

Maciej ZDANOWSKI\*  
Tomasz OZON\*

## SYSTEM POMIAROWY DO BADANIA ELEKTRYZACJI STRUMIENIOWEJ CIECZY IZOLACYJNYCH

W artykule przedstawiono wyniki badań elektryzacji strumieniowej oleju izolacyjnego uzyskane w układzie przepływowym z rurka pomiarową. Do badań wykorzystano elektrometr cyfrowy Keithley 6517A z interfejsem RS-232, umożliwiającym korzystanie z poleceń SCPI (ang. Standard Commands for Programmable Instruments). Zastosowano również elektroniczny układ sterowania elektrozaworem. Oba urządzenia kontrolowane były przez komputer klasy PC, na którym zainstalowano oprogramowanie, napisane w języku C# w środowisku Microsoft Visual Studio z wykorzystaniem framework'u .NET. Opracowane oprogramowanie umożliwiało zadanie parametrów pomiaru, automatyczne uruchomienie go w określonym czasie, zgromadzenie wyników i wstępną ich ocenę. Możliwy był również zapis wyników do pliku w formacie wygodnym do dalszej analizy przy użyciu różnych narzędzi do obróbki danych.

SŁOWA KLUCZOWE: ciecze izolacyjne, elektryzacja strumieniowa, układ przepływowy z rurką, oprogramowanie pomiarowe, akwizycja danych

### 1. WPROWADZENIE

Wzrost mocy transformatorów elektroenergetycznych spowodowany został zwiększającym się zapotrzebowaniem na energię elektryczną. Intensywny rozwój inżynierii materiałowej umożliwił opracowanie nowoczesnych technologii produkcji syntetycznych cieczy oraz materiałów stałych o podwyższonych parametrach elektroizolacyjnych, pozwalających na zwiększanie mocy tych urządzeń, przy możliwie niewielkich zmianach ich gabarytów. Do tej grupy materiałów należą ciecze izolacyjne produkowane na bazie estrów organicznych [1] oraz papiery wytwarzane w oparciu o włókna aramidowe [2]. Zwiększanie obciążalności transformatorów, przy jednoczesnej próbie minimalizowania ich masy oraz wymiarów, wymagało jednak wprowadzania zmian konstrukcyjnych, polegających m.in. na zbliżaniu elementów czynnych transformatora. Pojawiła się równocześnie problematyka skutecznego odprowadzania strat ciepła. W celu intensyfikacji chłodzenia uzwojeń transformatora najczęściej zwiększano przed-

---

\* Politechnika Opolska.

kość przepływu cieczy izolacyjnej. Takie rozwiązanie wpływało jednak na wzrost generacji ładunków elektrostatycznych [3]. Problematyką elektryzacji zajmowała się powołana przez CIGRE grupa robocza 12/15-02 [4], a także Massachusetts Institute of Technology (MIT) oraz Electric Power Research Institute (EPRI) w ramach projektu o nazwie Static Electrification in Power Transformers [5]. Z tego względu prowadzono badania elektryzacji na rzeczywistych transformatorach [6], a następnie na dużych układach laboratoryjnych modelujących ich pracę [7]. Następnie wprowadzono małe układy laboratoryjne [8-11].

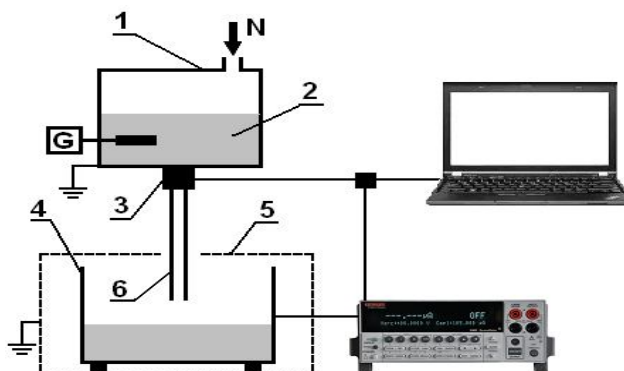
Głównym celem prowadzonych na szeroką skalę badań było dogłębne poznanie natury generowanego zjawiska elektryzacji strumieniowej oraz znalezienie skutecznych sposobów jego ograniczenia. Badano oleje mineralne [12] oraz syntetyczne [13], a także czyste węglowodory oraz ich mieszaniny [14]. Analizowano m.in. wpływ warunków hydrodynamicznych [15], temperatury [16], procesów starzeniowych [17], a także właściwości materiału stałego [18]. Badane zagadnienia są ważne zarówno z punktu widzenia naukowego, jak również posiadają ważny aspekt praktyczny.

