

**Stefan WOLNY, Józef KĘDZIA, Maciej ZDANOWSKI**  
POLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI

## Dwuczynnikowa analiza wariancji w badaniach elektryzacji strumieniowej olejów izolacyjnych

Dr inż. Stefan WOLNY

Adiunkt Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, pracownik naukowo-dydaktyczny Katedry Inżynierii Materiałowej i Elektrycznej. Autor 60 publikacji z zakresu diagnostyki stanu wysokonapięciowych układów izolacyjnych oraz badań tendencji do elektryzacji cieczy dielektrycznych.



e-mail: s.wolny@po.opole.pl

Prof. dr hab inż. Józef KĘDZIA

Profesor Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Kierownik Katedry Inżynierii Materiałowej i Elektrycznej. Autor wielu publikacji z zakresu diagnostyki stanu wysokonapięciowych układów izolacyjnych oraz badań tendencji do elektryzacji cieczy dielektrycznych.



e-mail: j.kedzia@po.opole.pl

Dr inż. Maciej ZDANOWSKI

Adiunkt Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Pracownik Zakładu Inżynierii Materiałowej i Elektrycznej. Autor ponad 30 publikacji z zakresu badań nad tendencją do elektryzacji ciekłych dielektryków.



e-mail: m.zdanowski@po.opole.pl

bardzo pomocne narzędzie do analizy wyników pomiarów, których uzyskanie innymi metodami byłoby niemożliwe lub bardzo kosztowne.

W artykule przedstawiono wyniki analizy elektryzacji strumieniowej, w czasie przepływu oleju transformatorowego w modelowym układzie izolacyjnym papier-olej.

### 2. Charakterystyka badań

Pojawienie się elektryzacji statycznej w układach izolacyjnych transformatorów energetycznych spowodowane było wprowadzeniem wymuszonego przepływu oleju (OD) dla zapewnienia efektywnego odprowadzenia dużych ilości ciepła. Generacja ładunków elektrostatycznych prowadziła często do rozwoju wyładowań niepełnych i przebicia izolacji. Duże straty ekonomiczne związane z uszkodzeniami jednostek i niedostarczeniem energii stymulowały rozwój badań w wielu ośrodkach badawczych, takich krajów jak Stany Zjednoczone, Japonia, Francja, Anglia, Indie, itd. Prace badawcze o tej tematyce zostały podjęte również w Polsce. Jako pierwszy podjął je zespół w Politechnice Opolskiej [1].

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań elektryzacji strumieniowej oleju izolacyjnego. Czynniki, które oddziaływały na poziom generacji ładunków elektrostatycznych była temperatura i prędkość przepływu oleju. Analizę wyników badań przeprowadzono wykorzystując dwuczynnikową analizę wariancji. Określono interakcje oddziaływujących czynników.

**Słowa kluczowe:** elektryzacja strumieniowa, oleje izolacyjne, analiza wariancji.

### Two- factor variance analysis in research on streaming electrification of insulation oils

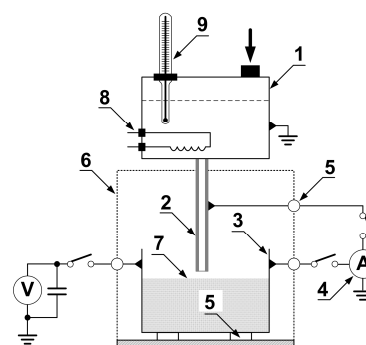
#### Abstract

The paper presents research results on streaming electrification of insulation oil. The factors influencing the level of electric charge electrification were temperature and oil flow speed. The analysis of the results was carried out by using a two-factor variance analysis. The interaction of the factors involved was determined.

