa, 2 – część środkowa, 3 – część napowietrzna). Próbki po pobraniu zostały umieszczone w szczelnych fiolkach wypełnionych metanolem o znanej zawartości wody.

Tabela. 1. Opis układów pomiarowych do badań odpowiedzi dielektrycznej

Układ połączeń	Opis
1	<ul style="list-style-type: none"> • przewód wysokonapięciowy (HV OUTPUT 2 kV) podłączony do rdzenia Z9 • przewód pomiarowy (INPUT 1) podłączany kolejno do elektrod: Z0, Z1...Z8
2	<ul style="list-style-type: none"> • przewód napięciowy (HV OUTPUT) podłączany kolejno do elektrod: Z0, Z1...Z8 • przewód pomiarowy (INPUT 1) podłączany kolejno do elektrod: Z1, Z2...Z9

Wszystkie fiolki umieszczono w wyrząsarce OS-10 firmy BIOSAN i pozostawiono na czas około 24 godzin. W tym czasie zaszła ekstrakcja wody zawartej w próbkach papieru do metanolu.

Miareczkowanie przeprowadzono zgodnie z zaleceniami normy IEC 60814 z użyciem kulometru KF 831 wyposażonego w naczynie do miareczkowania (728 Stirrer) firmy METROHM. Ponadto wykorzystano wagę laboratoryjną o rozdzielczości 0,1 mg.



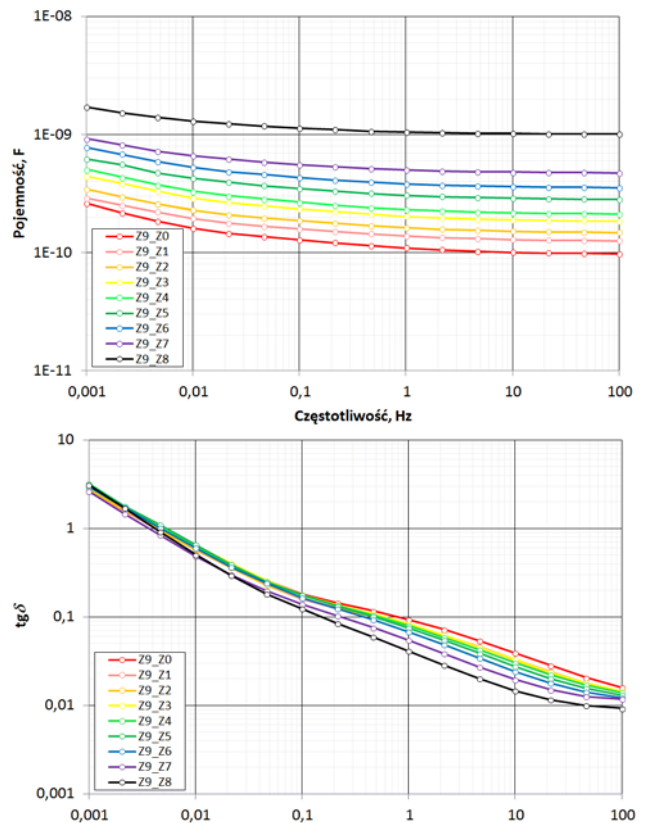
Rys.4. Miejsca pobrania oraz oznaczenie próbek do badań zawartości wody metodą fizykochemiczną KF

Wyniki badań

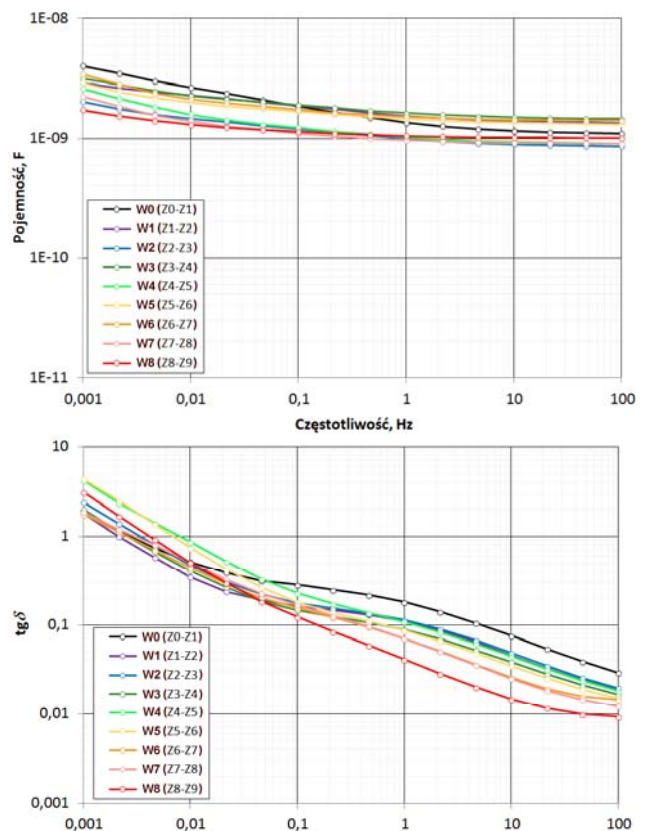
Na rysunku 5 przedstawiono odpowiedź dielektryczną (pojemność elektryczną i tangens kąta strat dielektrycznych w zależności od częstotliwości) wyznaczoną dla różnych obszarów zawartych między trzpieniem izolatora (Z9) a kolejnymi wybranymi elektrodami (od Z8 do Z0). Pomiar prowadzono zgodnie z pierwszym schematem pomiarowym opisanym w punkcie 3. Zgodnie z oczekiwaniami pojemność elektryczna wzrasta wraz ze zmniejszaniem się grubości izolacji zawartej między elektrodami. Ciekawsze są zależności tangensa kąta strat, które wskazują na nierównomierny rozkład zawilgocenia izolacji.

