

doi:10.15199/48.2020.09.14

Analizy modelowe i badania eksperymentalne prądu elektryzacji strumieniowej cieczy izolacyjnych

Streszczenie. W artykule przedstawiono i porównano wyniki badań teoretycznych i eksperymentalnych elektryzacji strumieniowej oleju mineralnego Trafo En oraz estru syntetycznego Midel 7131. Analizy teoretyczne prądu elektryzacji strumieniowej zostały wykonane z wykorzystaniem modelu Abediana-Sonina. Pomiarzy przeprowadzono w układzie przepływowym z wykorzystaniem rurek wykonanych z papieru celulozowego i aramidowego. Określono wpływ prędkości przepływu cieczy oraz rodzaju materiału rurki pomiarowej na wielkość generowanego prądu elektryzacji strumieniowej.

Abstract. The paper presents and compares the results of theoretical and experimental research in the field of streaming electrification of Trafo En mineral oil and Midel 7131 synthetic ester. Theoretical analysis of the streaming electrification current was made using the Abedian-Sonin model. The measurements were taken in a flow-through system using the pipes made of cellulose and aramid paper. The influence of the liquid flow velocity, the type of material of the measuring pipe on the level of the streaming electrification current generation was determined. **(Model analysis and experimental research on streaming electrification current of insulating liquids).**

Słowa kluczowe: transformatory mocy, elektryzacja strumieniowa, olej mineralny, ester syntetyczny.

Keywords: power transformers, streaming electrification, mineral oil, synthetic ester.

Wstęp

Zagadnienia związane z zagrożeniem izolacji transformatorów elektroenergetycznych elektryzacją strumieniową były przedmiotem wieloletnich prac naukowych m.in. w Politechnice Opolskiej [1-5]. W wielu ośrodkach naukowych, zajmujących się badaniami w tym zakresie, podejmowano próby opracowania szeregu modeli opisujących generację prądu elektryzacji podczas przepływu cieczy izolacyjnych. Modele te opierały się na teorii podwójnej warstwy elektrycznej powstającej na granicy kontaktu materiału stałego i cieczy. Szerszy opis zagadnień elektrokinetycznych można znaleźć m.in. w pracy [6]. Najstarszy historycznie model elektryzacji opracowany został przez Helmholtza. Model ten nie uwzględniał jednak rodzaju przepływu cieczy, średnicy, długości oraz materiału rurki. Pracami nad jego modyfikacją zajęli się Cooper oraz Schön i Gibbings. W zaproponowanych przez tych autorów modelach po raz pierwszy wprowadzono objętościową gęstość ładunku q_w , jako parametr służący do określania podatności na elektryzację ciekłych dielektryków (ang. ECT – Electrostatic Charging Tendency). Shimizu w swoim modelu uwzględnił wpływ długości rurki, natomiast w modelu Koszmana-Gavisa, w równaniu transportu ładunku, pojawiła się składowa prądu dyfuzyjnego, konwekcyjnego oraz przewodnictwa. W modelu Toucharda uwzględniono laminarny oraz turbulentny charakter przepływu cieczy. Wemsley i Woodford opracowali model, w którym można obserwować zmianę znaku prądu. Obecnie najczęściej stosowanym modelem, opisującym prąd elektryzacji strumieniowej cieczy izolacyjnej w układzie przepływowym, jest model Abediana-Sonina, ze względu na możliwość stosowania go w szerokim zakresie prędkości przepływu oraz konduktywności cieczy [7].