Nowoczesne materiały izolacyjne stałe cechują się interesującymi właściwościami fizykochemicznymi a w połączeniu z innymi materiałami np. olejem izolacyjnym mogą wykazywać znacząco odmienne cechy. Badania właściwości elektrostatycznych cieczy izolacyjnych, stanowią do nauki o materiałach ogromną bazę informacji, mogącą posłużyć do późniejszych opracowań nowych lub zmodyfikowanych materiałów do zastosowań w elektroenergetyce. Określenie stopnia podatności na elektryzację (ang. ECT – Electrostatic Charging Tendency) cieczy izolacyjnych nie wymaga stosowania dużych, a w związku z tym i kosztownych, układów transformatorowych czy modelowych.

Małe układy laboratoryjne cechują się prostotą budowy, łatwością dokonywania pomiarów, niewielką objętościowo próbką oleju potrzebną do wykonania testu, niskimi kosztami konstrukcji, jak i późniejszych badań. Do tego typu układów zalicza się również układ przepływowy z rurką. Czynnikiem utrudniającym stosowanie tej metody jest niski poziom generowanych natężeń prądów elektryzacji (rzędu  $10^{-12}$  A), będących wartością mierzoną. Obecność osoby przeprowadzającej pomiar w bezpośredniej bliskości układu pomiarowego i jej ewentualne ruchy prowadzą do zakłóceń mierzonych wartości. Celowym wydaje się więc stworzenie układu pomiarowego eliminującego ten niekorzystny wpływ, na przykład poprzez zautomatyzowanie procesu akwizycji próbek i zdalne sterowanie procesem pomiarowym. Dodatkowo, takie podejście zwiększa wygodę pracy i umożliwia zgromadzenie większej ilości próbek w celu ich dalszej analizy.

## 2. CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU POMIAROWEGO

Na rysunku 1 przedstawiono schemat systemu do badania elektryzacji strumieniowej cieczy izolacyjnych. Badana ciecz, przepływając ze zbiornika górnego przez rurkę elektryzuje się i s pływa do odizolowanego zbiornika dolnego, umieszczonego w klatce Faraday'a. Uplływ zgromadzonych w nim nadmiarowych ładunków elektrycznych do ziemi rejestrowany jest za pomocą elektrometru Keithley 6517A. Regulacja prędkości przepływu cieczy przez rurkę następuje poprzez zmianę wartości ciśnienia poduszki gazu (azotu) w zbiorniku górnym. Czas przepływu cieczy przez rurkę pomiarową regulowany jest za pomocą elektrozaworu. Prędkość przepływu cieczy oraz jej temperatura regulowane są automatycznie za pomocą mikroprocesorów umieszczonych w skrzynce sterowniczej. Regulacja elektrozaworem oraz akwizycja i wstępne przetwarzanie danych pomiarowych odbywa się za pomocą programu pomiarowego, zainstalowanego w komputerze przenośnym. Badania laboratoryjne przeprowadzono na próbkach świeżego oleju mineralnego TRAF0 EN, a jego właściwości fizykochemiczne i elektryczne zamieszczono w tabeli 1. Do badań zastosowano rurki o długości 400 mm oraz średnicy 4 mm, wykonane z aluminium, miedzi, mosiądzu, a także włókna węglowe oraz laminatu epoksydowo-szklanego. Pomiaru wykonywano w temperaturze 20°C, a prędkość przepływu cieczy wynosiła 0,34 m/s.



