



Wpływ przebiegów na pułpkowanie i relaksację ładunku w folii polietylenowej

Streszczenie. W referacie przedstawiono znane z literatury wyniki badań, wskazujące na istotny w procesie degradacji izolacji wpływ przebiegów nakładanych na napięcie przemienne. Oddziaływanie przebiegów na izolację wiąże się z wprowadzaniem ładunku elektrycznego do obszaru przyelektrodowego i jego pułpkowaniem. Rodzaj i ilość wprowadzanego ładunku określono jakościowo na podstawie pomiarów termicznie stymulowanej depolaryzacji próbek folii polietylenowej uzupełnionej o rozkłady amplitudowo – fazowe prądu wyładowań niezupełnych.

Abstract. (The influence of overvoltages on charge trapping and relaxation in polyethylene foil). The paper discusses research results known from the literature, which point out a substantial influence of overvoltages overlapped with alternating voltage on degradation of polyethylene insulation. The influence of overvoltages on the insulation is related to introducing the electric charge to dielectric near the electrode and its trapping. Partial discharges pattern and thermal stimulated depolarization of polyethylene foil exposed to alternating and associated voltage allowed to determine the kind of charges, which effectively was introduced into polymer

Słowa kluczowe: izolacja polietylenowa, pułpkowanie ładunku, degradacja izolacji, przebiegi.

Keywords: polyethylene insulation, charge trapping, insulation degradation, overvoltages.

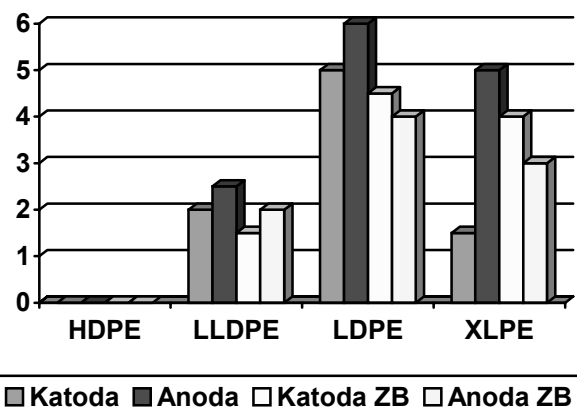
Wstęp

W procesie drzewienia elektrycznego lub wodnego ważną rolę odgrywa ładunek przestrzenny lub powierzchniowy kumulujący się w obszarach przyelektrodowych. Obecność nieskompensowanych ładunków elektrycznych powoduje lokalny wzrost pola elektrycznego intensyfikującego jonizację zderzeniową prowadzącą do rozrywania wiązań chemicznych i degradacji materiału izolacyjnego. Wykonywane w ostatnich latach badania pozwoliły jednoznacznie określić rozkład ładunku elektrycznego izolacji kablowej w stanie ustalonym w czasie ładowania napięciem stałym [1]. Znane jest także rozmieszczenie ładunku w płaskiej próbce polietylenu sieciowanego wygrzanego w temperaturze 333 K przez 40 godzin i poddanego oddziaływaniu napięcia przemiennego 50 Hz [2]. Ilość ładunku w objętości polimeru określono na podstawie analizy odpowiedzi próbki na impulsy promienia laserowego wyzwalanego co 1 sekundę w kolejnych momentach fazowych 17-tu okresów sinusoidy napięcia przemiennego. Okazało się, że ładunek przestrzenny nadaje za zmianą napięcia przyłożonego do próbki zarówno nowej, jak i starzonej przez 24 godziny. Nie potwierdzono proponowanej w pewnych pracach hipotezy o istnieniu nieskompensowanego ładunku przy przejściu napięcia przez zero, wynikającego z wolnozmiennych procesów polaryzacji ładunku w próbce [3].

