

Maciej ZDANOWSKI*

STATYSTYCZNA WERYFIKACJA WYNIKÓW BADAŃ ELEKTRYZACJI STRUMIENIOWEJ CIECZY IZOLACYJNYCH

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń statystycznych mających na celu potwierdzenie, że uzyskane rezultaty badań eksperymentalnych prądu elektryzacji strumieniowej oleju izolacyjnego TRAF0 EN oraz estru MIDEL 7131[®], cechują się powtarzalnością przy założonym poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Serie pomiarowe wykonano przy użyciu układu przepływowego z rurką. Na otrzymanych wynikach pomiarów przeprowadzono parametryczny test istotności, oparty na analizie wariancji dla wielu średnich klasyfikacji pojedynczej.

SŁOWA KLUCZOWE: ciecze izolacyjne, elektryzacja strumieniowa, układ przepływowy z rurką, statystyka matematyczna

1. WPROWADZENIE

Elektryzacja strumieniowa ciekłych dielektryków badana jest ze względu na zagrożenia, jakie stwarza m.in. w przemyśle elektroenergetycznym i petrochemicznym. Nadmierny rozwój tego zjawiska może doprowadzić do uszkodzenia izolacji stałej transformatorów mocy chłodzonych przepływającą cieczą izolacyjną [1] oraz do zapłonu lub wybuchu paliw podczas ich transportu i przepompowywania [2]. Głównym celem prowadzonych na szeroką skalę badań jest dogłębne poznanie natury generowanego zjawiska elektryzacji oraz opracowanie skutecznych metod jego ograniczenia. Zagadnieniami tymi zajmowała się powołana przez CIGRE grupa robocza 12/15-02 [3]. W Stanach Zjednoczonych badania w tym zakresie prowadzone były przez Massachusetts Institute of Technology (MIT) oraz Electric Power Research Institute (EPRI) w ramach projektu o nazwie Static Electrification in Power Transformers [4]. W początkowym okresie badania elektryzacji strumieniowej prowadzono na transformatorach będących w eksploatacji [5], a następnie przy wykorzystaniu dużych układów laboratoryjnych modelujących pracę tych urządzeń [6]. Kolejnym krokiem było wprowadzenie małych układów laboratoryjnych, cechujących się prostą budową, niewielką objętością badanej próbki cieczy oraz łatwością wykonywania pomiarów prądu elektryzacji

* Politechnika Opolska.

[7]. Badane były oleje mineralne oraz estry syntetyczne [8], a także czyste węglowodory oraz wykonane na ich bazie mieszaniny [9]. Analizowano m.in. wpływ warunków hydrodynamicznych [10], temperatury [11], procesów starzeniowych [12], a także właściwości materiału stałego [13]. Mianem tendencji do elektryzacji cieczy dielektrycznej (ang. ECT – *Electrostatic Charging Tendency*), określa się jej zdolność do generowania nadmiarowych ładunków elektrycznych na skutek przemieszczania się względem materiału stałego. Parametrem opisującym ilościowy charakter tego zjawiska jest objętościowa gęstość ładunku q_w , który powstaje w obszarze podwójnej warstwy elektrycznej, na granicy kontaktu fazy stałej i ciekłej. Parametr ten wyznaczany jest z modelu elektryzacji, w oparciu o parametry geometryczne układu pomiarowego, właściwości fizykochemiczne cieczy oraz prąd elektryzacji [14]. Z tego względu istotnym jest, aby zmierzone wartości prądów elektryzacji cieczy izolacyjnych cechowały się powtarzalnością przy założonym poziomie istotności, zazwyczaj wynoszącym $\alpha = 0,05$. Do badań statystycznych wykorzystano rezultaty badań eksperymentalnych prądu elektryzacji strumieniowej oleju izolacyjnego TRAF0 EN oraz estru MIDEL 7131[®] wykonane w układzie przepływowym z rurką [8]. Serie pomiarowe wykonano przy użyciu rurek z papieru celulozowego oraz aramidowego o długości 400 mm i średnicy 4 mm. Prędkość przepływu cieczy wynosiła 0,34 m/s natomiast temperatura, w której wykonywane były pomiary stabilizowano na poziomie 20°C. Badania powtarzalności oparte zostały na pięciu pomiarach prądu elektryzacji badanych ciekłych dielektryków, przeprowadzanych cyklicznie, co 12 godzin dla zastosowanej rurki. Na otrzymanych wynikach pomiarów przeprowadzono parametryczny test istotności, oparty na analizie wariancji dla wielu średnich klasyfikacji pojedynczej. Test ten oparty jest na rozkładzie F Snedecora oraz założeniu, że danych jest k populacji o rozkładzie normalnym $N(m_i, \sigma_i)$, gdzie $i = 1, 2, \dots, k$, lub zbliżonym do normalnego, przy czym wariancje wszystkich k populacji są równe, tzn. $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2 = \sigma^2$, lecz nie muszą być znane [15].