Model elektryzacji i układu pomiarowy

Zależność na prąd elektryzacji w modelu Abediana-Sonina dla dowolnej długości rurki dana jest w postaci [7]:

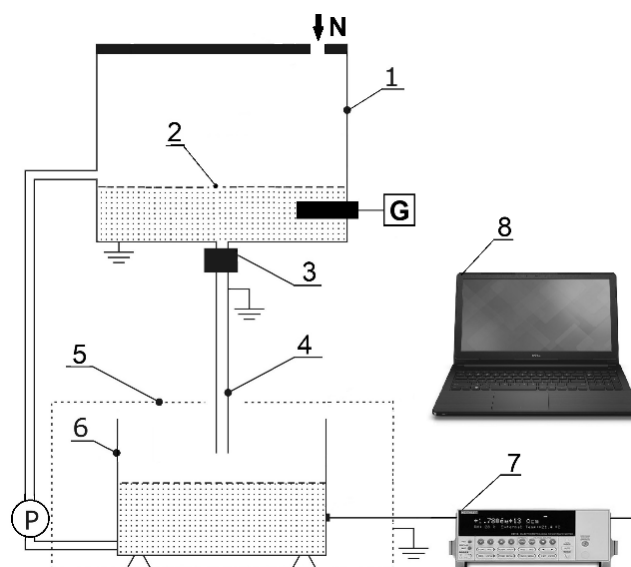
$$(1) \quad I = I_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{l}{L}} \right)$$

gdzie: I_{∞} – prąd elektryzacji dla rurki o nieskończonej długości, L – charakterystyczna długość rurki, l – długość rurki.

Prąd elektryzacji (I_{∞}) dla nieskończonej długości rurki przedstawiony jest za pomocą wzoru:

$$(2) \quad \frac{I_{\infty}}{q_w \pi R^2 v} = Re \frac{\tau_w \lambda^2}{\rho v^2 R^2} \left(1 - \frac{\frac{\delta}{\lambda}}{\sinh\left(\frac{\delta}{\lambda}\right)} \right) + \frac{\frac{\delta}{\lambda}}{\sinh\left(\frac{\delta}{\lambda}\right)} \frac{2\lambda^2}{I + R \frac{\delta}{2\lambda^2}}$$

gdzie: q_w – objętościowa gęstość ładunku przy powierzchni styku ciało stałe-ciecz, R – promień rurki, v – średnia prędkość przepływu cieczy, τ_w – naprężenia ścinające, λ – długość Debye'a, ρ – gęstość cieczy, δ – grubość podwarstwy laminarnej.



Rys.1. Schemat układu przepływowego do badań elektryzacji strumieniowej cieczy izolacyjnych: 1 – zbiornik górny, 2 – ciecz izolacyjna, 3 – elektrozawór, 4 – rurka pomiarowa, 5 – klatka Faradaya, 6 – zbiornik dolny (pomiarowy), 7 – elektrometr, 8 – komputer pomiarowy, G – grzałka z układem do regulacji i stabilizacji temperatury, N – azot, P – pompa

Na rysunku 1 zaprezentowano schemat układu przepływowego do badania zjawiska elektryzacji strumieniowej cieczy izolacyjnych [8]. Ciecz izolacyjna (2)

