

Analiza pomiarów termoluminescencji izolatorów porcelanowych średniego napięcia

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki analizy statystycznej w oparciu o jednoczynnikową analizę wariancji ANOVA, na podstawie danych uzyskanych z pomiarów zjawiska termicznie stymulowanej luminescencji (TL) w izolatorach porcelanowych LSP-24, produkowanych z masy porcelany elektrotechnicznej C120 i C130. Ponadto, dogłębnie omówiono metodykę wybranego sposobu do analizy danych pomiarowych, które otrzymano podczas badań termoluminescencji izolatorów energetycznych w konfiguracji podstawowej aparatury laboratoryjnej oraz rozszerzonej.

Abstract. The paper summarizes the results of a statistical analysis based on the ANOVA method for data obtained from measurements of the phenomenon of thermally stimulated luminescence (TL) in porcelain insulators LSP-24 manufactured from the mass of electrical porcelain C120 and C130. In addition, the analysis methodology of data, obtained as the result of the thermoluminescence measurements for power insulators with basic and extended configuration of laboratory equipment, was thoroughly discussed. (**Analysis of the thermoluminescence measurements of porcelain medium-voltage insulators**).

Słowa kluczowe: analiza statystyczna, ANOVA, termoluminescencja (TL), izolatory porcelanowe.

Keywords: statistical analysis, ANOVA, thermoluminescence (TL), porcelain insulators.

Wstęp

Dostępne metody analizy danych w znacznym stopniu ułatwiają opracowanie statystyczne wyników pomiarów laboratoryjnych. Dotyczy to także elektroenergetyki, szczególnie w takich przypadkach, gdy wyniki badań są dużymi zbiorami danych, zawierającymi szeregi chronologiczne [1].

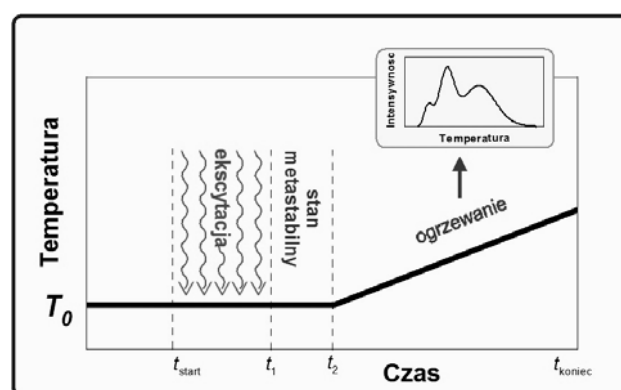
Do opracowania wyników pomiarów termoluminescencji (TL) izolatorów porcelanowych typu LSP-24 wykorzystano metodę analizy wariancji. Podstawy tej analizy zostały opracowane przez R. A. Fisher'a. Omawiany w artykule sposób prowadzenia analizy oparto na metodyce opisanej przez S. Brandt'a [2]. Podstawowy problem sprowadza się do analizy kilku serii pomiarów wykonywanych dla różnych warunków. Na wynik próby mogą wpływać różne czynniki (zmienne) zewnętrzne, natomiast analiza wariancji ma za zadanie potwierdzić istotność ich wpływu. W celu rozwiązania tak postawionego zadania, gdy dysponuje się tylko dwoma próbami, możliwe jest wykorzystanie testu różnic Studenta. Dla przypadków większej liczby prób do dyspozycji jest analiza wariancji z pojedynczą klasyfikacją, gdy uwzględniana jest tylko jedna zmienna, lub analiza wariancji z wielokrotną klasyfikacją stosowana w przypadku wielu zmiennych zewnętrznych [2].

Termoluminescencja porcelany elektrotechnicznej izolatorów

Zjawisko termicznie stymulowanej luminescencji TL występuje wtedy, gdy materiał emituje światło pod wpływem zmiany temperatury, lecz nie jest to promieniowanie termiczne. Mechanizm powstawania zjawiska TL, z rejestracją intensywności TL w funkcji temperatury przedstawiono na rysunku 1.