Rys. 1. Schemat systemu pomiarowego do badań elektryzacji strumieniowej cieczy izolacyjnych: 1 – zbiornik górny, 2 – ciecz, 3 – elektrozawór, 4 – zbiornik dolny (pomiarowy), 5 – klatka Faraday'a, 6 – rurka pomiarowa, G – układ regulacji i stabilizacji temperatury, elektrometr Keithley 6517A, komputer przenośny

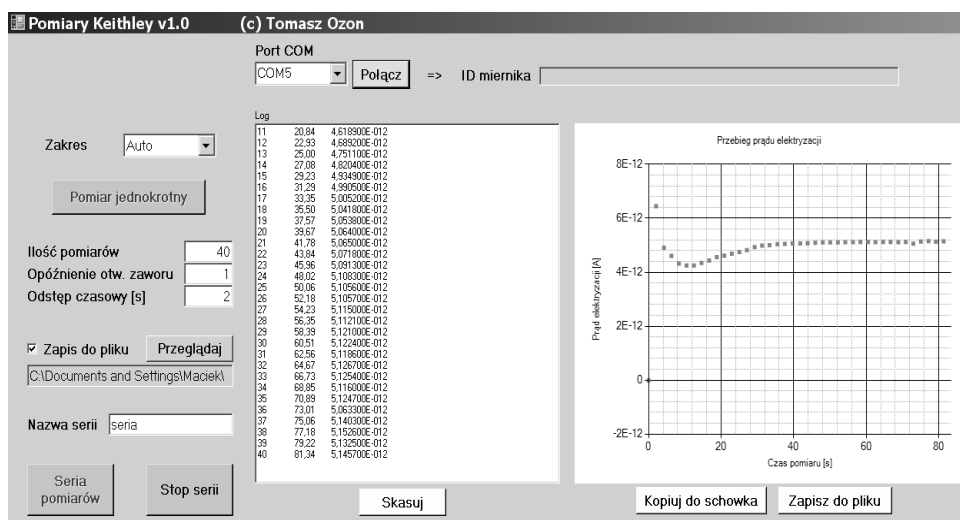
W celu usprawnienia eksperymentu, zdecydowano się na zautomatyzowanie całego procesu pomiarowego. Wykorzystując możliwości przyrządu pomiarowego, opracowano sposób jego sterowania przy pomocy interfejsu RS-232 i poleceń SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments, zgodnie z IEEE 488.2).

Tabela 1. Właściwości oleju mineralnego TRAFO EN

Właściwość	Jednostka	Wartość
Lepkość kinematyczna (20°C)	m <sup>2</sup> /s	2,04 · 10 <sup>-5</sup>
Współczynnik dyfuzji molekularnej (20°C)	m <sup>2</sup> /s	4,35 · 10 <sup>-5</sup>
Gęstość (20°C)	kg/m <sup>3</sup>	885
Odporność na utlenianie: -liczba kwasowa	mg KOH/g	0,93
-zawartość osadów	%	0,14
Napięcie przebicia	kV	44,9
Konduktywność (20°C)	S/m	7,94 · 10 <sup>-13</sup>
Współczynnik strat dielektrycznych (20°C; 50 Hz)	-	0,0006
Przenikalność elektryczna względna (20°C; 50 Hz)	-	2,23

Polecenia te pozwalają konfigurować miernik, wyzwalać pomiar, pobierać wyniki prądu elektryzacji oraz odczytywać status przyrządu. Do uruchamiania przepływu badanej cieczy zastosowano elektrozawór zasilany przez moduł elektroniczny pełniący rolę przekaźnika, sterowanego przy pomocy linii DTR (ang. Data Transmission Ready) interfejsu RS-232. Moduł elektroniczny zawiera optotriak, zapewniający izolację galwaniczną interfejsu i komputera od sieci 230 V oraz triak, jako element wykonawczy. Do wymiany danych między komputerem a miernikiem wykorzystano konwerter Unitek Y-105. W omawianym systemie pomiarowym zastosowano autorskie oprogramowanie, służące do sterowania elektrozaworem oraz akwizycji wyników pomiarowych i wstępnego ich przetwarzania. Oprogramowanie stworzono w obiektowym języku programowania C# firmy Microsoft z zastosowaniem framework'u .NET. W projekcie skorzystano ze środowiska programistycznego Visual Studio, umożliwiającego edycję kodu programu, kompilację i wyszukiwanie błędów. Aplikacja służy do uruchomienia eksperymentu, akwizycji wartości pomiarowych, wstępnej wizualizacji uzyskiwanych wartości prądu elektryzacji i zapisu ich do pliku. Uruchomienie eksperymentu polega na pobraniu zadanej liczby próbek pomiarowych przed otwarciem elektrozaworu w celu uzyskania poziomu odniesienia, następnie otwarciu zaworu i dalszym pobieraniu próbek, aż do uzyskania zadeklarowanej ich liczby. Możliwe jest ustawienie ilości próbek przed i po otwarciu zaworu oraz odstępu czasowego pomiędzy pomiarami.