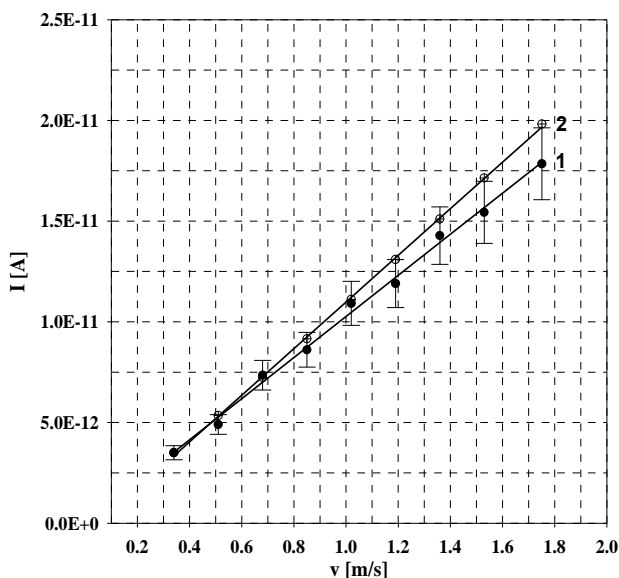
przepływając ze zbiornika górnego (1) przez rurkę (4) elektryzuje się i spływa do odizolowanego zbiornika dolnego (6). Upływ zgromadzonych w nim nadmiarowych ładunków elektrycznych do ziemi mierzony jest za pomocą elektrometru (7). Pomiar, akwizycja i wstępne przetwarzanie danych pomiarowych realizowane jest za pomocą dedykowanego oprogramowania zainstalowanego w komputerze pomiarowym (8). Regulacja prędkości przepływu cieczy przez rurkę następuje wskutek zmiany ciśnienia poduszki gazu (azotu) w zbiorniku górnym. Regulacji czasu przepływu cieczy przez rurkę pomiarową dokonuje się za pomocą elektrozaworu (3). W celu weryfikacji analiz modelowych wykonano pomiary eksperymentalne prądu elektryzacji strumieniowej oleju mineralnego Trafo En oraz estru syntetycznego Midel 7131 w układzie przepływowym. Rurki pomiarowe wykonano z papieru celulozowego Tervakoski oraz syntetycznego papieru aramidowego Nomex. W tabeli 1 zamieszczono właściwości badanych ciekłych dielektryków oraz parametry układu pomiarowego, które są niezbędne do obliczeń modelowych.

Tabela 1. Właściwości fizykochemiczne i elektryczne badanych cieczy izolacyjnych (20°C) oraz parametry układu pomiarowego

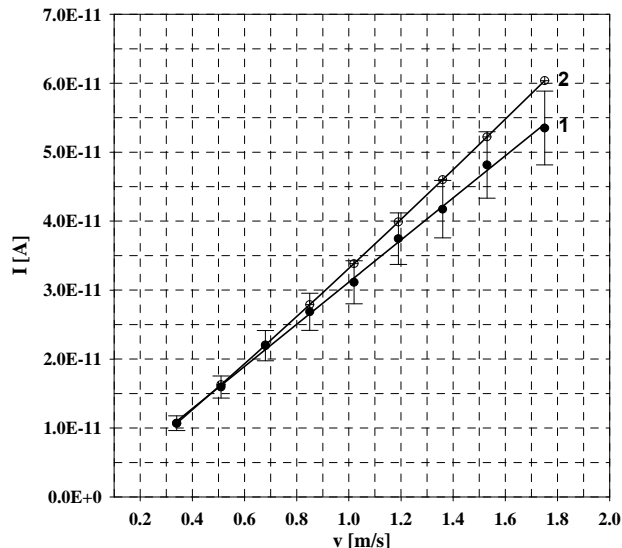
Właściwość	Wartość	
	Trafo En	Midel 7131
Gęstość (ρ , kg/m ³)	885	970
Lepkość (ν , m ² /s)	$2,04 \times 10^{-5}$	$7,05 \times 10^{-5}$
Przenikalność el. wzgl. (ϵ_w , -)	2,23	3,19
Konduktywność (σ , S/m)	$7,94 \times 10^{-13}$	$8,77 \times 10^{-12}$
Wsp. dyfuzji molek. (D_m , m ² /s)	$4,35 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-7}$
Długość rurki (l, m)	0,4	
Promień rurki (r, m)	0,002	