W układach z polem niejednostajnym obserwuje się jednak zjawiska, wskazujące jednoznacznie na istnienie ładunku w obszarze przyelektrodowym po wyłączeniu napięcia lub w czasie trwania niewielkiej amplitudy napięcia przemiennego. Przykładowo w otoczeniu elektrody igłowej powstaje drzewko w następstwie zwarcia elektrod ładowanych napięciem stałym [4]. Również obserwacje rozwoju drzewienia elektrycznego przy uderzeniach łączeniowych nałożonych na napięcie przemienne (napięcie skojarzone) wskazują na przyrost kanałów drzewka w czasie trwania niewielkiej składowej przemiennego po zaniku oscylacji łączeniowych [5]. Podkreśla się również spostrzeżenia pracowników energetyki o często występujących przebiciach izolacji polimerowej kabli sieci rozdzielczych 15 kV, w czasie burzy lub po jej przejściu, szczególnie w sieciach z izolowanym punktem zerowym [6], [7]. Na podstawie powyższych

doświadczeń i obserwacji można upatrywać przyczyny kumulacji naprężeń elektrycznych w zmianie rozkładu ładunku, który niestety jak na razie nie jest mierzalny w stanach przejściowych bezpośrednimi metodami pomiarowymi.

Ładunek pozostający w obszarach przyelektrodowych zostaje najprawdopodobniej wprowadzany wskutek wyładowań niezupełnych (wnz), których poziom jest związany z szybkością narastania napięcia. Badania porównawcze charakterystyk wnz przy napięciu trójkątnym i sinusoidalnym przedstawiono w pracy [8]. Przy przejściu sinusoidy napięcia przez zero następuje krótkotrwała intensyfikacja wnz. Ładunek pułpkowany we wtrącinie w czasie wnz ogranicza pole elektryczne i prowadzi do wygaszania wnz. Kolejne wyładowanie jest możliwe dopiero po przejściu ładunku dalej od elektrody. Odległość tę wyznaczają obszary wyładowań elektroluminescencyjnych lub długości drzewek zwarciovych powstałych po uprzednim naładowaniu próbki napięciem stałym.



Rys. 1 Poziom ładunku w $\mu\text{C}/\text{cm}^3$ występującego przy elektrodach próbki płaskiej dla różnych rodzajów polietylenu, ZB – zmiana biegunowości, opracowanie własne na podstawie [1]

Pułpkiowanie ładunku w folii polietylenowej jest związane z rodzajem polietylenu i jego budową chemiczną [1], [9]. W trakcie ładowania próbki płaskiej napięciem stałym powstaje heteroładunek o największych wartościach w warstwie przyelektrodowej (rys. 1). Natomiast w obszarze nieznacznie oddalonym od elektrod pojawiają się ładunki indukowane wytwarzające pole o kierunku przeciwnym do pola wywołującego polaryzację.

W przypadku oddziaływania napięcia probierczego przemiennego lub skojarzonego może się pojawić nieskompensowany ładunek przestrzenny wskutek np. wnz, we wtrącinach gazowych. Sytuacja taka może mieć miejsce w czasie inkubacji, a potem rozwoju drzewienia w izolacji kablowej. Po powstaniu pierwszych gałęzi drzewka istnieje możliwość pułpkiowania ładunku przez powierzchnię kanału [11]. Przykładowo przy zmianie średnicy kanału z 25 μm do 400 μm napięcie przebicia maleje z 13,7 kV do 10 kV. Kanał prosty długości 3 mm i średnicy 25 μm pułpkuje ładunek 0,6 pC wytrzymując 10,3 kV, a z dodatkowym odgałęzieniem pod kątem 45° gromadzi już ładunek 1 pC przy napięciu przeskoku 12 kV. Wyniki te wskazują na możliwość pułpkiowania przez rozwinięte drzewko dużej wartości ładunku, który skutecznie podnosi wytrzymałość napięciową drzewka. Ładunek może być gromadzony dzięki pofałdowaniu powierzchni kanału wskutek wnz rozwijających się w jego wnętrzu. W pracy [11] badano także wpływ wielkości napięcia na rozkład ładunku. Okazuje się, że przy niewielkich napięciach ładunek kumuluje się przy elektrodzie ostrzowej. Dopiero przy pokonaniu progów napięciowych jest przenoszony na koniec sztucznego kanału.