**Keywords:** streaming electrification, insulation oils, variance analysis.

### 1. Wstęp

Statystyczna analiza wyników pomiarów jest narzędziem, bez którego prowadzenie badań naukowych nie jest możliwe. Dotyczy to przede wszystkim szacowania niepewności prowadzonych pomiarów, która obrazuje brak dokładnej znajomości wielkości mierzonej. Niepewność pomiarów określa z założonym prawdopodobieństwem granice przedziału, w którym znajduje się wartość rzeczywista. Jej podawanie jest jednym z najistotniejszych wymagań metrologicznych. W analizie wyników pomiarów często używane są narzędzia statystyczne, które pozwalają na określenie rozkładu mierzonych wartości. Przykładem może być użycie rozkładu Weibulla, przy opracowywaniu wyników badań wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych. Użycie niektórych narzędzi statystycznych w naukach technicznych nie jest jednak rozpowszechnione. Jak pokazuje ich zastosowanie w naukach biologicznych, medycznych, ekonomicznych, mogą one stanowić



Rys. 1. Schemat układu przepływowego do pomiaru elektryzacji strumieniowej oleju izolacyjnego

1- zbiornik górny, 2- rurka, 3- zbiornik dolny, 4- elektrometr, 5- izolatory, 6- ekran, 7- olej, 8- grzałka, 9- termometr

Fig. 1. Diagram of the flow system for measurement of streaming electrification of insulation oil

1- upper container, 2- pipe, 3- lower container, 4- electrometer, 5- insulators, 6- screen, 7- oil, 8- heater, 9- thermometer

Badania zagrożeń układów izolacyjnych transformatorów energetycznych wywołanych elektryzacją statyczną, wykonywano początkowo na odpowiednio przygotowanych obiektach rzeczywistych. Względy ekonomiczne spowodowały, że badania prowadzono później na dużych układach modelowych o pojemności nawet kilku tysięcy litrów oleju transformatorowego. Uzyskiwana kompatybilność wyników doprowadziła do dalszej redukcji układów. Pozwoliła przy tym na wykorzystanie w nich różnych form

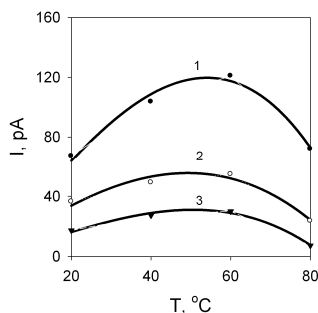
przepływu badanej cieczy. Można tu więc wymienić układy przepływowe rurowe [2], układy wirujących walców Couette'a [3, 4], układy wirującej tarczy [5, 6] i inne [7]. Wyniki badań prądu elektryzacji, które zostaną wykorzystane do przeprowadzenia dwuczynnikowej analizy wariancji, uzyskane zostały w układzie przepływowym. Jego schemat przedstawiono na rysunku 1.

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Wstępna prezentacja badań

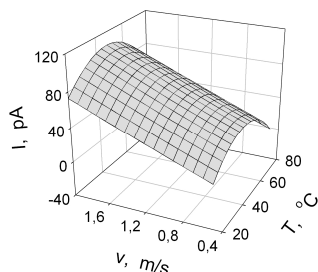
Proces elektryzacji przy przepływie oleju izolacyjnego zależy od wielu czynników. Można tu wymienić rodzaj oleju, materiał fazy stałej, stan powierzchni tej fazy, charakter przepływu (laminarny lub turbulentny), procesy starzeniowe, inhibitory itd. [1]. Istotny wpływ na to zjawisko, związany z warunkami eksploatacji transformatora, mają takie czynniki jak prędkość przepływu i temperatura oleju. Dotychczasowa analiza ich oddziaływania opierała się na otrzymanych zależnościach przedstawianych przede wszystkim graficznie w formacie 2D i 3D (rysunek 2, 3, 4).

Analizując wpływ temperatury i prędkości przepływu na elektryzację oleju izolacyjnego można stwierdzić, że przydatność tych rysunków w analizie wyników badań zależy od celu, jakim się służyć. Określenie ogólnego wpływu prędkości i temperatury jest ułatwione na rysunku 3. Nie jest on jednak przydatny do odczytu szczegółowych wartości czynników. Takim celom może służyć rysunek 2, jednak traci się przy tym wzajemne relacje przejściowych parametrów. Na rysunku 4 zależności przedstawiono na wykresie konturowym. Rysunek ten jest formą łączącą właściwości rysunków 2 i 3. Należy jednak podkreślić, że żadna z nich nie wyjaśnia zasadniczego pytania, czy zachodzi interakcja obu czynników?