Zjawisko występowania oraz charakterystyka termoluminescencji w izolatorach porcelanowych niejednokrotnie opisywana już była w kilku publikacjach naukowych. Za pionierów tych badań można uważać Ramzaev'a i Gökusu'a, którzy w dziedzinie dozimetrii wykorzystali pomiary TL do wyznaczenia dawki promieniowania jonizującego pochłoniętej przez izolatory podczas kontrolowanego wybuchu nuklearnego, który miał miejsce w Rosji.

W prowadzonych badaniach podjęto próbę wykorzystania zjawiska TL do opracowania metody diagnostyki jakościowej i związanej z procesem starzenia



się materiału ceramicznych izolatorów energetycznych średniego napięcia typu LSP-24.

Rys. 1. Mechanizm zjawiska termoluminescencji

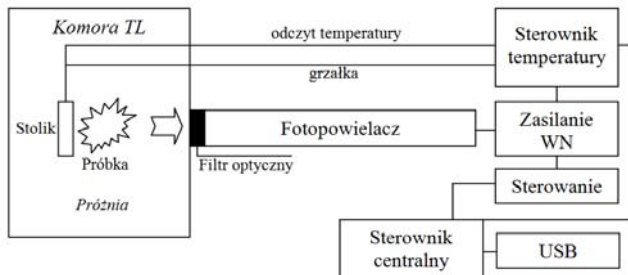
Materiał do badań w postaci próbek porcelany elektrotechnicznej o średnicy ok. 5 mm pobierano w sposób mechaniczny z wcześniej ustalonych miejsc izolatora energetycznego. Przyjęto trzy, uznane za istotne, punkty do badań: środek (rdzeń), część wewnętrzną (kołpak) oraz osłonowa warstwa zewnętrzna (szkliwo).

Wykorzystując tak przygotowane próbki mierzono termoluminescencję naturalną, w której ekscytacja dokonywała się samorzutnie poprzez naturalne promieniowanie jonizujące, tzw. promieniowanie tła.

W celu wzmocnienia siły rejestrowanego sygnału część próbek ekscytowano dodatkowo źródłem promieniowania beta $^{90}_{90}\text{Sr}$ $^{90}_{90}\text{Y}$. Do pomiaru próbka była montowana na stoliku grzewczym kriostatu (Rys.2). W celu uniknięcia niepożądanego deekscytacji materiału, czynności te, jak również samo przygotowanie próbki, wykonywano w ciemności, używając jedynie słabego czerwonego światła. Pomiaru TL dokonywano podczas liniowego ogrzewania próbki z szybkością $\beta = 0,7$ K/s w zakresie temperatur 300 – 600 K. Rolę detektora pełnił fotopowielacz białkaliczny firmy Hamamatsu działający w trybie zliczania fotonów (*photon counting*).

W wysokich temperaturach (powyżej 530 K) pomiar TL może być silnie zaburzony przez naturalne promieniowanie termiczne. Dlatego też, po zakończeniu właściwego pomiaru, dokonywano pomiaru tła, które w dalszym etapie odejmowano od zmierzonego widma. Próbki ekscytowane były w czasie ok. 3 dób (dawka ok. 265 Gy).

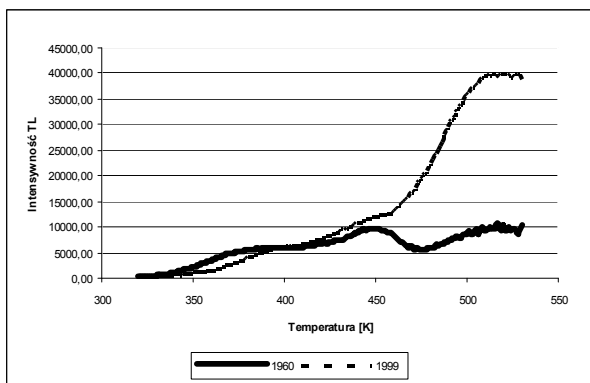
W opisywanych w tym artykule badaniach TL dawka promieniowania była znana i przyjęta zgodnie z metodyką badawczą (~265 Gy), a celem pomiarów była diagnostyka struktury defektowej sieci krystalicznej izolatorów elektroenergetycznych z okresu lat 1960 - 2012 produkowanych w tym czasie z dwóch rodzajów masy ceramicznej C120 i C130. Dzięki tym badaniom możliwe jest różnicowanie obu rodzajów mas porcelany elektrotechnicznej stosowanej w elektroenergetyce.