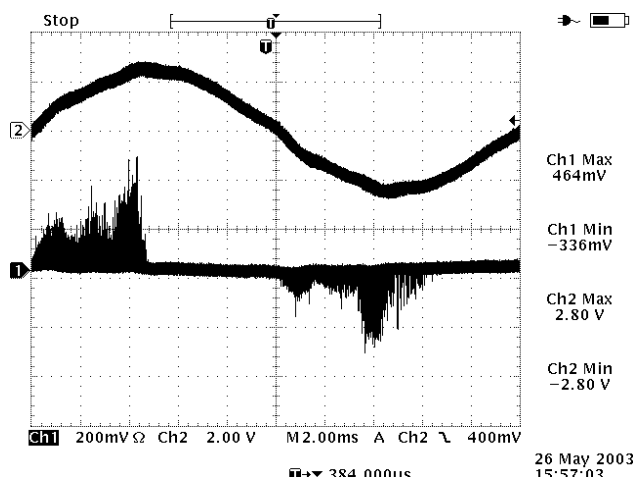
Wyniki badań i ich omówienie

W celu dokładniejszego określenia ilości i rodzaju ładunków w polimerze pozostających po oddziaływaniu napięcia przemiennego lub skojarzonego wykonano badania termicznie stymulowanej depolaryzacji (TSD) próbek folii polietylenowej o grubości 150 μm . Na podstawie przebiegu prądu depolaryzacji w funkcji temperatury obliczano całkowity ładunek zgromadzony wskutek oddziaływania wnz inicjowanych z elektrody walcowej w czasie przykładania napięcia probierczego. Dodatkowo w celu określenia dynamiki zmian ładunku na powierzchni folii rejestrowano impulsy wyładowań niepełnych w czasie uderzeń łączeniowych.

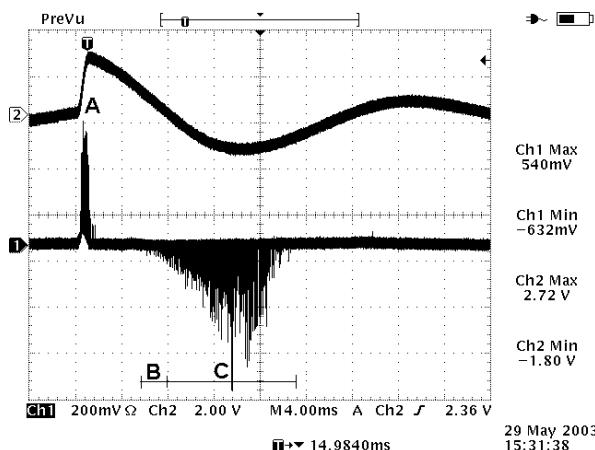
Metodykę pomiarów TSD próbek folii podano w referacie [10]. Przygotowane zestawy próbek narażano różnymi rodzajami napięć w układzie walec-płyta: przemiennym (amplituda 9 kV, czas 240 s) bądź skojarzonym (udary 600 μs / 3500 μs , wartość szczytowa 9kV nakładane na napięcie przemiennie o amplitudzie 0,9 kV lub 4 kV co 200 ms przez czas 240 s, co odpowiada przyłożeniu 1200 uderzeń łączeniowych). Oprócz próbek czystych wykonano serię badań dla powierzchni jednostronnie metalizowanej warstwą srebra. Metalizacja miała na celu zmniejszenie wnz na styku elektroda ładująca – próbka. Dodatkowo uzyskano intensyfikację wnz tylko na krańcach metalizacji i ograniczenia miejsca występowania ładunków powierzchniowych przy elektrodzie walcowej. W pozostałej, metalizowanej części folii można założyć tylko wprowadzanie ładunku przestrzennego. Zastosowanie układów o różnej intensywności wnz pozwoliło na określenie związku pomiędzy poziomem wnz, a ładunkiem pułpkiowanym w izolacji. Wykonano również niektóre termogramy w układzie próbki zwartej w celu jednoznacznego określenia znaku nieskompensowanych ładunków w próbce.