2. TEST ZGODNOŚCI WYNIKÓW POMIARÓW Z ROZKŁADEM NORMALNYM

Znajomość rozkładu jest podstawową wielkością, na której opiera się dalsze wnioskowanie o zmiennej losowej. Badanie zgodności wyników prądów elektryzacji z rozkładem normalnym sprowadza się do weryfikacji odpowiedniej hipotezy. Określenie typu rozkładu danych zostało przeprowadzone w oparciu o nieparametryczny test istotności, zwany testem zgodności χ^2 [15].

Rozkład χ^2 opisuje równanie:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (1)$$

gdzie: r – liczba rozłącznych klas wyników, n_i – liczebność i -tej klasy, p_i – prawdopodobieństwo wystąpienia badanej cech w i -tej klasie, n – ogólna liczba wyników ($n = 50$).

W celu określenia rozkładu wyników pomiarów prądu elektryzacji wybranych cieczy izolacyjnych, wykonano 50 pomiarów prądu elektryzacji oleju TRAF0 EN oraz estru MIDEL 7131[®] przy użyciu rurki celulozowej i aramidowej. Wyniki przedstawiono w tabelach 1 do 4.

Tabela 1. Rozkład χ^2 wyznaczony z pomiarów prądu elektryzacji oleju TRAF0 EN przepływającego przez rurkę celulozową

Klasa (r)	ΔI [pA]	Liczba obserwacji (n_i)	χ^2
1	Poniżej 3,20	7	5,907
2	3,20 ÷ 3,30	11	1,541
3	3,30 ÷ 3,40	13	0,034
4	3,40 ÷ 3,50	11	0,689
5	Powyżej 3,50	8	1,188
		50	9,362

Tabela 2. Rozkład χ^2 wyznaczony z pomiarów prądu elektryzacji oleju TRAF0 EN przepływającego przez rurkę aramidową

Klasa (r)	ΔI [pA]	Liczba obserwacji (n_i)	χ^2
1	Poniżej 10,20	7	2,246
2	10,20 ÷ 10,40	11	2,409
3	10,40 ÷ 10,60	13	0,328
4	10,60 ÷ 10,80	10	0,380
5	Powyżej 10,80	9	2,953
		50	8,319

Tabela 3. Rozkład χ^2 wyznaczony z pomiarów prądu elektryzacji cieczy MIDEL 7131[®] przepływającego przez rurkę celulozową

Klasa (r)	ΔI [pA]	Liczba obserwacji (n_i)	χ^2
1	Poniżej 12,00	7	2,503
2	12,00 ÷ 12,30	11	1,706
3	12,30 ÷ 12,60	15	0,707
4	12,60 ÷ 12,90	10	0,581
5	Powyżej 12,90	7	3,411
		50	8,910

Tabela 4. Rozkład χ^2 wyznaczony z pomiarów prądu elektryzacji cieczy MIDEL 7131[®] przepływającego przez rurkę aramidową

Klasa (r)	ΔI [pA]	Liczba obserwacji (n_i)	χ^2
1	Poniżej 30,40	7	4,982
2	30,40 ÷ 30,80	8	0,228
3	30,80 ÷ 31,20	15	0,818
4	31,20 ÷ 31,60	12	0,118
5	Powyżej 31,60	8	3,285
		50	9,432

Hipotezy testu zakładają odpowiednio:

$H_0: F(x) \in \Omega$

$H_0: F(x) \notin \Omega$; gdzie Ω jest klasą wszystkich dystrybuant normalnych.

