



Jarosław GIELNIAK, Piotr PRZYBYŁEK, Hanna MOŚCICKA-GRZESIAK

Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki

Wpływ objętości próbki oleju izolacyjnego na rezystancję mostka wyładowczego

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów rezystancji mostka wyładowczego rozwijającego się w oleju w czasie działania napięcia stałego. Pomiarów dokonano w modelowym układzie elektrod kula-kula dla różnych objętości oleju. Dokonano również symulacji komputerowej obrazu pola elektrycznego w analizowanym układzie, co pozwoliło na określenie minimalnej wartości natężenia pola elektrycznego, pod wpływem którego zanieczyszczenia mogą migrować w obszar międzyelektrodowy.

Abstract. (Influence of oil sample volume on resistance of contamination bridge). The paper presents measurement results of breakdown bridge resistance, which can form in oil (it was on DC voltage). The measurements were done with utility of two sphere electrodes for different volume of oil. The computer simulation of electric field intensity distribution in analyzed area was done. The computer simulation can help in determine the minimal value of electric field strength, which can lead to migration of contamination in to electrode gap.

Słowa kluczowe: rezystancja mostka wyładowczego, efekt objętościowy, symulacja komputerowa, rozkład natężenia pola elektrycznego.

Keywords: resistance of contamination bridge, volume effect, computer simulation, distribution of electric field strength.

Wstęp

Praca niniejsza nawiązuje do metody diagnostyki transformatorów opartej na analizie zjawisk polaryzacyjnych.

Od kilku lat lansowana jest metoda diagnostyczna wysokonapięciowych układów izolacyjnych oparta na zjawisku polaryzacji dielektryku, a wykorzystująca efekt napięcia powrotnego [1]. Napięcie powrotne jest wynikiem procesów relaksacyjnych w dielektryku uprzednio spolaryzowanym. Z reguły w lepszych dielektrykach procesy relaksacyjne wymagają dłuższego czasu i wówczas maksimum charakterystyki napięcia powrotnego występuje po stosunkowo długim czasie. Część opadająca charakterystyki – krzywa rozładowania – ma tym mniejszą stromość im lepszy jest dielektryk [2].

Metoda diagnostyczna wykorzystująca napięcie powrotne ma wielu zwolenników, ale pojawiają się również głosy krytyczne. Jeżeli izolacja jest jednorodna w całej objętości badanego urządzenia, np. kablu, wówczas interpretacja wyników jest w zasadzie poprawna. Wnioskowanie o stanie izolacji może być mylne, jeśli system izolacyjny jest mocno rozbudowany i złożony, co ma miejsce np. w transformatorze o izolacji papierowo-olejowej.

Trzeba mieć świadomość, że izolacja główna transformatora, która jest z zasady przedmiotem diagnostyki, jest połączona równolegle z izolacją odpływów, przepustu i przełącznika zaczepów. W dużej objętości oleju, co ma miejsce głównie w przypadku izolacji odpływów, zawilgocone zanieczyszczenia mogą utworzyć mostek w czasie procedury pomiaru napięcia powrotnego. W procedurze takiej używa się napięcie stałe, zwykle o wartości kilku kilowoltów. Mostek może mieć rezystancję o kilka rzędów wielkości mniejszą od rezystancji czystego oleju (lub wypadkowej rezystancji izolacji transformatora) i utworzenie go spowoduje przesunięcie maksimum napięcia powrotnego w kierunku krótszych czasów, nastąpi szybsze rozładowanie układu, a to z kolei będzie sugerowało dużo gorszą jakość izolacji głównej transformatora, niż jest w rzeczywistości [3].

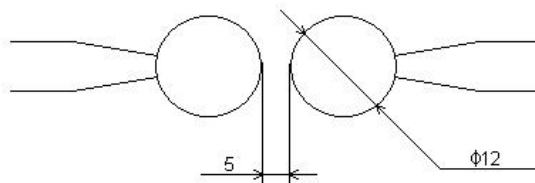
W dużej objętości oleju występuje efekt wymiatania zanieczyszczeń i gromadzenie ich w obszarze o największym natężeniu pola elektrycznego [4]. Objętość, z której są wymiatane zanieczyszczenia, ma wpływ na

parametry elektryczne mostka. W pracy przeanalizowano zależność rezystancji mostka od objętości próbki oleju przy nie zmienianym układzie elektrod.