Pomiary impulsów wnz wykonano w układzie ładowania poprzez rejestrację napięcia przyłożonego do próbki oraz spadku napięcia na rezystancji 50 Ω włączanej szeregowo

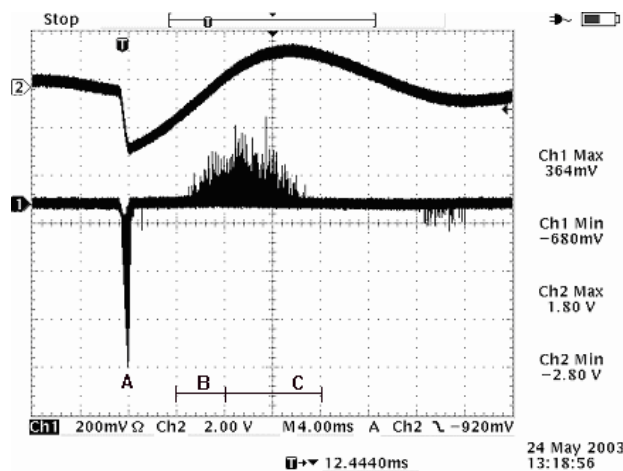
między elektrodę płaską, a uziemienie. Po przekroczeniu wartości progowej zapłonu wyładowań niepełnych pojawiają się impulsy prądowe na tle składowych: rezystancyjnej i pojemnościowej prądu próbki.



Rys. 2. Impulsy wnz w folii niemetalizowanej przy napięciu przemiennym o amplitudzie 9 kV (czas rejestracji 10 sekund)

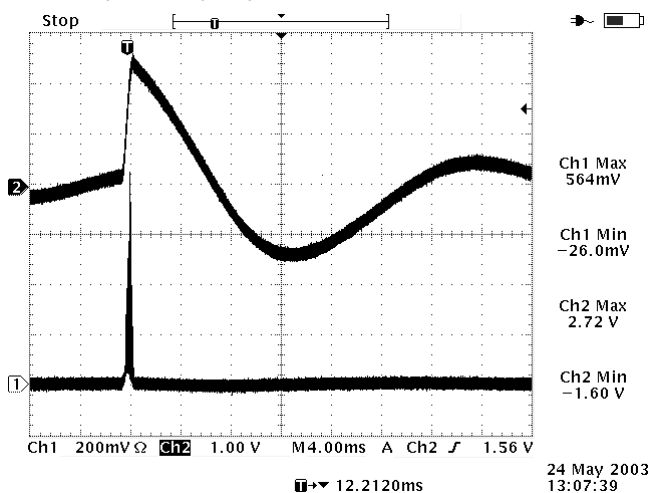


Rys. 3. Impulsy wyładowań przy napięciu skojarzonym dodatnim (wartość szczytowa udaru 9 kV), folia niemetalizowana, czas rejestracji wnz - 10 sekund, A – wnz na czole udaru, B – wyładowania wsteczne, C – wnz w stanie przejściowym



Rys. 4. Impulsy wyładowań przy napięciu skojarzonym ujemnym (wartość szczytowa udaru – 9 kV, folia niemetalizowana, czas rejestracji wnz - 10 sekund, A – wnz na czole udaru, B – wyładowania wsteczne, C – wnz w stanie przejściowym