Akwizycja danych pomiarowych, polega na gromadzeniu kolejnych wartości mierzonej wielkości prądu elektryzacji wraz ze znacznikiem czasowym. Uzyskiwane próbki są wizualizowane w formie tekstowej („log”) i w formie graficznej (wykres), na bieżąco podczas działania programu.



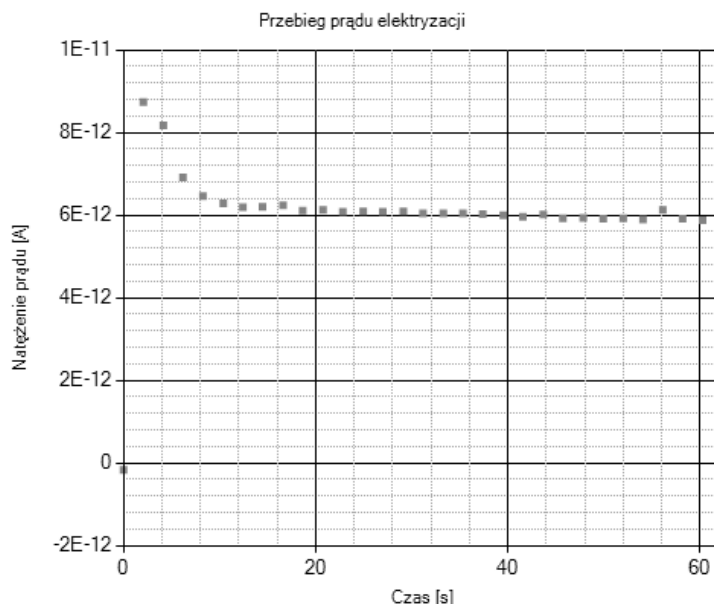
Rys. 2. Widok ogólny okna programu sterującego procesem pomiarowym

Pozwala to na wstępną ocenę uzyskiwanych wyników i ewentualne przerwanie eksperymentu w razie zauważenia znaczącej rozbieżności pomiędzy uzyskiwanymi, a oczekiwanymi wartościami mierzonej wielkości. Zapis do pliku możliwy jest zarówno w formacie CSV (ang. Comma-Separated Values), jak i w postaci wstępnego wykresu widocznego w oknie programu. Pliki CSV mogą być łatwo wczytywane do większości narzędzi służących do obróbki danych.

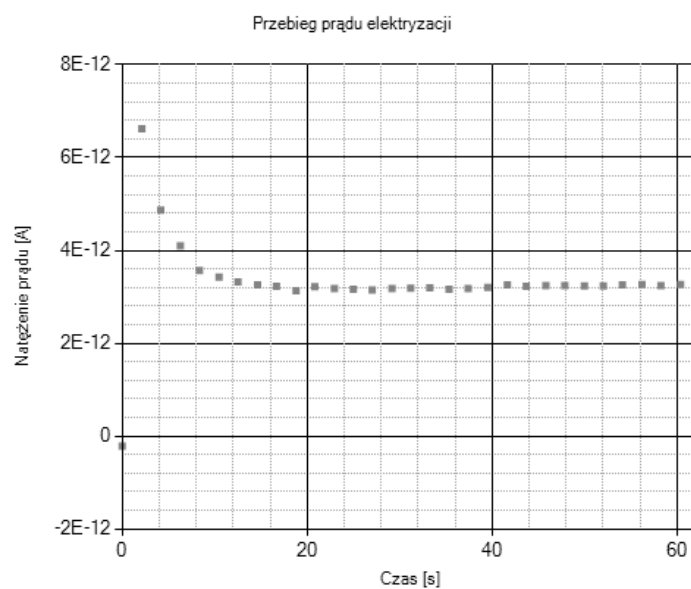
### 3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Ciecz dielektryczna w układzie izolacyjnym transformatora elektryzuje się na skutek kontaktu z materiałami o różnych właściwościach elektrycznych. W tego typu urządzeniach występują zarówno dielektryki (papier, preszpan) stosowane do izolacji uzwojeń transformatora, jak również metal, z którego zbudowane są elementy układu chłodzenia (np. pompa, radiatory chłodnicy). Właściwości materiału mogą odgrywać istotną rolę w generacji ładunków elektrostatycznych w przepływającej cieczy izolacyjnej. Małe układy laboratoryjne stwarzają możliwość stosowania rurek wykonanych z różnych materiałów, przez co uzyskuje się szerszy pogląd na zachodzące podczas przepływu cieczy izolacyjnej zjawisko elektryzacji strumieniowej. Na potrzeby niniejszej pracy, do badań elektryzacji oleju mineralnego TRAF0 EN zastosowano rurki wykonane z aluminium, miedzi, mosiądzu, a także włókna węglowego oraz laminatu epoksydowo-szklanego. Wyniki badań podatności na elektryzację oleju przy prędkości przepływu wynoszącej 0,34 m/s, zaprezentowano na rysunkach od 3-7. Przeprowadzone badania elektryzacji oleju mineralnego potwierdziły wysoką przydatność