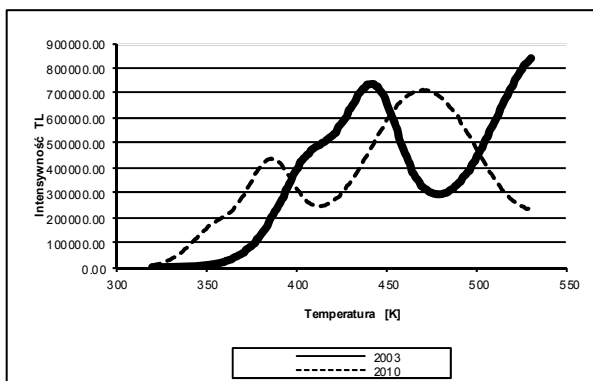
Rys.2. Schemat stanowiska do pomiaru termoluminescencji

Zjawisko luminescencji związane jest z występowaniem dużej liczby defektów strukturalnych materiału izolacyjnego spowodowanych np.: domieszkami, wtrąceniami, dyslokacjami itp. Przekłada się to na jakość materiału, a defekty powodują powstanie zlokalizowanych stanów energetycznych wewnątrz przerwy wzbronionej izolatora.

Otrzymane wyniki badań termoluminescencji w dalszej części poddano analizie statystycznej celem potwierdzenia hipotezy o możliwości różnicowania mas porcelany elektrotechnicznej stosowanej w izolatorach elektroenergetycznych LSP-24.



Rys.3. Charakterystyki termoluminescencji próbek masy ceramicznej C120 pobranych z okolic kołpaka izolatorów produkowanych w roku 1960 i 1999 [1]



Rys.4. Charakterystyki termoluminescencji próbek masy ceramicznej C130, pobranych z okolic kołpaka izolatorów produkowanych w roku 2003 i 2010 [1]

Analiza ANOVA

Jednoczynnikowa analiza wariancji ANOVA (*Analysis of Variance*) to test statystyczny służący do weryfikacji hipotezy o równości wartości średnich wielu populacji. Przy ocenie wyników badań TL można uwzględnić analizę wariancji z klasyfikacją pojedynczą, czyli jednoczynnikową analizę wariancji. Omawiana analiza ANOVA określa prawdopodobieństwo, z jakim dany czynnik wywołuje różnice pomiędzy średnimi grupowymi [1].

Rozważa się próbę o liczebności n , którą zgodnie z przyjętym kryterium dzieli się na r grup lub klas. Każda z tych r grup pobrana została z populacji o rozkładzie normalnym z wartością wariancji σ^2 . W ogólnym przypadku kryterium określone jest poprzez sposób pobierania próby lub sposób prowadzonego pomiaru. W związku z powyższym, celem analizy ANOVA jest wykrycie wpływu warunków zewnętrznych na własności próby. [3]

Przeprowadzono r eksperymentów (każdy z tych eksperymentów to charakterystyka dla jednej próbki masy ceramicznej izolatora C120 lub C130) dla n_i punktów pomiarowych. Przykładowe przebiegi charakterystyk termoluminescencji podano na rysunkach 3 i 4. Każdy z r eksperymentów przyjęto jako próbę losową. Przyjęto, iż z populacji wylosowanych jest r prób, każda o liczebności n_i , które przyjmują wartości: $x_{ij}, i = 1, \dots, r; j = 1, \dots, n_i$.