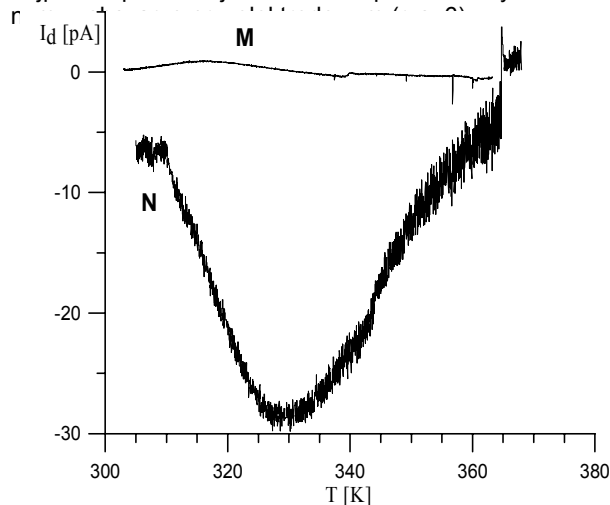
Przy napięciu przemiennym (rys. 2) stwierdzono większą amplitudę wyładowań w czasie półfali dodatniej w zakresie kątów fazowych $0+\pi/2$ w stosunku do półfali ujemnej (rys. 2). Większa ilość wyładowań w czasie biegunowości dodatniej na elektrodzie walcowej wynika z niższej wytrzymałości powietrza w warstwie powierzchniowej w stosunku do biegunowości ujemnej. W czasie wyładowań niepełnych przy elektrodzie walcowej na folii ostatecznie kumuluje się ładunek ujemny częściowo rekombinowany pozostałym ładunkiem dodatnim po przejściu półfali dodatniej. Mimo mniejszej intensywności wzn w czasie półfali ujemnej, elektrony są najprawdopodobniej głębiej pułapkowane tworząc ładunek przestrzenny wykazywany po ładowaniu w procesie termicznej depolaryzacji.



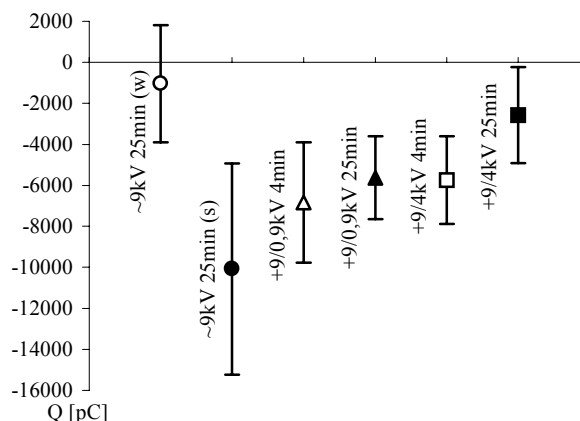
Rys. 5. Przykład zmniejszenia intensywności wzn dla folii metalizowanej, napięcie skojarzone dodatnie, czas rejestracji wzn – 10 sekund

Całkowicie odmienne zjawiska zachodzą w obszarze przyelektrodowym w czasie napięcia skojarzonego kiedy rejestrowano prąd pojemnościowy w czasie czoła udaru łączeniowego z impulsami wzn, a następnie szereg wyładowań o większej amplitudzie i intensywności w czasie trwania oscylacyjnego stanu przejściowego. Przy składowej przemienniej o napięciu 0,9 kV następującej po stanie przejściowym nie obserwowano impulsów wzn. Można wyróżnić tu trzy etapy procesu ładowania i relaksacji ładunku w próbce. Przykładowo w czasie narastania udaru o biegunowości dodatniej ma miejsce silne ładowanie powierzchni folii jonami dodatnimi (etap A). Duży potencjał pochodzący od tego ładunku powoduje jeszcze przed przejściem napięcia przez zero wyładowania wsteczne (etap B, rys. 3). Następnie ma miejsce częściowe rozładowanie folii, a następnie naładowanie elektronami w czasie stanu przejściowego o biegunowości ujemnej (etap C, rys. 3). Podobne zjawiska, tyle, że o przeciwnej biegunowości i mniejszej intensywności zachodzą w czasie przykładania napięcia skojarzonego ujemnego (rys. 4). Występują tu także charakterystyczne wyładowania wsteczne przed przejściem napięcia przez zero. Zastosowanie jednostronnej metalizacji folii zasadniczo ograniczyło poziom wzn w czasie stanu przejściowego po udarze łączeniowym (rys. 5). Natomiast przykładowe pomiary TSD pokazane na rysunku 6 wskazują na niewielki poziom prądu depolaryzacji w stosunku do folii czystej wskazujący na zasadniczy wkład okresu przejściowego po przyłożeniu udaru na ładowanie folii. Dla folii metalizowanych stwierdzono także większą wartość ładunku pochodzącą od udarów ujemnych, co potwierdza łatwość wprowadzania elektronów w obszar przyelektrodowy [10].