W transformatorach mocy stan izolacji papierowo-olejowej ma podstawowe znaczenie dla jego pracy. Jej ocena za pomocą metody pomiaru napięcia powrotnego (RVM) może przyczynić się do poprawy niezawodności pracy układów elektroenergetycznych wykorzystujących transformatory mocy. W celu uniknięcia błędów we wnioskowaniu o stanie izolacji należy najpierw dokładnie poznać zjawiska zachodzące w złożonych układach izolacyjnych w warunkach pracy, ale również w trakcie procedury diagnostycznej.

Obiekty badań

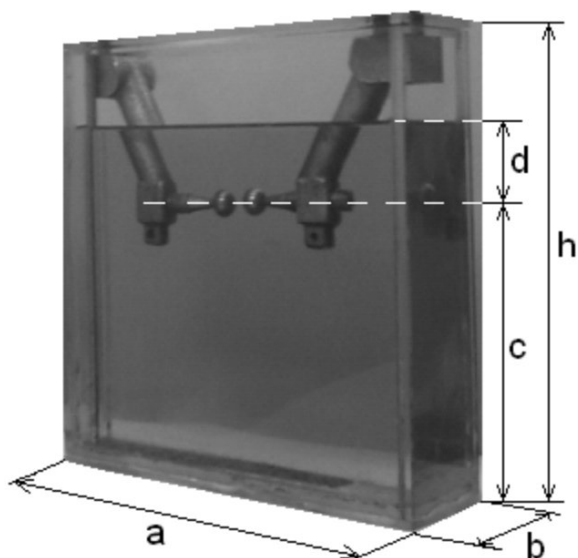
Obiektem badań były próbki oleju transformatorowego o różnej objętości. Olej badano w układzie elektrod kula-kula o średnicy 12 mm. Odległość między elektrodami wynosiła 5 mm. Układ elektrod do pomiaru rezystancji mostka wyładowczego przedstawia poniższy rysunek.



Rys. 1. Układ elektrod wykorzystany do pomiaru rezystancji mostka wyładowczego w oleju

Badane próbki oleju miały następujące objętości: 1,13; 2,44; 4,88; i 9,76 dm³ i były umieszczone w pojemnikach o kształcie prostopadłościanu. Powyższe objętości uzyskano poprzez zmianę tylko jednego parametru – szerokości oznaczonej na rysunku 2 symbolem b.

W powyższych czterech przypadkach elektrody zostały umieszczone w tej samej odległości $c=115$ mm od dna pojemników (rys. 2), w odległości $d=50$ mm od poziomu oleju oraz pośrodku wymiaru b, który zmieniał się dla każdego z naczyń.

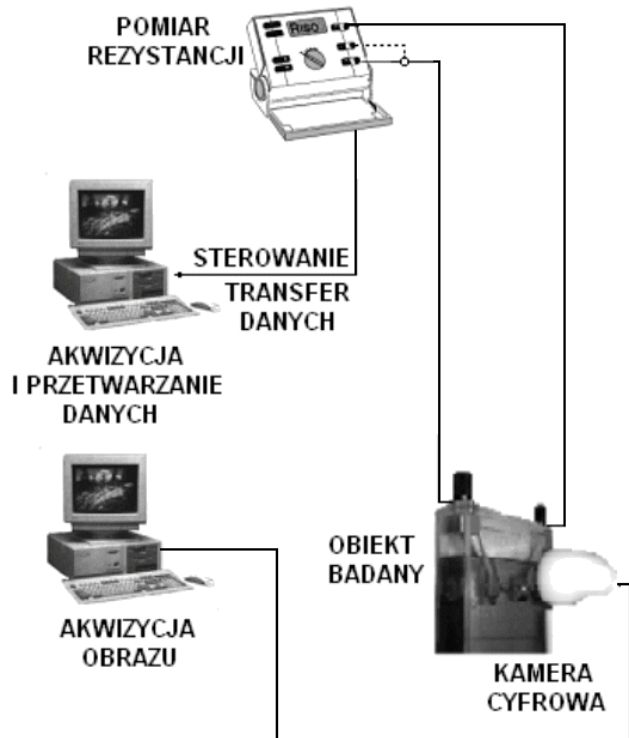


Rys. 2. Pojemnik z układem elektrod

Układ pomiarowy i procedura pomiarowa

Do pomiaru rezystancji mostka użyto cyfrowego miernika izolacji UNILAP 5kV firmy LEM. Do przeprowadzenia badań wybrano napięcie stałe 5 kV.