Spełniona jest zależność:

$$(1) \quad n = \sum_{i=1}^r n_i$$

Sprawdzeniu prawdziwości poddano hipotezę H_0 , która mówi o równości wartości średnich z poszczególnych populacji [3]. Brak przesłanek do odrzucenia hipotezy H_0 oznacza, iż wszystkie próby pochodzą z tego samego rozkładu normalnego o wariancji równej σ^2 . Zakładając prawdziwość hipotezy, jednocześnie uznano, iż Q jest sumą kwadratów zmiennych losowych o rozkładzie normalnym, a to implikuje, że wartość Q/σ^2 ma rozkład χ^2 o $n-1$ stopniach swobody. Podobnie wnioskuje się o rozkładzie sumy dla każdej grupy Q_i/σ^2 , wyrażonej następującym wzorem:

$$(2) \quad \frac{Q_i}{\sigma^2} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$$

Wielkości Q_i/σ^2 mają rozkłady χ^2 o $n_i - 1$ stopniach swobody. Toteż wyznaczona została wielkość Q_W/σ^2 równa:

$$(3) \quad \frac{Q_W}{\sigma^2} = \sum_{i=1}^r \frac{Q_i}{\sigma^2}$$

Suma Q_W/σ^2 ma zatem rozkład χ^2 o liczbie stopni swobody określonej sumą:

$$(4) \quad \sum_{i=1}^r (n_i - 1) = n - r$$

Nieobciążonymi estymatorami wariancji populacji są następujące wielkości:

$$(5a) \quad s^2 = \frac{Q}{n - 1}$$

$$(5b) \quad s_K^2 = \frac{Q_K}{r - 1}$$

$$(5c) \quad s_W^2 = \frac{Q_W}{n - r}$$

Hipoteza H_0 odrzucana jest przy zadanym poziomie istotności α , gdy zachodzi nierówność (test F Fisher'a - Snedecor'a):

$$(6) \quad F > F_{1-\alpha}(r-1, n-r)$$

Natomiast statystykę testu Fisher'a - Snedecor'a wyznacza się z poniższego wzoru:

$$(7) \quad F = \frac{S_K^2}{S_W^2}$$

Jeżeli dokonywana jest analiza wariancji, to próby dla poszczególnych grup muszą posiadać rozkład normalny. Natomiast, gdy gęstość prawdopodobieństwa odbiega od rozkładu normalnego, np. jest rozkładem skośnym, to remedium są przekształcenia dające dobre przybliżenia do rozkładu normalnego [2], np. przekształcenie określone wzorem (8):

$$(8) \quad x = a \log(x' + b)$$

gdzie: a, b - stałe dobrane eksperymentalnie, x' - wyniki pomiarów TL izolatorów LSP-24.

Badania rozkładów w poszczególnych grupach wykonane zostały w oparciu o omawianą metodę ANOVA przy wykorzystaniu pakietu analizy danych dostępnego w programie MS Office Excel. Testy analizy wariancji przeprowadzono na przekształconych danych otrzymanych w pomiarach TL zgodnie ze wzorem (8), w którym założono $a = 1$ i $b = 0$. Pozwoliło to na spełnienie podstawowego warunku dla prowadzenia analizy wariancji, jakim jest wymóg, aby próby dla poszczególnych grup posiadały rozkład normalny. Po przekształceniach poddano badaniu każdą próbę potwierdzając jej rozkład normalny o wartości oczekiwanej oraz odchyleniu standardowym zgodnym z badaną próbą. Podczas wykonywanej analizy użyto testu Kołmogorow'a - Smirnow'a, który miał za zadanie porównać rozkłady dla dwóch prób. Hipoteza H_0 zakłada, iż obie próby pochodzą z tego samego rozkładu. Dla wszystkich analizowanych prób przy założonym poziomie istotności $\alpha = 0,1$ nie ma zatem żadnych podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 [4].

Wyniki analizy ANOVA dla pomiarów TL w konfiguracji podstawowej

Konfigurację podstawową należy rozumieć jako standardowy układ aparatury laboratoryjnej do badań TL wyposażony tylko w okno kwarcowe przed ftopowielaczem (bez dodatkowych filtrów optycznych), przyjętą zgodnie z metodyką badań termoluminescencji izolatorów porcelanowych opisywaną w [4, 5].