Wartości odczytane z tabeli rozkładu χ^2 dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$ przedstawiono w tabeli 5 i 6.

Tabela 5. Obliczona i odczytana z tabeli rozkładu wartość χ^2 dla wyników prądu elektryzacji oleju TRAF0 EN

α	Stopień swobody (r-1)	χ_{α}^2	χ^2	
			Rurka celulozowa	Rurka aramidowa
0,05	4	9,488	9,362	8,319

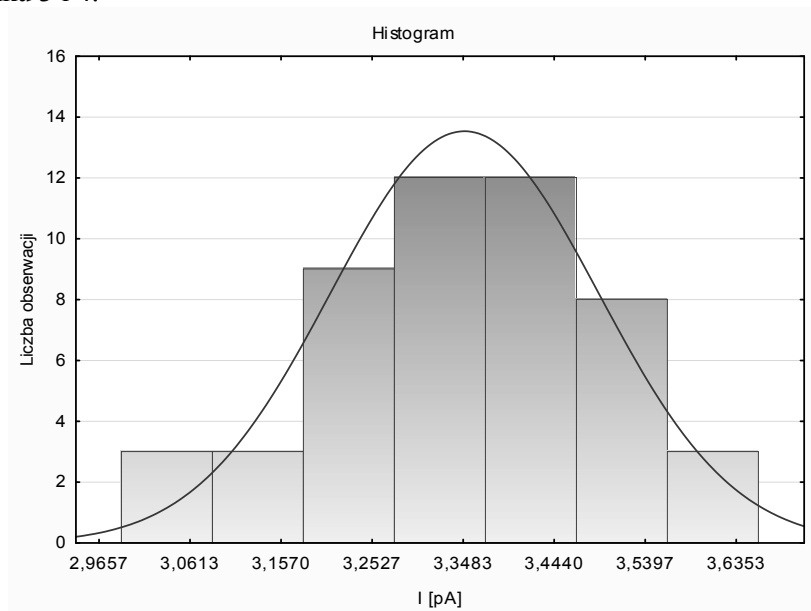
Ponieważ zachodzi nierówność $\chi^2 = 9,362 < 9,488 = \chi_{\alpha}^2$ (rurka celulozowa) oraz $\chi^2 = 8,319 < 9,488 = \chi_{\alpha}^2$ (rurka aramidowa), to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 twierdzącej, że rozkład wyników prądu elektryzacji oleju izolacyjnego TRAF0 EN jest typu normalnego. Dodatkowe wyniki testu przedstawiono na rysunku 1 i 2.

Tabela 6. Obliczona i odczytana z tabeli rozkładu wartość χ^2 dla wyników prądu elektryzacji cieczy MIDEL 7131[®]

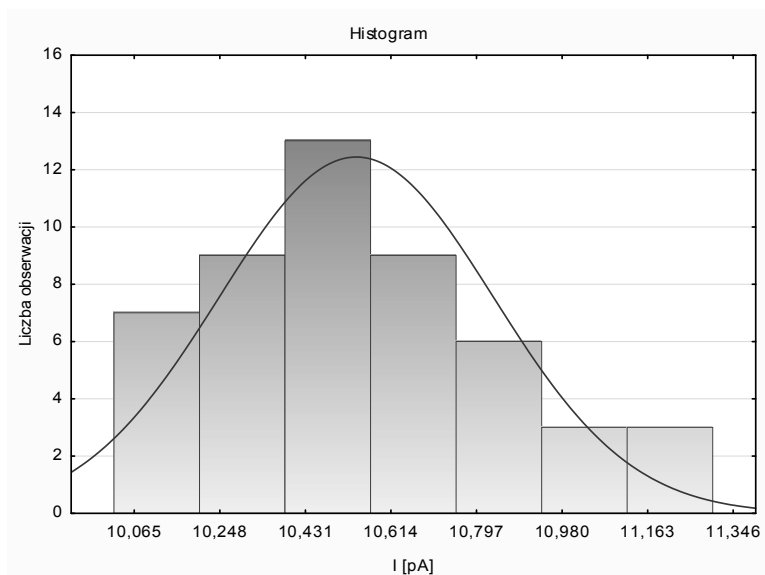
α	Stopień swobody (r-1)	χ_{α}^2	χ^2	
			Rurka celulozowa	Rurka aramidowa
0,05	4	9,488	8,910	9,432