Miernik został połączony z komputerem klasy PC przez złącze szeregowo, co umożliwiło pomiar rezystancji mostka wyładowczego co jedną sekundę. Układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 3.



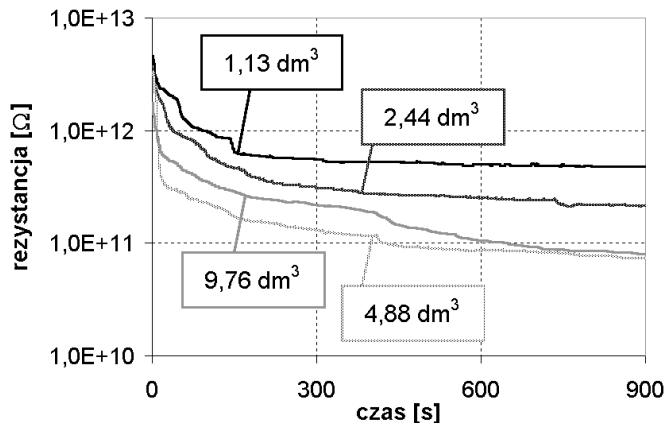
Rys. 3. Schemat układu do pomiaru rezystancji mostka wyładowczego oraz do akwizycji jego obrazu w różnych fazach rozwoju

Czas pomiaru dla wszystkich badanych próbek oleju został ustalony na 15 minut, co dało łącznie po 900 wyników rezystancji mostka wyładowczego dla każdej badanej próbki oleju. Ponadto w skład układu pomiarowego

wchodziła kamera cyfrowa, która umożliwiała obserwację i rejestrację obrazów tworzenia się mostka.

Wyniki

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki pomiaru rezystancji mostka wyładowczego w zależności od czasu działania napięcia stałego o wartości 5 kV dla czterech próbek oleju o różnej objętości.



Rys. 4. Zależność rezystancji mostka wyładowczego od czasu działania napięcia dla czterech próbek oleju o różnej objętości

Na podstawie otrzymanych wyników można wywnioskować, że wraz ze wzrostem objętości badanych próbek oleju, maleje rezystancja mostka wyładowczego, powstającego między elektrodami. W najmniejszej próbce oleju o objętości 1,13 dm³ rezystancja mostka, po 15 minutach oddziaływania pola elektrycznego, ustaliła się na poziomie 480 GΩ, w objętości 2,44 dm³ wyniosła 215 GΩ, a w objętości próbki 4,88 dm³ osiągnęła wartość 74 GΩ. Tak więc widać, że w tych trzech przypadkach wraz z dwukrotnym wzrostem objętości oleju, rezystancja mostka malała około dwukrotnie.

Należy jednak zauważyć, że dla dwóch największych objętości 4,88 dm³ i 9,76 dm³ rezystancja po czasie 15 minut miała zbliżoną wartość (74 GΩ i 80 GΩ), co może sugerować, że dalszy wzrost objętości badanych próbek oleju nie ma wpływu na rezystancję mostka. Dzieje się tak dlatego, że oddalanie ścianek pojemnika od elektrod nie powoduje zwiększenia obszaru wymiatania.