Najniższe straty zaobserwowano dla warstwy bezpośrednio przylegającej do rdzenia. Dodawanie kolejnych warstw do obszaru objętego pomiarem powoduje wzrost strat dielektrycznych. Zatem kolejne warstwy mają zapewne wyższy $tg\delta$. Sugeruje to, że rdzeń izolatora absorbował wodę z otoczenia, co można wytłumaczyć faktem, że po awarii osłony składowano rdzeń w skrzyni w otoczeniu powietrza atmosferycznego (poza obecnością, fragmentami uszkodzonej warstwy farby na zewnątrz rdzenia, nie był w żaden inny sposób chroniony przed działaniem wilgoci z powietrza).

Rysunek 6 przedstawia odpowiedź dielektryczną kolejnych warstw izolacji (od W0 do W8). Pomiar przeprowadzono w drugim układzie połączeń opisanym w punkcie 3. Pojemność elektryczna poszczególnych warstw jest podobna, odchyłki w jej wartościach dla częstotliwości 50 Hz nie są większe niż 20% w odniesieniu do średniej. Potwierdzono, że najniższe straty dielektryczne wykazuje warstwa przy trzpieniu (warstwa W8), większe straty zmierzono dla warstw od W1 do W7, natomiast najwyższe dla warstwy zewnętrznej W0.



Rys.5. Odpowiedź dielektryczna fragmentów izolacji rdzenia izolatora mierzona od trzpienia (Z9) do wybranych ekranów (od Z0 do Z8); temperatura izolacji 25°C



Rys.6. Odpowiedź dielektryczna fragmentów izolacji rdzenia izolatora mierzona dla kolejnych warstw izolacji od W0 do W8, temperatura izolacji 25°C

Na rysunkach 5 i 6 można zauważyć, że zmiany strat dielektrycznych (związane ze zmianami zawilgocenia) w wypadku izolacji RBP, są widoczne tylko w zakresie częstotliwości od 0,1 Hz do 100 Hz. Poniżej i powyżej tego zakresu wnioskowanie na temat zawilgocenia będzie prowadziło do fałszywych wniosków. Oczywiście należy wziąć pod uwagę wpływ temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury zjawiska polaryzacyjne zachodzą szybciej i zakres użyteczny przesunął się w stronę wyższych częstotliwości zgodnie z zależnością Arrheniusa z energią aktywacji około 0,9 eV. Dokładne wyznaczenie tej energii

oraz zakresów częstotliwości, dla których można ją stosować jest przedmiotem prowadzonych aktualnie badań.

W tabeli 2 zestawiono wyniki pomiarów zawartości wody w pobranych próbkach, obliczoną na ich podstawie średnią zawartość wody w warstwie oraz zawartość wody wyznaczoną na podstawie analizy odpowiedzi dielektrycznej. Niestety jedna z pobranych próbek (P73) najprawdopodobniej uległa zanieczyszczeniu wodą obcą, ponieważ uzyskany wynik znacznie przewyższał pozostałe. Wynik ten został sklasyfikowany jako błąd grubo i nie był brany pod uwagę przy dalszej analizie.