W tabeli 1 przedstawione zostały zbiorcze wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji dla wybranych eksperymentów otrzymanych w badaniach TL izolatorów w konfiguracji podstawowej. Opisy w tabeli są zgodne z oznaczeniami przyjętymi w programie MS Office Excel. Test dotyczył r grup próbek badawczych porcelany elektrotechnicznej pobranych z okolic kołpaka oraz okolic rdzenia izolatorów z lat 1960, 1999 dla masy ceramicznej C120 oraz z lat 2003, 2005, 2010 i 2012 dla masy ceramicznej o oznaczeniu C130 (w tym przypadku każdy rok stanowił grupę). Liczność każdej z próbek to $n_i = 241$ pomiarów.

Wartości wyznaczonych statystyk F , należy porównywać z wartościami tablicowymi $F_{1-\alpha}$ przy założonym poziomie ufności $\alpha = 0,05$, znajdującymi się w tabeli 1 w kolumnie Test F . Hipotezę H_0 o równości wartości średnich

z poszczególnych populacji należy odrzucić dla przypadków, gdy zachodzi zależność (6), czyli $F > Test F$.

Tabela 1. Wyniki zbiorcze jednoczynnikowej analizy wariancji dla pomiarów TL w konfiguracji podstawowej [4]

Opis próbek	Opis grup	Wartość statystyki F	Test $F_{1-\alpha}$	Wynik testu
Próbki z okolic kołpaka, masa C120	1. próbka z 1960r. 2. próbka z 1999r.	7,03	3,86	należy odrzucić H_0
Próbki z okolic rdzenia, masa C120	1. próbka z 1960r. 2. próbka z 1999r.	0,11	3,86	nie ma podstaw do odrzucenia H_0
Próbki z okolic kołpaka, masa C130	1. próbka z 2003r. 2. z 2005r. 3. z 2010r. 4. z 2012r.	70,98	2,61	należy odrzucić H_0
Próbki z okolic rdzenia, masa C130	1. próbka z 2003r. 2. z 2005r. 3. z 2010r.	78,6	3,01	należy odrzucić H_0
Próbki z okolic kołpaka, masa C130, krótki okres eksploatacji	1. próbka z 2010r. 2. próbka z 2012r.	135,5	3,86	należy odrzucić H_0
Próbki z okolic kołpaka, masa C130, dłuższy okres eksploatacji	1. próbka z 2003r. 2. próbka z 2005r.	2,36	3,86	nie ma podstaw do odrzucenia H_0
Próbki z okolic rdzenia, masa C130, dłuższy okres eksploatacji	1. próbka z 2003r. 2. próbka z 2005r.	133,71	3,86	należy odrzucić H_0

Tylko wartości statystyk F dla próbek pobranych z okolic rdzenia izolatora wykonanego z masy ceramicznej C120 oraz dla próbek z okolic kołpaka dla masy ceramicznej C130 (próbki o dłuższym okresie eksploatacji) nie spełniają zależności (6), dlatego też hipoteza H_0 w tym przypadku nie może być odrzucona. W związku z tym wniosek jest następujący: różnice w obserwacjach w przypadku powyższych próbek porcelany elektrotechnicznej mają charakter losowy. Wyniki obserwacji dla tych przypadków nie wykazują znaczących różnic przy porównaniu danych uzyskanych w badaniach termoluminescencji izolatorów.

Natomiast, wartości statystyk dla pozostałych przeprowadzonych testów spełniają zależności (6), dlatego też hipoteza H_0 w tych przypadkach musi być odrzucona. Wyniki analizy dla omawianych przypadków wykazują bowiem znaczące różnice podczas porównania wartości intensywności termoluminescencji. [4]

Wyniki analizy ANOVA dla pomiarów TL z filtrem optycznym BG-39

W kolejnych badaniach TL aparaturę laboratoryjną wyposażono dodatkowo w filtr optyczny (okular BG-39 firmy Shott), który pełnił rolę separatora promieniowania termicznego tła oraz pozwolił na rejestrację światła luminescencyjnego w zakresie długości fali $300 \div 700$ nm. [6] Co więcej, część materiału badawczego została napromieniona akceleratorem medycznym, przy zachowaniu tej samej dawki promieniowania jonizującego.