Ponieważ zachodzą nierówności $\chi^2 = 8,910 < 9,488 = \chi_{\alpha}^2$ (rurka celulozowa) oraz $\chi^2 = 9,432 < 9,488 = \chi_{\alpha}^2$ (rurka aramidowa), to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 twierdzącej, że rozkład wyników prądu elektryzacji cieczy

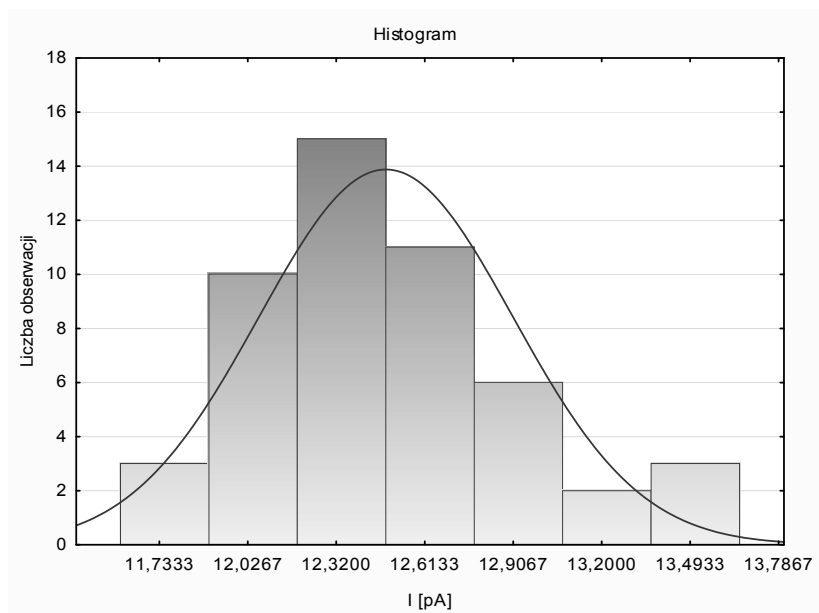
MIDEL 7131[®] jest typu normalnego. Dodatkowe wyniki testu przedstawiono na rysunku 3 i 4.



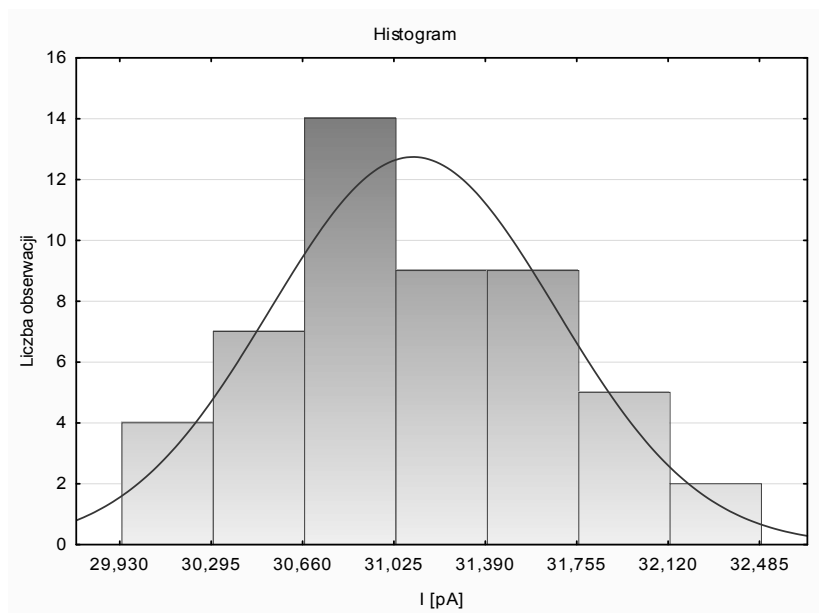
Rys. 1. Rozkład wyników prądu elektryzacji oleju TRAFO EN przepływającego przez rurkę celulozową