Tabela 2.. Zestawienie wyników pomiarów zawilgocenia próbek metodą KF oraz warstw metodą FDS

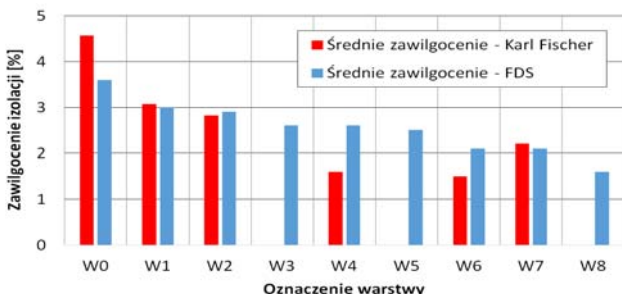
Oznaczenie warstwy	Zawilgocenie określone za pomocą metody fizykochemicznej KF				Zawilgocenie określone na podstawie analizy odpowiedzi dielektrycznej
	próbki z części napowietrznej	próbki z części centralnej	próbki z części olejowej	średnia dla warstwy	
	[%]	[%]	[%]	[%]	
W0	-	4,57	-	4,57	3,6
W1	2,38	2,71	4,11	3,07	3,0
W2	1,67	1,74	5,05	2,82	2,9
W3	-	-	-	-	2,6
W4	1,35	1,51	1,93	1,60	2,6
W5	-	-	-	-	2,5
W6	1,62	1,37	1,5	1,50	2,1
W7	Błąd oznaczenia	2,37	2,21	2,21	2,1
W8	-	-	-	-	1,6

Uśrednione wyniki zawartości wody uzyskane z użyciem metody KF korespondują co do trendu zmian z wynikami uzyskanymi z metody FDS, co przedstawiono na rysunku 7. Obserwowane rozbieżności wyników dla poszczególnych warstw mogą wynikać z faktu, że ocena zawilgocenia z użyciem metody fizykochemicznej dotyczy jedynie punktów, z których został pobrany materiał badawczy, a metoda FDS uśrednia wynik z całego obszaru badań.

wzrostem temperatury oraz w stronę niższych częstotliwości w wypadku niższych wartości temperatury.

Wartości średnie zawartości wody w izolacji rdzenia wyznaczone metodą fizykochemiczną (KF) i metodą polaryzacyjną (FDS z wykorzystaniem wzorca dla izolacji papierowo-żywicznej) są zbliżone.

Prezentowany artykuł został opracowany po prezentacji na Konferencji Transformatory Energetyczne i Specjalne w Kazimierzu Dolnym w październiku 2014 roku z uwzględnieniem sugestii uczestników wynikających z dyskusji na sesji plenarnej.



Rys.7. Średnia wartość zawilgocenia w warstwie obliczona na podstawie zawartości wody w pobranych próbkach (metoda KF) oraz zawilgocenie warstw wyznaczone przy użyciu metody FDS

Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań wskazują, że izolacja papierowa sklejana żywicami może ulegać zawilgoceniu w podobnym stopniu jak izolacja papierowo-olejowa. Jednak szybkość migracji wody w obu tych rodzajach izolacji jest różna (mniejsza w wypadku izolacji typu RBP).

W wypadku badanego izolatora woda zawarta w izolacji pochodziła z powietrza atmosferycznego, na co wskazuje rozkład zawilgocenia (największe wartości stwierdzono na zewnątrz rdzenia, im bliżej trzpienia przepustu tym zawilgocenie jest mniejsze).

Zakres częstotliwości, który można określić pasmem diagnostycznym (gdzie odpowiedź dielektryczna wykazuje zależność od zawilgocenia izolacji) w temperaturze 25°C zawiera się od 0,1 do 100 Hz. Zakres ten będzie ulegał przesunięciu w stronę wyższych częstotliwości wraz ze

LITERATURA

- [1] Zakrzewski K., Prace diagnostyczne w zakresie dużych transformatorów w Polsce, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, nr 66, Studia i Materiały nr 32, Wrocław, 2012
- [2] Ramowa instrukcja Eksploatacji Transformatorów, Wydawnictwo Energopomiar – Elektryka, Gliwice 2012
- [3] Zarządzenie DE/78/2014 Dyrektora Departamentu Eksploatacji w sprawie zatwierdzenia nowych kryteriów DGA i metod diagnostycznych izolatorów przepustowych transformatorów eksploatowanych w PSE S.A., Konstancin-Jeziorna, 24.08.2014
- [4] Sumereder C., Gumpinger A., Latest Findings at Transformer Bushings Condition Evaluation by Dielectric Response Methods, *Study Committee B3 & Study Committee D1, Colloquium*, 9-11 September 2013, Brisbane, Australia, pp.1-8
- [5] Gielniak J., Graczkowski A., Walczak K., Morańda H., Przybyłek P., Polak F., Doświadczenia z badań izolatorów przepustowych wysokiego napięcia z użyciem metody spektroskopii dielektrycznej, *Międzynarodowa Konferencja Transformatorowa: Transformator 2013*, Gdańsk, 5-7 czerwca, 2013, s.14/1-14/10
- [6] Morańda H., Przybyłek P., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., Badania modelowe izolatorów OIP i RBP w aspekcie wystąpienia bubble effect, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, nr 2, 2013, Vol.59, p. 172-175

Autor: dr inż. Jarosław Gielniak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: jaroslaw.gielniak@put.poznan.pl