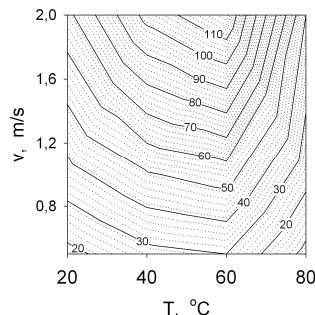
Rys. 2. Prąd elektryzacji w układzie przepływowym w zależności od temperatury oleju izolacyjnego dla różnych prędkości przepływu 1- 2 m/s, 2- 1 m/s; 3- 0,5 m/s

Fig. 2. Electrification current in the flow system in dependence on insulation oil temperature for various flow speeds 1- 2 m/s, 2- 1 m/s; 3- 0,5 m/s



Rys. 3. Prąd elektryzacji w zależności od temperatury oleju i jego prędkości przepływu

Fig. 3. Electrification current in dependence on oil temperature and its flow speed



Rys. 4. Prąd elektryzacji strumieniowej na wykresie konturowym,

Fig. 4. Streaming electrification current on the outline diagram in dependence on oil temperature and oil flow speed

#### 3.2. Analiza wyników z wykorzystaniem dwuczynnikowej analizy wariancji

Analizę pomiarów prądu elektryzacji oleju transformatorowego generowanego podczas przepływu w układzie pomiarowym (rys. 1) przeprowadzono wykorzystując program statystyczny z modułem ANOVA/MANOVA. Czynniki, których oddziaływanie poddano analizie była prędkość przepływu oznaczona kodem (A) oraz temperatura oleju oznaczona kodem (B). Określony przedział wartości poziomu czynników przypisano do odpowiednich poziomów kodów A i B (tab. 1) (kodowanie czynników wymagane jest przez zastosowany program obliczeń statystycznych).

Tab. 1. Kody czynników A i B

Tab. 1. Code factors A and B

Czynnik A		Czynnik B	
v	kod	T	kod
m/s	poziom	°C	poziom
0,5	1	20	1
1,0	2	40	2
2,0	3	60	3
		80	4

Tab. 2. Wyniki dwuczynnikowej analizy wariancji prądu elektryzacji I

Tab. 2. Analysis of Variance for electrostatic current I

Źródło	Suma kwadratów	Df	Średnia	Wartość statystyki F	Poziom p
Efekt główny:					
Czynnik A	23003,1	2	11501,5	124,39	0,0000
Czynnik B	13661,5	3	4553,82	49,25	0,0000
Interakcja: A×B	6531,61	6	1088,6	11,77	0,0000
Reszta (błąd)	2219,12	24	92,4633		
Suma całkowita	45415,2	35			

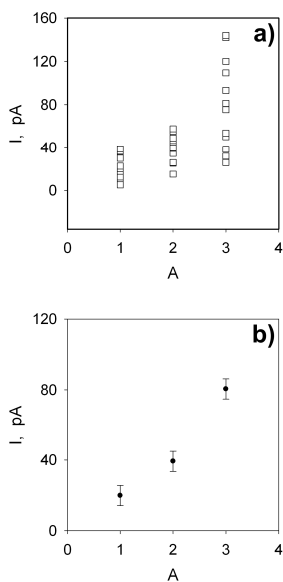
Obliczone wartości statystyki Fishera (F) oraz poziomy prawdopodobieństwa (p), przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$  pokazują, że oprócz istotnego oddziaływania czynnika A (prędkość przepływu) oraz czynnika B (temperatury), istotne oddziaływanie ma również interakcja obu czynników (A×B) (tabela 2). Dalsze obliczenia uzyskane przy wykonaniu procedur modułu ANOVA/MANOVA zamieszczono w tabeli 3.

Tab. 3. Wartości średnie parametru I dla każdego poziomu czynnika oraz błąd standardowy i przedziały niepewności ( $\alpha=0,05$ )

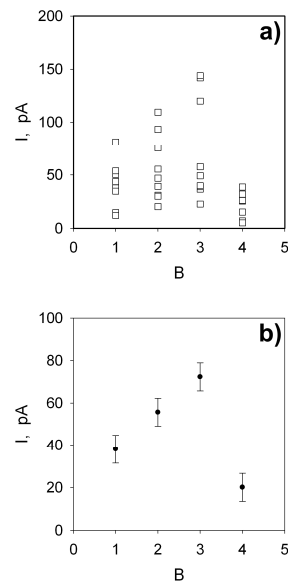
Tab. 3. Average values of parameter I for each factor level, standard error and uncertainty interval ( $\alpha=0,05$ )