Rys. 2. Rozkład wyników prądu elektryzacji oleju TRAFO EN przepływającego przez rurkę aramidową



Rys. 3. Rozkład wyników prądu elektryzacji cieczy MIDE L 7131[®] przepływającej przez rurkę celulozową



Rys. 4. Rozkład wyników prądu elektryzacji cieczy MIDE L 7131[®] przepływającej przez rurkę aramidową

3. TEST RÓWNOŚCI WARIANCJI

Wiele testów służących do porównania wartości średnich w dwóch lub kilku populacjach wymaga przyjęcia założenia o równości wariancji w tych populacjach (tzw. założenie o jednorodności wariancji). Testy dla wariancji, są to testy parametryczne służące do weryfikacji hipotez statystycznych dotyczących wartości wariancji w populacji generalnej lub też do porównania wartości wariancji w dwóch lub kilku populacjach na podstawie znajomości wartości badanej cechy w losowej próbie (lub w kilku próbach).

Równość wariancji danych dla sprawdzenia powtarzalności wyników elektryzacji cieczy izolacyjnych została zbadana w oparciu o test jednorodności wielu wariancji. Test ten jest oparty również na rozkładzie χ^2 oraz założeniu, że danych jest k populacji normalnych $N(m_i, \sigma_i)$, gdzie $i = 1, 2, \dots, k$, o liczebności n_i . Rozkład χ^2 opisują następujące równania [15]:

$$\chi^2 = \frac{2,303}{c} \left[(n-k) \log \tilde{s}^2 - \sum_{i=1}^k \log \hat{s}_i^2 \right] \quad (2)$$

$$c = 1 + \frac{1}{3(k-1)} \left[\sum_{i=1}^k \frac{1}{(n_i - k)} - \frac{1}{(n-k)} \right] \quad (3)$$

$$\tilde{s}^2 = \frac{1}{(n-k)} \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \hat{s}_i^2 \quad (4)$$

$$\hat{s}_i^2 = \frac{1}{(n_i - 1)} \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (5)$$

gdzie: x_{ij} – wyniki kolejnej próby, \bar{x}_i – średnia i -tej populacji.

Dane pomiarowe, na których zostały wykonane obliczenia przedstawiono w tabelach 7 i 8 dla oleju mineralnego oraz w tabelach 9 i 10 dla estru syntetycznego.

Tabela 7. Wyniki pomiarów prądu elektryzacji oleju TRAF0 EN

Rurka celulozowa: $l = 400$ mm, $d = 4$ mm; $v = 0,34$ m/s, I [pA]					
Pomiar (k)	Czas pomiaru (h)				
	0	12	24	36	48
1	3,24	3,26	3,25	3,27	3,25
2	3,25	3,25	3,24	3,26	3,23
3	3,26	3,24	3,24	3,27	3,24
4	3,25	3,24	3,25	3,23	3,25
5	3,24	3,25	3,25	3,24	3,24

Tabela 8. Wyniki pomiarów prądu elektryzacji oleju TRAF0 EN

Rurka aramidowa: l = 400 mm, d = 4 mm; v = 0,34 m/s, I [pA]					
Pomiar (k)	Czas pomiaru (h)				
	0	12	24	36	48
1	10,45	10,47	10,46	10,49	10,44
2	10,48	10,42	10,47	10,41	10,46
3	10,49	10,44	10,48	10,43	10,47
4	10,41	10,46	10,49	10,44	10,49
5	10,42	10,47	10,51	10,46	10,45