W tabeli 2 przedstawiono zbiorcze wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji dla wybranych eksperymentów otrzymanych w badaniach TL z filtrem optycznym BG-39. Test dotyczył r grup próbek porcelany elektrotechnicznej pobranej z okolic kołpaka i rdzenia izolatorów z lat 1960, 1963, 1970, 1975, 1995 i 1999 (masa ceramiczna C120) oraz z lat 2003, 2005, 2010 i 2012 dla masy porcelany elektrotechnicznej C130 (każdy rok w tym przypadku stanowił grupę). Zakres analizowanych wartości intensywności termoluminescencji ograniczono do przedziału temperatur $350 \div 515$ °K, stąd liczność każdej z próbek to $n_i = 166$ pomiarów.

Analizując rezultaty uzyskane w tabeli 2 można zauważyć, że tylko wartości statystyk F dla próbek z okolic kołpaka dla masy C130, dłuższy okres eksploatacji oraz dla próbek z okolic rdzenia dla masy C130, krótki okres eksploatacji nie spełniają zależności (6), dlatego też hipoteza H_0 w tym przypadku nie może być odrzucona. Implikuje to wniosek, że różnice w obserwacjach w przypadku powyższych próbek mają charakter losowy. Wyniki obserwacji dla tych przypadków nie wykazują znaczących różnic przy porównaniu charakterystyk uzyskanych w badaniach termoluminescencji izolatorów porcelanowych.

Natomiast, wartości statystyk F dla pozostałych eksperymentów spełniają zależności (6), toteż hipoteza H_0 dla tych przypadków musi zostać odrzucona. Wyniki obserwacji w tych przypadkach wykazują znaczące różnice podczas porównania charakterystyk TL uzyskanych w pomiarach z filtrem optycznym [4].

W wyniku przeprowadzonej analizy ANOVA możliwe jest stwierdzenie, iż próbki z okolic rdzenia masy C120 oraz kołpaka dla masy C130 (próbki o dłuższym okresie eksploatacji, pomiary w konfiguracji podstawowej), a także kołpaka dla masy C130 (pomiary z filtrem optycznym, dłuższy okres eksploatacji) oraz dla próbek rdzenia masy C130 (pomiary z filtrem optycznym, krótki okres eksploatacji) wykazują duże podobieństwo.

Natomiast, analizując wyniki dla pozostałych próbek test statystyczny F Fisher'a - Snedecor'a wykazuje różnicę w średnich. Można doszukiwać się wyjaśnienia tego mechanizmu analizując fizykalną stronę zagadnienia. Potwierdza to zarazem tezę o możliwości detekcji starzenia się porcelany elektrotechnicznej izolatorów metodą TL.

Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonej analizy ANOVA możliwe jest stwierdzenie, iż próbki z okolic rdzenia masy C120 oraz kołpaka dla masy C130 (próbki o dłuższym okresie eksploatacji, pomiary w konfiguracji podstawowej), a także kołpaka dla masy C130 (pomiary z filtrem optycznym, dłuższy okres eksploatacji) oraz dla próbek rdzenia masy C130 (pomiary z filtrem optycznym, krótki okres eksploatacji) wykazują duże podobieństwo.

Uzyskany wynik dla pozostałych próbek, których test statystyczny F Fisher'a - Snedecor'a wykazuje różnicę w średnich może być związany np.: z fizykalną stroną zagadnienia mechanizmu termoluminescencji, biorąc pod uwagę proces starzenia się porcelany elektrotechnicznej izolatorów na przełomie kilkudziesięciu lat oraz zróżnicowany skład chemiczny obu mas ceramicznych.

Z przeprowadzonych testów statystycznych wynika istotna różnica w charakterystykach termoluminescencyjnych dla mas ceramicznych C120 i C130. Świadczy to o możliwości różnicowania materiału elektrotechnicznego użytego do produkcji izolatorów porcelanowych na podstawie badań termoluminescencji. Przeprowadzone badania są wstępnymi eksperymentami

i formułowanie dalszych wniosków wymaga żmudnych badań, które są obecnie realizowane.