Analiza wyników symulacyjnych i eksperymentalnych

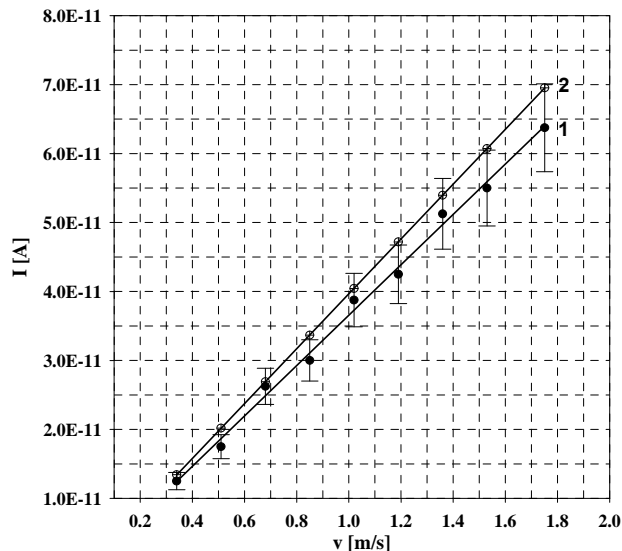
Rysunki od 2 do 5 przedstawiają charakterystyki prądu elektryzacji strumieniowej oleju mineralnego Trafo En oraz estru syntetycznego Midel 7131 w funkcji prędkości przepływu, uzyskane na drodze analiz symulacyjnych modelu elektryzacji Abediana-Sonina oraz badań eksperymentalnych.



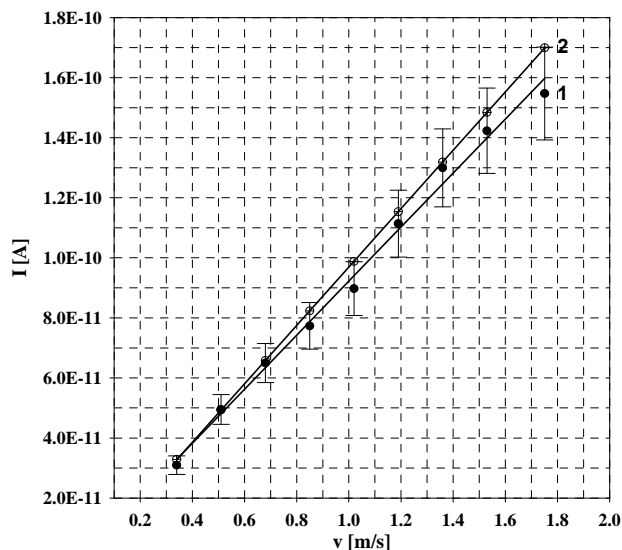
Rys.2. Zależność prądu elektryzacji oleju mineralnego Trafo En od prędkości przepływu przez rurkę celulozową: 1 – badania eksperymentalne, 2 – badania modelowe



Rys.3. Zależność prądu elektryzacji oleju mineralnego Trafo En od prędkości przepływu przez rurkę aramidową: 1 – badania eksperymentalne, 2 – badania modelowe



Rys.4. Zależność prądu elektryzacji cieczy Midel 7131 od prędkości przepływu przez rurkę celulozową: 1 – badania eksperymentalne, 2 – badania modelowe



Rys.5. Zależność prądu elektryzacji cieczy Midel 7131 od prędkości przepływu przez rurkę aramidową: 1 – badania eksperymentalne, 2 – badania modelowe

Można zaobserwować, że prąd elektryzacji wzrasta liniowo przy zwiększającej się prędkości przepływu obu cieczy izolacyjnych przez rurkę pomiarową. Uzyskane wyniki wykazały, że nowoczesny ester syntetyczny odznacza się większą podatnością na elektryzację niż mineralny olej izolacyjny. Rodzaj materiału rurki również w sposób istotny determinuje generację ładunków elektrostatycznych w badanych dielektrykach ciekłych. Zaobserwowano, że zjawisko elektryzacji zachodzi intensywniej w rurce wykonanej z papieru aramidowego. Uzyskane wyniki wykazały, że model elektryzacji w całym rozpatrywanym zakresie prędkości przepływu cieczy izolacyjnych, daje wartości wyższe od wyznaczonych na drodze eksperymentalnej. Prezentowane wyniki wskazują, że wzrost prędkości przepływu cieczy istotnie determinuje różnice między wartościami prądu elektryzacji uzyskanymi z modelu i badań laboratoryjnych. Porównując przedstawione charakterystyki można zauważyć, że najlepszą zgodność modelu z wynikami eksperymentalnymi otrzymuje się przy prędkości przepływu cieczy w rurce pomiarowej, mieszczącej się w zakresie od 0,34 do ok. 0,7 m/s. W przedziale prędkości od 0,7-1,75 m/s, obliczone z modelu wartości prądu elektryzacji zawierają się w przedziałach niepewności pomiarowej wyznaczonych w oparciu o wyniki eksperymentalne.