Tabela 9. Wyniki pomiarów prądu elektryzacji estru MIDEL 7131[®]

Rurka celulozowa: l = 400 mm, d = 4 mm; v = 0,34 m/s, I [pA]					
Pomiar (k)	Czas pomiaru (h)				
	0	12	24	36	48
1	12,24	12,25	12,24	12,25	12,24
2	12,25	12,27	12,24	12,26	12,25
3	12,26	12,24	12,26	12,28	12,23
4	12,25	12,25	12,29	12,24	12,24
5	12,24	12,26	12,24	12,26	12,24

Tabela 10. Wyniki pomiarów prądu elektryzacji estru MIDEL 7131[®]

Rurka aramidowa: l = 400 mm, d = 4 mm; v = 0,34 m/s, I [pA]					
Pomiar (k)	Czas pomiaru (h)				
	0	12	24	36	48
1	30,86	30,67	30,75	30,86	30,79
2	30,66	30,73	30,73	30,67	30,81
3	30,97	30,75	30,85	30,77	30,72
4	30,73	30,75	30,86	30,80	30,73
5	30,85	30,83	30,87	30,71	30,74

Hipotezy testu zakładają odpowiednio:

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2$; gdzie σ jest wariancją danej populacji,

H_1 : nie wszystkie wariancje wyników są sobie równe.

Obliczoną wartość rozkładu χ^2 oraz odczytaną z tabeli dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ przedstawiono w tabelach 11 i 12.

Ponieważ zachodzi nierówność $\chi^2 = 7,457 < 9,488 = \chi_{\alpha}^2$ (rurka celulozowa) oraz $\chi^2 = 2,590 < 9,488 = \chi_{\alpha}^2$ (rurka aramidowa), |to nie ma podstaw do odrzu-

cenia hipotezy H_0 twierdzącej, że wszystkie wariancje wyników prądu elektryzacji oleju TRAF0 EN są sobie równe.

Tabela 11. Obliczona i odczytana z tabeli rozkładu wartość χ^2 dla testu jednorodności wielu wariancji dla wyników elektryzacji oleju TRAF0 EN

α	Stopień swobody (k-1)	χ_{α}^2	χ^2	
0,05	4	9,488	Rurka celulozowa 7,457	Rurka aramidowa 2,590

Tabela 12. Obliczona i odczytana z tabeli rozkładu wartość χ^2 dla testu jednorodności wielu wariancji dla wyników elektryzacji estru MIDEL 7131[®]

α	Stopień swobody (k-1)	χ_{α}^2	χ^2	
0,05	4	9,488	Rurka celulozowa 6,753	Rurka aramidowa 4,916

Ponieważ zachodzi nierówność $\chi^2 = 6,753 < 9,488 = \chi_{\alpha}^2$ (rurka celulozowa) oraz $\chi^2 = 4,916 < 9,488 = \chi_{\alpha}^2$ (rurka aramidowa), |to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 twierdzącej, że wszystkie wariancje wyników prądu elektryzacji estru MIDEL 7131[®] są sobie równe.

4. TEST ANALIZY WARIANCJI DLA WIELU ŚREDNICH

Dane przedstawione w tabelach 11 i 12 można, więc opisać rozkładem normalnym, a ich wariancje są równe. Pozwala to na przeprowadzenie testu analizy wariancji dla wielu średnich w celu określenia powtarzalności wyników badań elektryzacji strumieniowej cieczy izolacyjnych. Testy analizy wariancji stanowią podstawowe narzędzie statystyki umożliwiające planowanie i ocenę wyników eksperymentów naukowych. Dzięki tym testom możliwe jest sprawdzenie, czy pewne czynniki, które w sposób dowolny można regulować w toku eksperymentu, wywierają wpływ na kształtowanie się średnich wartości badanych cech mierzalnych. Klasycznym w tym przypadku jest test F Snedecora [15].