Po wykonaniu ładowania próbki napięciem skojarzonym lub przemiennym rejestrowano prąd TSD i na podstawie jego przebiegu określano ilość pułapkowanego ładunku w próbce oraz energię aktywacji. W większości przypadków otrzymywano wyraźny jeden pik relaksacyjny związany najprawdopodobniej z ładunkiem przestrzennym indukowa-



Rys. 6. Przykładowe porównanie termogramów próbek metalizowanej (M) i niemetalizowanej (N) poddanych ładowaniu napięciem skojarzonym dodatnim



Rys. 7. Wartość średnia wypadkowego ładunku i odchylenie od wartości średniej po narażeniu napięciem przemiennym i skojarzonym dla próbek folii czystej, s – nagłe wyłączenie napięcia, w – stopniowe zmniejszenie napięcia

Na rysunku 7 zestawiono odpowiednio dla napięcia przemiennego i skojarzonego charakterystyczne zależności prądu depolaryzacji w funkcji temperatury (nagrzewanie próbki z prędkością 5 K/min) oraz obliczone przez numeryczne całkowanie przebiegu prądu w czasie średnie wartości ładunku wraz z odchyleniem standardowym z 5-ciu badanych próbek folii czystej. Największy prąd depolaryzacji występuje w próbkach narażanych napięciem przemiennym z nagłym odłączeniem napięcia (rys. 7), które w końcowej fazie ładowania próbki generuje przepięcie w obwodzie ładowania polegające na nagłym ucięciu napięcia probierczego od wartości zależnej od fazy napięcia do zera.

Wykluczając nagłe zmniejszenie napięcia przemiennego, największy ładunek pułapkowany w polietylenie występuje w próbkach niemetalizowanych przy napięciu skojarzonym dodatnim. Ujemny znak ładunku wskazuje na znaczną koncentrację elektronów w obszarze przyelektrodowym, najprawdopodobniej w miejscach

znacznego natężenia pola elektrycznego, czyli przy krawędzi elektrody walcowej. Przepuszczalnie w obszarach znacznego pola elektrycznego ma miejsce intensywna generacja ładunków, które są następnie transportowane w pobliżu obszaru przyelektrodowego, gdzie tworzy się rodzaj warstwy zaporowej utrudniającej powrót elektronów do elektrody. Wzrost składowej przemiennnej od 1 kV do 4 kV powoduje tylko 50% wzrost ładunku folii. Wynika stąd ważny wniosek, że za powstawanie ładunku zasadniczo odpowiada stan przejściowy towarzyszący udarowi łączeniowemu. Należy nadmienić, że ograniczenie wnz po udarze poprzez metalizację folii powoduje radykalne zmniejszenie ładunku pułapkowanego, który nie przekracza +500 pC dla napięć skojarzonych dodatnich i -1000 pC dla ujemnych.

W foliach czystych przy udarach ujemnych ze względu na mniejszą aktywność wnz w stanie przejściowym (etap B, rys. 4) ilość wprowadzanego ładunku do folii jest zaskakująco niska – trzy razy mniejsza w stosunku do napięcia skojarzonego dodatniego i dwa razy w porównaniu do napięcia przemiennego o amplitudzie 9 kV równej wartości szczytowej przepięcia. Przepuszcza się, że w czasie dodatnich udarów występuje w stanie przejściowym mechanizm intensywnej jonizacji gazu w warstwie przyelektrodowej z równoczesnym transportem elektronów w pobliże elektrody lub silną polaryzacją prowadzącą do powstania ujemnego ładunku przestrzennego. Ładunek ten w czasie trwania składowej przemiennnej zwiększa poziom pola elektrycznego, co prowadzi do przyspieszonej degradacji. Degradacja wynika z silnych wyładowań wstecznych przy powtarzających się dodatnich udarach i półfalach napięcia o odpowiednio wysokiej amplitudzie. Tłumaczy to dobrze doświadczenia wskazujące na intensyfikację wyładowań niezupełnych w czasie dodatniej półfali napięcia w czasie inkubacji i rozwoju drzewienia [5].