Poziom	Liczba pomiarów	Średnia	Błąd standardowy	Dolna granica	Górna granica
Średnia ogólna	36	46,5271			
Czynnik A					
A-1	12	19,8695	2,77584	14,1405	25,5986
A-2	12	39,2285	2,77584	33,4995	44,9576
A-3	12	80,4833	2,77584	74,7543	86,2124
Czynnik B					
B-1	9	38,0886	3,20526	31,4732	44,7039
B-2	9	55,6277	3,20526	49,0124	62,2431
B-3	9	72,3083	3,20526	65,6929	78,9236
B-4	9	20,084	3,20526	13,4686	26,6993
A×B					
A-1 B-1	3	13,8054	5,55168	2,34728	25,2635
A-1 B-2	3	27,027	5,55168	15,5689	38,4851
A-1 B-3	3	32,796	5,55168	21,3379	44,2541
A-1 B-4	3	5,84973	5,55168	-5,60839	17,3079
A-2 B-1	3	38,6811	5,55168	27,2229	50,1392
A-2 B-2	3	47,1687	5,55168	35,7106	58,6269
A-2 B-3	3	448,8488	5,55168	37,3907	60,3069
A-2 B-4	3	22,2155	5,55168	10,7573	33,6736
A-3 B-1	3	61,7792	5,55168	50,3211	73,2373
A-3 B-2	3	92,6875	5,55168	81,2293	104,146
A-3 B-3	3	135,28	5,55168	123,822	146,738
A-3 B-4	3	32,1867	5,55168	20,7285	43,6448

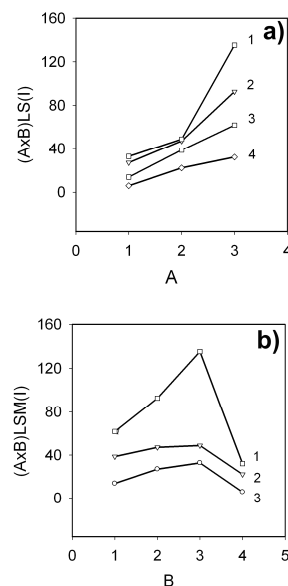
Znajdują się tam wartości średnie, błędy standardowe oraz przedziały niepewności dla wszystkich poziomów czynników. Pozwalają one na przedstawienie interpretacji graficznej danych w postaci wykresów zamieszczonych na rysunkach 5 ÷ 7. Dodatkowe wyniki obliczeń statystycznych przedstawiono w tabelach 4 i 5.



Rys. 5. Rozproszenie wartości I (a) oraz wartości średnie i przedziały niepewności I (b) dla różnych poziomów czynnika A  
Fig. 5. Value I (a) scattering, mean values and uncertainty intervals I (b) for various levels of Factor A



Rys. 6. Rozproszenie wartości I (a) oraz wartości średnie i przedziały niepewności I (b) dla różnych poziomów czynnika B  
Fig. 6. Value I (a) scattering, mean values and uncertainty intervals I (b) for various levels of Factor B



Rys. 7. Interakcja A×B dla różnych poziomów czynnika A (a) oraz B (b)  
Fig. 7. Interaction A×B for various levels of Factors A (a) and B (b)

Tab. 4. Wyniki procedury wielokrotnego porównywania dla I przez czynnik A  
Tab. 4. Multiple Range Tests for electrostatic current I by factor A

Metoda najmniejszej różnicy istotności (Least Significant Difference), $\alpha=0,05$			
Czynnik A poziom	Liczba pomiarów	Średnia LS	Homogeniczność grup
A-1	12	19,8695	X
A-2	12	39,2285	X
A-3	12	80,4833	X
Kontrastowość			
A-1 – A-2			Różnica +/- Granica
			*-19,359 8,10211
A-1 – A-3			*-60,6138 8,10211
A-2 – A-3			*-41,2548 8,10211

\* oznaczenie statystycznie istotnej różnicy

Tab. 5. Wyniki procedury wielokrotnego porównywania dla I przez czynnik B  
 Tab. 5. Multiple Range Tests for electrostatic current I by factor B