Równanie F Snedecora przedstawia wzór (6):

$$F = \frac{\hat{s}_i^2}{\hat{s}_2^2} \quad (6)$$

$$\hat{s}_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\bar{x}_i - \bar{x} \right)^2 n_i}{k-1} \quad (7)$$

$$\hat{s}_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n - k} \quad (8)$$

gdzie: \bar{x} – średnia arytmetyczna ogólna.

Hipotezy testu zakładają odpowiednio:

H_0 : $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5$; gdzie m jest średnią z populacji,

H_1 : nie wszystkie średnie są sobie równe.

Obliczoną wartość rozkładu F oraz odczytaną z tabeli dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ przedstawiono w tabelach 13 i 14.

Tabela 13. Obliczona i odczytana z tabeli rozkładu wartość F dla testu analizy wariancji dla wielu średnich (olej izolacyjny TRAF0 EN)

α	1 stopień swobody (k-1)	2 stopień swobody (n-k)	F_α	F	
0,05	4	20	2,87	Rurka celulozowa 0,818	Rurka aramidowa 1,238

Ponieważ zachodzi nierówność $F = 0,818 < 2,87 = F_\alpha^2$ (rurka celulozowa) oraz $F = 1,238 < 2,87 = F_\alpha^2$ (rurka aramidowa), to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 twierdzącej, że wszystkie średnie wartości prądu elektryzacji oleju TRAF0 EN są sobie równe. Zdanie to jednocześnie dowodzi, że w wybranym układzie pomiarowym zachodzi powtarzalność wyników eksperymentu z 5% tolerancją błęd.

Tabela 14. Obliczona i odczytana z tabeli rozkładu wartość F dla testu analizy wariancji dla wielu średnich (ester syntetyczny MIDEL 7131[®])

α	1 stopień swobody (k-1)	2 stopień swobody (n-k)	F_α	F	
0,05	4	20	2,87	Rurka celulozowa 1,171	Rurka aramidowa 0,806

Ponieważ zachodzi nierówność $F = 1,171 < 2,87 = F_\alpha^2$ (rurka celulozowa) oraz $F = 0,806 < 2,87 = F_\alpha^2$ (rurka aramidowa), to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 twierdzącej, że wszystkie średnie wartości prądu elektryzacji estru MIDEL 7131[®] są sobie równe. Zdanie to jednocześnie dowodzi, że w wybranym układzie pomiarowym zachodzi powtarzalność wyników eksperymentu z 5%

tolerancją błędu. Należy również dodać, iż testy zostały wykonane dla całego zakresu stosowanych prędkości przepływu cieczy, zawsze z tym samym rezultatem.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzanie pomiarów prądu elektryzacji cieczy dielektrycznych związane jest z koniecznością ujmowania tego parametru w modelu elektryzacji strumieniowej, celem wyznaczenia objętościowej gęstości ładunku q_w , którego wartość określa tendencję do elektryzacji (ECT) tych cieczy. Z tego względu wymagana jest wysoce staranna procedura przeprowadzania badań eksperymentalnych elektryzacji strumieniowej, umożliwiającą otrzymywanie wyników powtarzalnych. Analizie statystycznej poddano wyniki pomiarów prądu elektryzacji oleju izolacyjnego TRAF0 EN oraz estru MIDEL 7131[®], uzyskane w układzie przepływowym z rurka pomiarową. Powtarzalność określano bazując na parametrycznym teście istotności, opartym na analizie wariancji dla wielu średnich klasyfikacji pojedynczej. Przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$ udowodniono, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o równości średnich wyników prądu elektryzacji, otrzymanych w kolejnych cyklach pomiarowych. Stwierdzenie to jednocześnie oznacza, że w laboratoryjnym układzie przepływowym do pomiaru elektryzacji cieczy izolacyjnych zachodzi powtarzalność wyników eksperymentu z 5% tolerancją błędu.