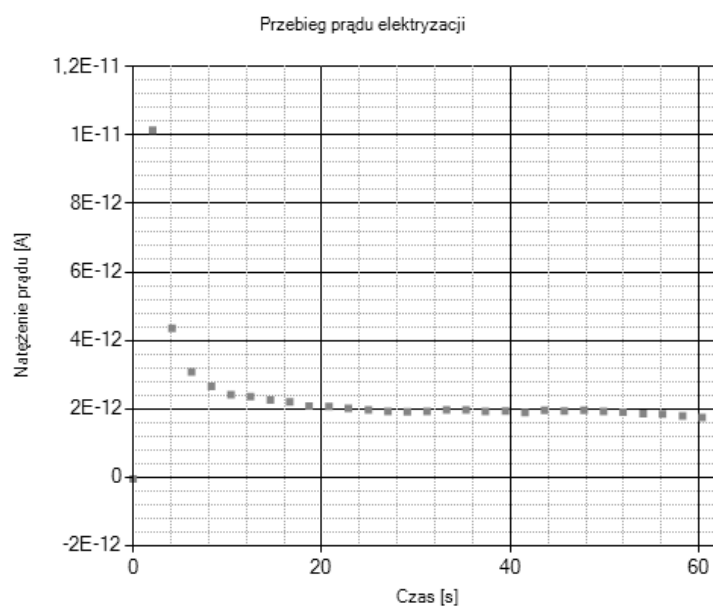
opracowanego systemu pomiarowego, zawierającego układ elektroniczny oraz dedykowane oprogramowanie do sterowania procesem pomiarowym. Dzięki wizualizacji graficznej, możliwe było obserwowanie przebiegu mierzonego prądu elektryzacji w zadanym przedziale czasowym. Badania wykazały występowanie stanów nieustalonych prądu elektryzacji w początkowym etapie przepływu oleju przez rurkę pomiarową. Zaobserwowano, że fluktuacje zanikają po upływie ok 20 sekund, niezależnie od rodzaju materiału, z którego wykonano rurkę w skutek. W oparciu o uzyskane wyniki badań należy stwierdzić, że do dalszych analiz powinny być wykorzystywane próbki, których wartości zarejestrowano po upływie tego czasu, czyli po ustabilizowaniu się przepływu cieczy. Uzyskane wyniki badań wskazują, że wartości prądów elektryzacji są silnie uzależnione od rodzaju materiału, z którego wykonana jest rurka pomiarowa. Generacja ładunków elektrostatycznych w przepływającym oleju mineralnym zachodzi w największym stopniu w rurce aluminiowej. Najslabiej ciecz ta elektryzowała się przepływając przez rurkę wykonaną z laminatu epoksydowo-szklanego. Interesującym jest fakt, że w przypadku rurki wykonanej z tego materiału, przepływający przez nią olej elektryzuje się ujemnie. Zjawisko to może wynikać ze znacząco odmiennych właściwości fizykochemicznych laminatu, w porównaniu np. do rurek metalowych.