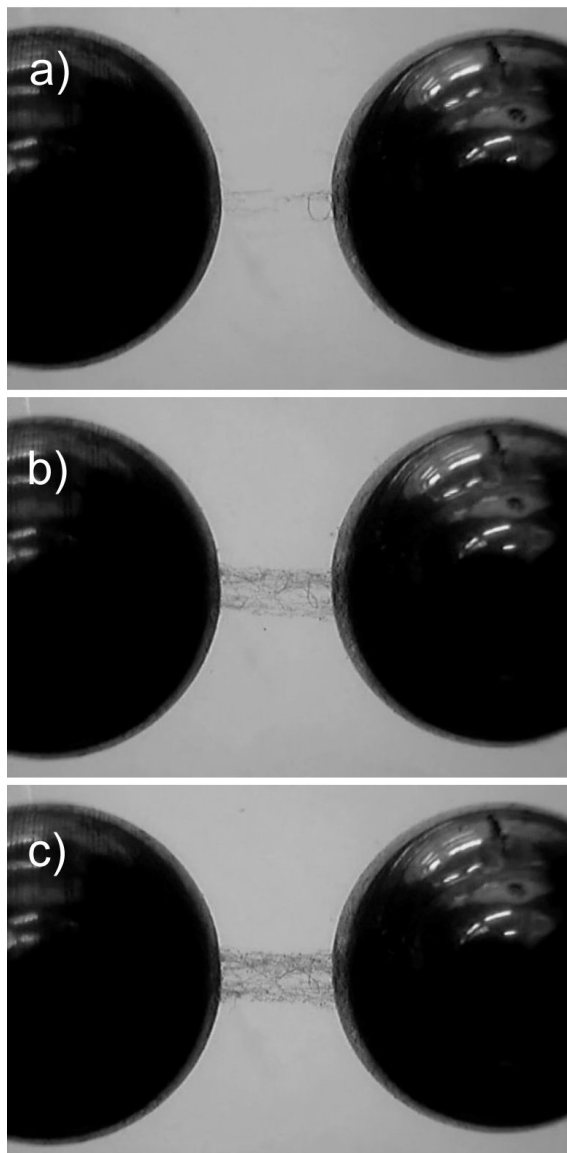
Rysunek 5 przedstawia stopień zaawansowania budowy mostka wyładowczego w próbce oleju o objętości 1,13 dm³, kolejno w 60, 480 i 900 sekundzie od chwili przyłożenia napięcia. Zdjęcia przedstawione na tym rysunku stanowią klatki wycięte z filmu zarejestrowanego podczas pomiarów.

Proces tworzenia mostka cechuje się pewną dynamiką, można nawet wyróżnić charakterystyczne jego fazy. W początkowej fazie rozwoju mostka proces jest bardzo dynamiczny – pierwsze połączenie elektrod można zauważyć już w pierwszej minucie. W kolejnej fazie obserwujemy wzmacnianie się mostka (do około 600 sekundy), po czym struktura mostka stabilizuje się (nie obserwowano powiększania się mostka, ani zagęszczanie jego struktury).

Wraz ze zmianami struktury mostka zmienia się jego rezystancja – w pierwszej fazie obserwujemy gwałtowny spadek wartości rezystancji, po upływie około 600 sekund wartość rezystancji ustala się dla większości próbek.

Rozmiary i stan upakowania mostka zależały od objętości badanej próbki zwiększając się wraz z objętością, przy czym po przekroczeniu objętości 4,88 dm³ nie

obserwowano już znaczących różnic w strukturze mostka. Znajomość tego faktu pozwoliła na określenie wartości natężenia pola elektrycznego, pod wpływem którego znajdujące się w oleju cząstki mogą być wciągane w obszar międzyelektrodowy.

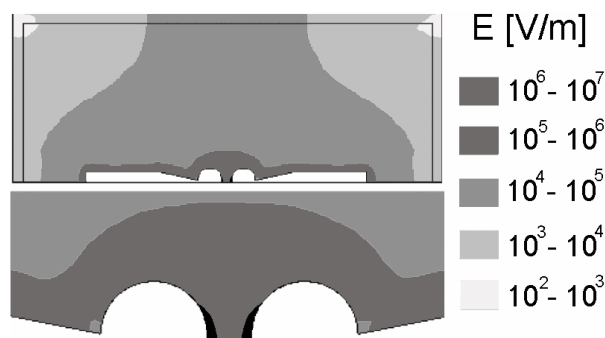


Rys. 5. Proces tworzenia się mostka wyładowczego w 60 sekundzie (a), w 480 sekundzie (b), w 900 sekundzie (c) w próbce oleju o objętości $1,13 \text{ dm}^3$

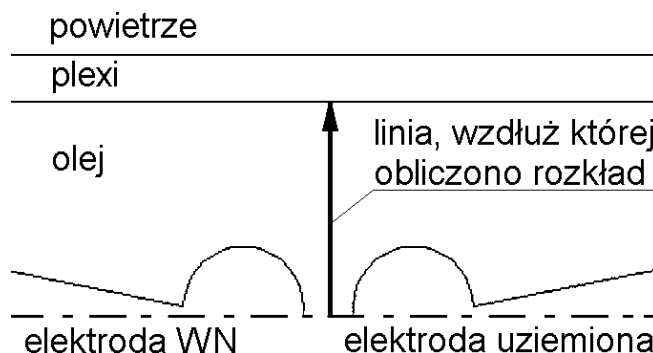
Obliczenia rozkładu natężenia pola elektrycznego

W celu uzyskania obrazu pola elektrycznego w analizowanym układzie posłużono się programem Maxwell SV firmy ANSOFT. Przeprowadzono obliczenia dla wszystkich objętości. Przykładowy obraz pola elektrycznego uzyskany dla próbki oleju o objętości $4,88 \text{ dm}^3$ przedstawiono na rysunku 6.