LITERATURA

- [1] M. Ieda, K. Goto, H. Okubo, T. Miyamoto, H. Tsukioka, Y. Kohno, Suppression of Static Electrification of Insulating Oil for Large Power Transformers. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Claymont, Delaware, pp. 246–256, 1986.
- [2] R.E. Nabours, Static Discharge Hazard During Refueling at Retail Petrol Stations. IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 40, No. 4, pp. 1003–1005, 2004.
- [3] Ch. Krause, H. P. Moser, G. Praxl, G. Spandonis and R. Stonitsch, Electrostatic Charging in Large Models of Power transformer Cooling Ducts, CIGRE, Session JWG12/15.13 TF–01, TF–02, Paris, 1992.
- [4] Sierota and J. Rungis, Electrostatic Charging in Transformers Oils. Testing and Assessment, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 1, No. 5, pp. 804–870, 1994.
- [5] M. Higaki, Y. Kako, M. Moriyama, M. Hirano and K. Kurita, Static Electrification and Partial Discharges Caused by Oil Flow in Forced Oil Cooled Core Type Transformers, IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. 98, No. 4, pp. 1259–1267, 1979.

- [6] Ch. Krause, E. Knoll, J. Alff and R. Stonitsch, Impact of AC-Fields on Dielectric Charging in a Full-Scale Power Transformer, 9th Int'l. Symp. High Voltage Engineering, Ref. 1080/1-1080/4, Graz, Austria, 1995.
- [7] M. Zdanowski, S. Wolny, D. Zmarzły and J. Kędzia, The Analysis and Selection of the Spinning Disk System Parameters for The Measurement of Static Electrification of Insulation Oils, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 14, No. 2, pp. 480-486, 2007.
- [8] M. Zdanowski, Streaming Electrification of Mineral Insulating Oil and Synthetic Ester MIDEL 7131[®], IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 21, No. 3, pp. 1127-1132, 2014.
- [9] M. Zdanowski, Influence of Composition of Dielectric Liquid Mixtures on Electrostatic Charge Tendency and Physicochemical Parameters, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, No. 2, pp. 527-532, 2008.
- [10] G. Touchard, Streaming Currents Developed in Laminar and Turbulent Flows Through a Pipe, J. Electrostatics, Vol. 5, pp. 463-473, 1978.
- [11] P. Washabaugh, P.A. von Guggenberg, M. Zahn and J.R. Melcher, Temperature and Moisture Transient Flow Electrification Measurements of Transformer Pressboard/Oil Insulation Using a Couette Facility, IEEE 3rd Int'l. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo, Japan, Vol. 2, pp. 867-870, 1991.
- [12] J. Kędzia, Electrostatic Properties of Aged Transformer Oil, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 24, No. 2, pp. 175-185, 1989.
- [13] P.K. Poovamma, R. Jagadish, Influence of Surface Roughness and Thickness of Pressboard on the Charging Characteristics of Transformer Oil, IEEE Intern. Symp. on Electric. Ins., Pittsburgh, pp. 526-529, 1994.
- [14] M. Zdanowski, S. Wolny, D. Zmarzły, Metody Wyznaczania Objętościowej Gęstości Ładunku q_w na Granicy Fazy Stałej i Ciekłej. Przegląd Elektrotechniczny Nr 1k, s. 296-298, 2006.
- [15] J. Greń, Statystyka Matematyczna – Modele i Zadania. PWN, Warszawa, 1984.

STATISTICAL VERIFICATION OF THE RESULTS OF STREAMING ELECTRIFICATION RESEARCH OF INSULATING LIQUIDS

The paper presents the results of statistical calculations in order to confirm that the obtained results of experimental studies of streaming electrification current of TRAF0 EN insulating oil and MIDEL 7131[®] ester, characterized by repeatability at the assumed significance $\alpha = 0.05$ level. Measurement was performed using a flow system with the tube. On the results obtained measurements were performed parametric test of significance, based on the analysis of variance for many medium-sized single classification.

(Received: 25. 01. 2017, revised: 15. 02. 2017)