Statystyczną weryfikację uzyskanych wyników badań przedstawiono w pracy [9]. Główną przyczyną zaistniałych rozbieżności można upatrywać w nieuwzględnieniu przez modelu Abediana-Sonina rodzaju materiału oraz chropowatości powierzchni rurki. Wymiary geometryczne oraz struktura wewnętrznej powierzchni rurki pomiarowej odgrywają istotną rolę w procesie formowania się podwójnej warstwy elektrycznej na granicy kontaktu fazy stałej i ciekłej. Proces ten zachodzi z określoną stałą czasową i istotnie wpływa na generację ładunków elektrostatycznych.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę porównawczą wyników prądu elektryzacji strumieniowej oleju mineralnego i estru syntetycznego, uzyskanych w oparciu o symulację modelu Abediana-Sonina oraz badania eksperymentalne, przeprowadzone w układzie przepływowym z rurką pomiarową. Zaobserwowano dużą zbieżność wyników modelowych i badań laboratoryjnych. Stwierdzono, że rodzaj cieczy, prędkość przepływu, a także materiał rurki pomiarowej istotnie wpływają na intensywność zjawiska elektryzacji strumieniowej. Najwyższe wartości prądów

elektryzacji uzyskuje się w przypadku przepływu estru syntetycznego Midel 7131 przez rurkę aramidową, natomiast najniższe przy przepływie oleju mineralnego Trafo En przez rurkę wykonaną z papieru celulozowego. Przeprowadzone prace dowodzą, że analizy modelowe pozwalają wstępnie określić właściwości elektrostatyczne badanych cieczy izolacyjnych oraz są przydatne podczas projektowania laboratoryjnych układów pomiarowych. Ważną zaletą przedstawionych symulacji modelowych prądu elektryzacji, generowanego przepływem cieczy izolacyjnych, jest również możliwość wykorzystania ich przy prognozowaniu zagrożeń elektryzacją w przemyśle elektroenergetycznym.

Autor: dr hab. inż. Maciej Zdanowski, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: m.zdanowski@po.edu.pl

LITERATURA

- [1] Kędzia J., Wolny S., Zdanowski M., Zmarzły D., Zagrożenia wynikające z elektryzacji strumieniowej w transformatorach energetycznych. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 24 (2008), 63-69
- [2] Zdanowski M., Kędzia J., Badania wpływu procesów starzeniowych na tendencję do elektryzacji mineralnych olejów izolacyjnych, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 11b (2012), 203-205
- [3] Zdanowski M., Streaming Electrification of Mineral Insulating Oil and Synthetic Ester MIDEI 7131[®], *IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Ins.*, 21 (2014), n.3, 1127-1132
- [4] Zdanowski M., Measurements of physicochemical and electrical properties of insulating liquids, *Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, 98 (2019), 181-193
- [5] Zdanowski M., Maleska M., Streaming Electrification of Insulating Liquid Mixtures, *Archives of Electrical Engineering*, 68 (2019) n.2, 387-397
- [6] Zdanowski M., Ocena podatności izolacji transformatorów na elektryzację strumieniową, *Studia i Monografie*, z. 374 (2014), Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej
- [7] Abedian B., Sonin A. A., Theory for electric charging in turbulent pipe flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 120 (1981), 199-217
- [8] Zdanowski M., Ozon T., System pomiarowy do badania elektryzacji strumieniowej cieczy izolacyjnych, *Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, (86), 2016, 393-403
- [9] Zdanowski M., Statystyczna weryfikacja wyników badań elektryzacji strumieniowej cieczy izolacyjnych, *Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, 90 (2017), 21-32