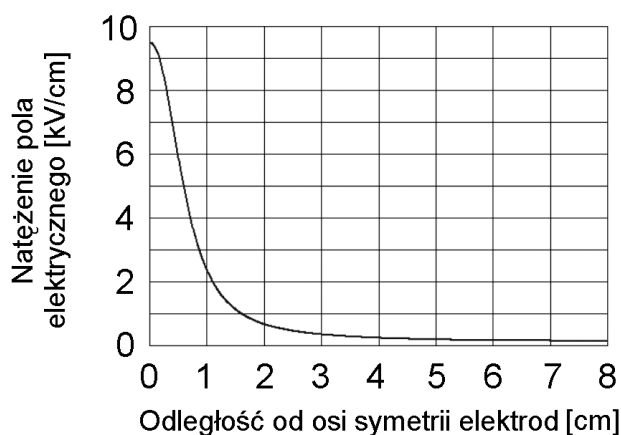
Przedstawienie obrazu pola w skali odcieni szarości nie pozwala na dokładne odczytanie wartości, umożliwia jednak określenie linii, wzdłuż których obliczone zostaną dokładne wartości natężenia pola elektrycznego. Zdecydowano się na obliczenie rozkładu natężenia pola elektrycznego wzdłuż linii przedstawionej na rysunku 7. Zmian objętości dokonywano zwiększając wymiar pojemnika właśnie wzdłuż tej linii (wymiar b na rysunku 2). Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 8.



Rys.6. Obraz pola elektrycznego dla próbki oleju o objętości $4,88 \text{ dm}^3$, napięcie 5 kV przyłożono do lewej elektrody



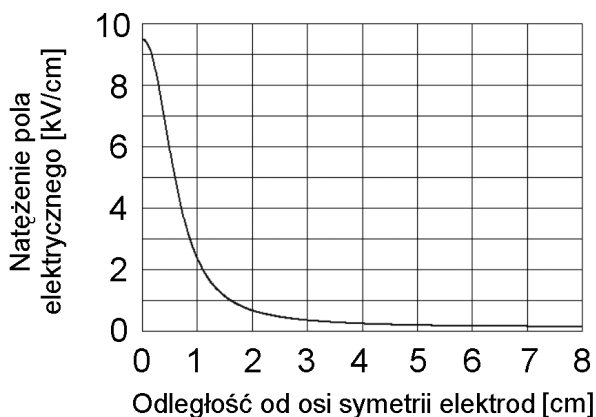
Rys. 7. Lokalizacja linii, wzdłuż której obliczono rozkład natężenia pola elektrycznego przedstawiony na rysunku 8



Rys. 8. Rozkład natężenia pola elektrycznego obliczony dla próbki oleju o objętości $4,88 \text{ dm}^3$ wzdłuż linii przedstawionej na rysunku 7

Z analizy rozkładu natężenia pola wynika, że w przypadku dwóch największych objętości próbek warunki wciągania zanieczyszczeń były zbliżone, gdyż rezystancja po 15 minutach od chwili przyłożenia napięcia nie uległa znaczącej zmianie. Działo się tak dlatego, że obszar o natężeniu pola elektrycznego zdolnym do wywołania ruchu cząstek zanieczyszczeń, nie był w obu tych przypadkach ograniczony ściankami pojemników. Ostatnia znaczna zmiana rezystancji mostka miała miejsce pomiędzy objętością próbek $2,44 \text{ dm}^3$ i $4,88 \text{ dm}^3$. Wynika z tego, że pomiędzy punktami odległymi o 4 i 8 cm od osi podłużnej elektrod (wymiar b) dochodziło do spadku natężenia pola elektrycznego do wartości nie mającej już wpływu na ruch zanieczyszczeń w kierunku większych naprężeń pola.

Wyznaczono zatem wartości natężenia pola elektrycznego w tym przedziale odległości, co przedstawia rysunek 9.