Wnioski

1. Metalizacja dielektryka w miejscu styku z elektrodą zmniejsza poziom wnz w stanie przejściowym po udarze. Wnz występujące na czole udaru łączeniowego mają podobną amplitudę niezależnie od biegunowości udaru i przygotowania próbki folii.
2. Ze względu na niewielki poziom wnz w stanie przejściowym dla folii metalizowanej nie obserwuje się wyładowań wstecznych. Świadczy to także o niewielkim ładunku przestrzennym wprowadzanym do obszaru przyelektrodowego. W przypadku folii nie metalizowanej tworzy się w czasie udaru łączeniowego znaczny ładunek powierzchniowy powodujący wyładowania wsteczne, jak również intensyfikację wyładowań w stanie przejściowym po udarze.
3. Analiza wnz pozwala określić przebieg zjawisk towarzyszących ładowaniu polimeru w obszarze przyelektrodowym. Wyniki wymienionej analizy są

zgodne z uzyskanymi pomiarami TSD próbek folii polietylenowej.

4. Ujemny ładunek przestrzenny w polietylenie gromadzi się głównie wskutek kumulowanego działania przepięć o biegunowości dodatniej i może powodować wyładowania wsteczne w czasie składowej przejściowej, a nawet przemiennnej mniejszej od napięcia progowego.
5. Otrzymane wyniki pomiarów mogą być pomocne w określeniu procesów towarzyszących ładowaniu miejsc niejednorodności w kablach elektroenergetycznych poddawanych w eksploatacji narażeniom napięciem skojarzonym odwzorowującym przebieg napięcia w linii kablowej przy lokalizacji odcinkowej. Podobny charakter wnz otrzymuje się także w badaniach rozwoju drzewienia elektrycznego w układzie elektroda igłowa – elektroda płaska w polietylenie sieciowym.

LITERATURA

- [1] Wang X., i inni, Space-charge characteristics in polyethylene, *J. Appl. Phys.*, vol. 84, no 3, 1998
- [2] Ho Y. F. F., Chen G. i inni, Space charge measurements in XLPE insulation under 50 Hz A.C. electric stress, *Dielectric Materials, Measurements and Applications, Conference Publication No. 473*, IEE 2000, 68 – 73
- [3] Tanaka T., Charge transfer and tree initiation in polyethylene subjected to ac voltage stress, *IEEE Trans. on EI*, vol. 27, no. 3, 1992, 424-431
- [4] Kawamura H., Nawata M., DC electrical treeing phenomena and space charge, *IEEE Trans. on DEI*, vol. 5, no. 5, 1998, 741 – 747
- [5] Olesz M., Rozwój drzewienia elektrycznego przy udarach łączeniowych nałożonych na napięcie przemiennie, *Materiały IV Ogólnopolskiego Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć 1998*, Poznań – Kiekrz
- [6] Jaglarz A., Gniadek Z., Wybrane zagadnienia eksploatacyjne w zakresie izolacji SN w ZET S.A., *Materiały VIII Sympozjum „Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia”*, EU1'01, Zakopane 2001
- [7] Hartlein R. A., Harper V. S., Harry Ng., Effects of Voltage Surges on Extruded Dielectric Cable Life Project Update, *IEEE Trans. on PD*, 1994, Vol.9, No. 2, 611 – 619
- [8] Suwarno, Suzuki Y. i inni, Effects of frequency and applied voltage on electrical treeing induced discharges, *Electrical Engineering in Japan*, vol. 118, no 3, 1997
- [9] Aida F., Wang. S. i inni, Study of the mechanism of space charge formation in polyethylene, *J. Electrostatics* 42 (1997), 3 – 15
- [10] Olesz M., Prądy termicznie stymulowane w foliach polimerowych poddanych starzeniu elektrycznemu, *VIII Sympozjum, Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia*, Zakopane 2001
- [11] Aucland D., Kabir S., Varlow B., Space-charge and Breakdown in Artificial Tree Channels, *VI Intern. Conf. on DMMA*, 1992, pp. 197-200

Autor: dr inż. Marek Olesz, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych, ul. Własna Strzecha 18A, 80-952 Gdańsk, E-mail: molesz@elv.pg.gda.pl