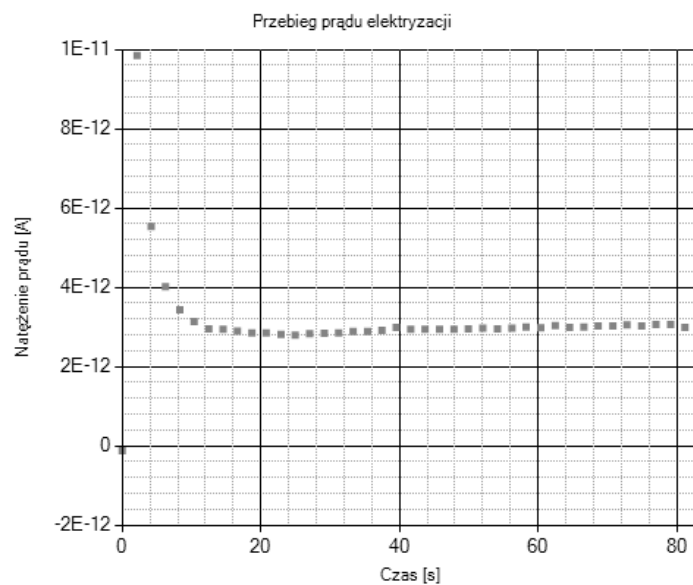
Rys. 3. Zależność prądu elektryzacji strumieniowej oleju mineralnego TRAF0 EN przepływającego z przez rurkę aluminiową;  $v = 0,34$  m/s,  $l = 400$  mm,  $d = 4$  mm



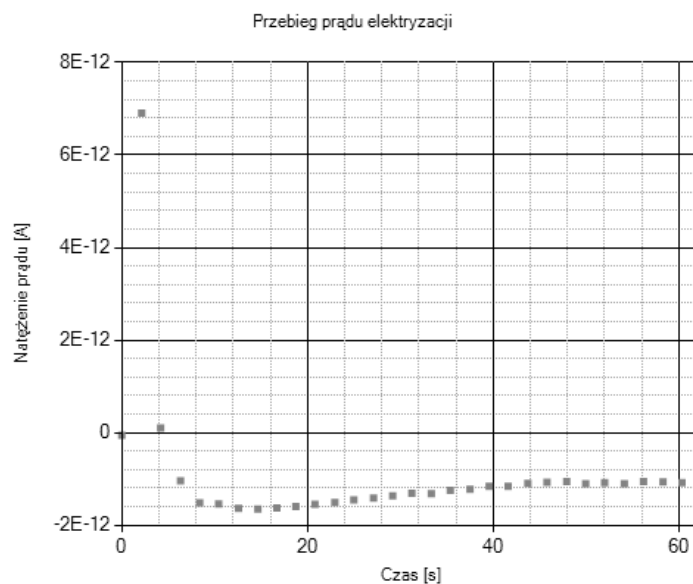
Rys. 4. Zależność prądu elektryzacji strumieniowej oleju mineralnego TRAF0 EN przepływającego z przez rurkę miedzianą;  $v = 0,34$  m/s,  $l = 400$  mm,  $d = 4$  mm



Rys. 5. Zależność prądu elektryzacji strumieniowej oleju mineralnego TRAF0 EN przepływającego z przez rurkę mosiężną;  $v = 0,34$  m/s,  $l = 400$  mm,  $d = 4$  mm



Rys. 6. Zależność prądu elektryzacji strumieniowej oleju mineralnego TRAF0 EN przepływającego z przez rurkę węglową;  $v = 0,34$  m/s,  $l = 400$  mm,  $d = 4$  mm



Rys. 7. Zależność prądu elektryzacji strumieniowej oleju mineralnego TRAF0 EN przepływającego z przez rurkę z laminatu epoksydowo-szklanego;  $v = 0,34$  m/s,  $l = 400$  mm,  $d = 4$  mm