Rys. 9. Rozkład natężenia pola elektrycznego obliczony dla próbki oleju o objętości $4,88 \text{ dm}^3$ wzdłuż linii przedstawionej na rysunku 7 między punktami odległymi o 4 i 8 cm od osi podłużnej elektrod

Z rysunku 9 wynika, że natężenie panujące w analizowanym obszarze posiadało wartość z przedziału $0,05 - 0,15 \text{ kV/cm}$.

Fakt różnicy rezystancji mostka między drugą a trzecią objętością badanych próbek wskazuje na to, że zanieczyszczenia w oleju o objętości $4,88 \text{ dm}^3$ musiały być wciągane nieomal z całego obszaru wyznaczonego ściankami użytego w tym przypadku naczynia, a więc z odległości ok. 8 cm od osi podłużnej elektrod, gdzie panowało natężenie pola elektrycznego równe ok. $0,05 \text{ kV/cm}$. W przyjętych warunkach eksperymentu wynika, że najmniejsza wartość natężenia pola elektrycznego, zdolna wpływać na ruch cząstek w kierunku największych napiężeń pola elektrycznego, ma wartość ok. $0,05 \text{ kV/cm}$. Wartość ta stanowi ok. $0,46\%$ maksymalnego natężenia pola panującego w układzie.

Wnioski

Z przeprowadzonych pomiarów można z całą pewnością wywnioskować, że istnieje wpływ objętości próbki oleju izolacyjnego na rezystancję mostka wyładowczego. Obserwowano spadek rezystancji mostka wyładowczego wraz ze wzrostem objętości badanej próbki oleju. Z upływem czasu mostek stawał się coraz bardziej

zwarty i coraz bardziej rozbudowany, jednocześnie malała jego rezystancja.

Z przedstawionego w niniejszej pracy rozumowania wynika, że w przyjętych warunkach eksperymentu najmniejsza wartość natężenia pola elektrycznego, zdolna wpływać na ruch cząstek w kierunku największych napiężeń pola elektrycznego, wynosi ok. $0,05 \text{ kV/cm}$.

Zwiększanie rozmiarów układu izolacyjnego w taki sposób, że ścianki naczynia znajdują się w przestrzeni o natężeniu pola elektrycznego mniejszym od wartości $0,05 \text{ kV/cm}$, doprowadza do tego, że obszar wymiatania nie obejmuje dodatkowej objętości oleju i nie następuje dalsze zmniejszanie się rezystancji mostka wyładowczego. Sytuacja taka miała miejsce przy zmianie objętości pojemnika z $4,88 \text{ dm}^3$ na $9,76 \text{ dm}^3$.

Wyniki przedstawione w niniejszej pracy są częścią prac badawczych dotyczących oceny stanu izolacji papierowo-olejowej w transformatorach mocy za pomocą metody napięcia powrotnego. Występują tam stosunkowo często problemy z interpretacją wyników pomiaru, które mogą być spowodowane między innymi powstawaniem analizowanych w niniejszej pracy mostków.

LITERATURA

- [1] Nemeth E., Measuring the voltage response, a diagnostic test method of insulations, *7th International Symposium on High Voltage Engineering*, August 26-30 1991, Dresden, No. 72.06 pp. 63-66
- [2] Gielniak J., Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Ossowski M., Rezystancja zanieczyszczonego oleju w różnych fazach rozwoju mostka wyładowczego przy napięciu stałym, *VI Seminarium Techniczne – Materiały i Technologie Elektroizolacyjne*, 24-26 kwietnia 2002 Ustroń-Jaszowiec,
- [3] Ossowski M., Gielniak J., Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Rezystancja oleju w różnych fazach rozwoju mechanizmu mostkowego przy napięciu stałym, *VI Ogólnopolskie Sympozjum, Inżynieria Wysokich Napięć*, Poznań-Kiekrz 20-22 maja 2002, pp. 242-245
- [4] Fleszyński J., Badanie mechanizmu przebiecia elektrycznego cieczy izolacyjnych, *Prace Naukowe Politechniki Wrocławskiej*, IPEE, seria Monografie nr 9, 1986

Autorzy: dr inż. Jarosław Gielniak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: jaroslaw.gielniak@put.poznan.pl; mgr inż. Piotr Przybytek, absolwent Politechniki Poznańskiej, kierunek Elektrotechnika E-mail: pieer@go.2.pl; prof. dr hab. inż. Hanna Mościcka-Grzesiak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, E-mail: Hanna.Moscicka@put.poznan.pl