Tabela 2. Wyniki zbiorcze jednoczynnikowej analizy wariancji dla pomiarów TL z filtrem optycznym BG-39 [4]

Opis próbeki	Opis grup	Wartość statystyki F	Test $F_{1-\alpha}$	Wynik testu
Próbki z okolic kołpaka, masa C120	1. próbka z 1960r. 2. z 1963r. 3. z 1970r. 4. z 1999r.	132,95	2,61	należy odrzucić H_0
Próbki z okolic rdzenia, masa C120	1. próbka z 1960r. 2. z 1963r. 3. z 1970r. 4. z 1999r.	508,37	2,62	należy odrzucić H_0
Próbki z okolic kołpaka, masa C120, napromieniona akceleratorem	1. próbka z 1960r. 2. z 1975r. 3. z 1995r.	759,4	3,01	należy odrzucić H_0
Próbki z okolic rdzenia, masa C120, napromieniona akceleratorem	1. próbka z 1960r. 2. próbka z 1975r. 3. próbka z 1995r.	324,03	3,01	należy odrzucić H_0
Próbki z okolic kołpaka, masa C130	1. próbka z 2003r. 2. z 2005r. 3. z 2010r. 4. z 2012r.	48,65	2,61	należy odrzucić H_0
Próbki z okolic kołpaka, masa C130, krótki okres eksploatacji	1. próbka z 2010r. 2. próbka z 2012r.	4,92	3,87	należy odrzucić H_0
Próbki z okolic kołpaka, masa C130, dłuższy okres eksploatacji	1. próbka z 2003r. 2. próbka z 2005r.	0,33	3,87	nie ma podstaw do odrzucenia H_0
Próbki z okolic rdzenia, masa C130	1. próbka z 2003r. 2. z 2005r. 3. z 2010r.	7,03	3,01	należy odrzucić H_0
Próbki z okolic rdzenia, masa C130, krótki okres eksploatacji	1. próbka z 2005r. 2. próbka z 2010r.	0,008	3,87	nie ma podstaw do odrzucenia H_0
Próbki z okolic kołpaka, masa C120 i C130	1. próbka z 1960r. 2. z 1963r. 3. z 1970r. 4. z 1999r. 5. z 2003r. 6. z 2005r. 7. z 2010r. 8. z 2012r.	638,57	2,02	należy odrzucić H_0
Próbki z okolic rdzenia, masa C120 i C130	1. próbka z 1960r. 2. z 1963r. 3. z 1970r. 4. z 1999r. 5. z 2003r. 6. z 2005r. 7. z 2010r.	621,68	2,11	należy odrzucić H_0

Badania luminescencyjne wykonano w ramach projektu badawczego nr NCN/2012/07/B/ST8/03890 pt.: „Optyczna charakteryzacja struktury defektowej izolatorów ceramicznych sieci energetycznych średnich i wysokich napięć” uzyskanego z Narodowego Centrum Nauki.

Autorzy: prof. nadzw. dr hab. inż. Janusz Sowiński, dr inż. Rafał Sobota, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: jansow@el.pcz.czest.pl; rsobota@el.pcz.czest.pl.

LITERATURA

- [1] Sobota R., Sowiński J., Wybrane systemy informatyczne w analizie eksperymentu na przykładzie badania termoluminescencji izolatorów SN, *Rynek Energii*, Nr 1 (104), (2013), 69-73
- [2] Brandt S., Analiza danych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe - PWN, Warszawa, (1998), 456-473
- [3] Reddy T.A., Applied Data Analysis and Modeling for Energy Engineers and Scientists, Springer science + business media LLC, New York, (2011)
- [4] Sobota R., Wykorzystanie zjawiska termoluminescencji w badaniach porcelany elektrotechnicznej izolatorów energetycznych do 24 kV, rozprawa doktorska, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Częstochowa (2014)
- [5] Sobota R., Thermoluminescence phenomena of electrical porcelain, *Proceedings of the 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering - ELEKTROENERGETIKA 2015*, September 16-18, Stará Lesná, Slovak Republic, (2015), 311-314
- [6] Sobota R., Termoluminescencja obecnie stosowanej porcelany elektrotechnicznej z użyciem filtra optycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 14, Warszawa, (2014), 137-140