Metoda najmniejszej różnicy istotności (Least Significant Difference), $\alpha=0,05$				
Czynnik B poziom	Liczba pomiarów	Średnia LS	Homogeniczność grup	
B-4	9	20,084	X	
B-1	9	38,0886	X	
B-2	9	55,6277	X	
B-3	9	72,3083	X	
Kontrastowość			Różnica	+/- Granica
B-1 – B-2			*-17,5392	9,35551
B-1 – B-3			*-34,2197	9,35551
B-1 – B-4			*18,0046	9,35551
B-2 – B-3			*-16,6805	9,35551
B-2 – B-4			*35,5438	9,35551
B-3 – B-4			*52,2243	9,35551

\* oznaczenie statystycznie istotnej różnicy

Wskazują one na to, że różnice w poziomach tego czynnika są znaczące, a badane grupy nie są jednorodnie. Podobny wpływ obserwujemy również w przypadku oddziaływania czynnika B.

#### 4. Wnioski

Wprowadzenie wieloczynnikowej analizy wariancji do analizy wyników badań i porównanie jej z analizą klasyczną pokazuje, jak szeroki zasób informacji jest wówczas możliwy do uzyskania. Podstawową informację, którą uzyskano, to wykrycie interakcji dwóch czynników oddziałujących na generację ładunków elektrostatycznych (prędkości przepływu oleju i jego temperatury). Zależność taka musi być uwzględniana przy próbie ustalenia wskaźnika materiałowego opisującego tendencję oleju transformatoro-

wego do elektryzacji. Użycie wieloczynnikowej analizy wariancji wnosi również informację o wpływie poziomów czynników na homogeniczność analizowanych grup wyników pomiarów i określenie statystycznie istotnej różnicy, która je dzieli.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy nr 1829/B/T02/2007/33.

#### 5. Literatura

- [1] Kędzia J.: Zagrożenia izolacji transformatorów energetycznych wywołane elektryzacją statyczną, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 1999.
- [2] Wolny S., Kędzia J.: Analiza metod pomiaru elektryzacji statycznej olejów izolacyjnych, Konferencja Naukowo-Techniczna „Transformatory w Eksploatacji”, Sieniawa, 23-25 kwietnia 2003, s. 113-120.
- [3] Morin A. J., Zahn M. and Melcher J. R.: Equilibrium Electrification Parameters Inferred from Couette Charger Terminal Measurements, Annual Report on IEEE CEIDP, 1988, s. 286-292.
- [4] Kędzia J.: Measurement of the electrification of Liquids in the rotating cylinder system, J. Electrostatics, 20, 1988, s. 305-312.
- [5] Kędzia J.: Investigation of Electrostatic Properties of Transformer Oil in the Rotating Disk System, IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 24, No 1, 1989, s. 59-65.
- [6] Zdanowski M., Wolny S., Zmarzły D., Kędzia J.: The Analysis and Selection of the Spinning Disk System Parameters for the Measurement of Static Electrification of Insulation Oils, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, no. 2, April 2007, s. 480-486.
- [7] Palmer J.A.: Method for Repetitive Measurement of the Electrostatic Charging Tendency of Liquid Dielectrics, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 1, 1996, s. 70-74.

Artykuł recenzowany

## INFORMACJE

### Studia Podyplomowe

Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki ogłasza nabór na Dwusemestralne Zaoczne Studia Podyplomowe

#### Organizacja i Akredytacja Laboratoriów

Studia prowadzone są na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, w systemie zaocznym w każdą sobotę lub w co drugi weekend (do wyboru) przez dwa semestry. Zajęcia prowadzone są przez nauczycieli akademickich ze stopniem co najmniej doktora oraz przez zaproszonych Gości o uznanym dorobku i autorytecie. Studia obejmują 200 godzin dydaktycznych. Rozpoczęcie Studiów nastąpi po skompletowaniu odpowiedniej liczby kandydatów na dany rodzaj studiów.

#### Organizator studiów:

Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, tel. 032 237 12 41, fax: 032 237 20 34, e-mail: re2@polsl.pl lub agnieszka.skorkowska@polsl.pl, http://imeia.elekt.polsl.pl

#### Kierownik studiów:

Prof. dr hab. inż. Tadeusz SKUBIS