#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki badań elektryzacji strumieniowej mineralnego oleju izolacyjnego TRAF0 EN, uzyskane w systemie pomiarowym, składającym się z układu przepływowego z rurką, precyzyjnego elektrometru oraz komputera przenośnego. Przedstawiono opracowaną aplikację do sterowania procesem pomiarowy, w szczególności elektrozaorem oraz procedurą akwizycji i wstępnego przetwarzania wyników pomiaru prądu elektryzacji. Stworzone oprogramowanie umożliwiało zdalne uruchomienie eksperymentu, akwizycję wartości pomiarowych, wstępną ich wizualizację oraz zapisu do pliku, celem dalszej analizy. W trakcie badań zaobserwowano istotne różnice w elektryzacji strumieniowej wynikające z rodzaju materiału rurki. Najwyższe wartości prądów elektryzacji zarejestrowano podczas przepływu oleju mineralnego przez rurkę aluminiową, natomiast najniższe przy zastosowaniu rurki wykonanej z laminatu epoksydowo-szklanego. Dla tego przypadku uzyskiwane wartości prądów charakteryzowały się znakiem ujemnym. W artykule wykazano przydatność dedykowanego oprogramowania, umożliwiającego zautomatyzowanie procesu pomiarowego. Wyeliminowano dzięki temu niekorzystny wpływ zakłóceń na wartość mierzonych prądów elektryzacji, na skutek obecności osoby przeprowadzającej badania. Opracowana procedura, umożliwiła pomiar prądu elektryzacji w początkowym okresie wypływu cieczy z rurki, co skutkowało możliwością rejestracji stanów nieustalonych w jego przebiegu. Na tej podstawie stwierdzono, że stabilny pomiar badanego parametru możliwy jest po ok. 20 sekundach od otwarcia elektrozaoru. Uzyskane wyniki badań znacząco usprawniły badania podatności cieczy izolacyjnych na elektryzację oraz pozwoliły na uściślenie istniejących dotychczas procedur pomiaru prądu elektryzacji w układzie przepływowym z rurką pomiarową.

#### LITERATURA

- [1] P. Boss, T.V. Oommen, New insulating fluids for transformers based on biodegradable high oleic vegetable oil and ester fluid, IEE Colloquium on Insulating Liquids, Leatherhead, No. 1999/119, pp. 7/1-7/10, 1999.
- [2] T. Prevost, M. Franchek, Conductor insulation tests in oil: aramid vs. kraft, IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 5, pp. 10-14, 1989.
- [3] T. Tagaki, T. Ishi, T. Okada, K. Kurita, R. Tamura and H. Murata, Reliability Improvement of 500kV Large Capacity Power Transformer, CIGRE S12, Session Paper 12-02, Paris, 1978.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] T. V. Oommen, Static Electrification Properties of Transformer Oil, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 23, No. 1, pp. 123-128, 1988.
- [9] J. Kędzia, Measurement of the Electrification of Liquids in the Rotating Cylinder System, *J. Electrostatics*, Vol. 20, No. 3, pp. 305-312, 1988.
- [10] D.O. Zmarzły, J. Kędzia, A noise analyzer for monitoring static electrification current, *Journal of Electrostatics*, Vol. 63/5, pp. 409-422, 2005.
- [11] 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.
- [12] M. Zdanowski, Streaming Electrification of Mineral Insulating Oil and Synthetic Ester MIDEL 7131<sup>®</sup>, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 21, No. 3, pp. 1127-1132, 2014.
- [13] M. Zdanowski and J. Kędzia, Research on the Electrostatic Properties of Liquid Dielectric Mixtures, *J. Electrostatics*, Vol. 65, No. 8, pp. 506-510, 2007.
- [14] 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.
- [15] G. Touchard, Streaming Currents Developed in Laminar and Turbulent Flows Through a Pipe, *J. Electrostatics*, Vol. 5, pp. 463-473, 1978.
- [16] 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.
- [17] J. Kędzia, Electrostatic Properties of Aged Transformer Oil, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 24, No. 2, pp. 175-185, 1989.
- [18] 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.

#### **MEASURING SYSTEM FOR A STREAMING ELECTRIFICATION TESTS OF INSULATING LIQUIDS**

In the paper measurement results of streaming electrification of insulating oil are shown, that were acquired in a pipe flow system. During experiment Keithley 6517A electrometer has been used. It is equipped with RS-232 interface and enables SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) commands usage. Additional electronic circuit has been employed to control solenoid valve. Both devices have been controlled by PC computer, using software, that was developed in Microsoft Visual

---

Studio in C# programming language with .NET framework usage. The software enables to set measurement parameters, automatically start it at defined point of time, data acquisition and preliminary evaluation of the results. It also makes possible to save measurement results to a file using data format, that is compatible with many software tools for data analysis.

*(Received: 30. 01. 2016, revised: 29. 02. 2016)*