

**Barbara Górnicka, Lech Górecki**  
Instytut Elektrotechniki, Wrocław

## **BADANIA WPŁYWU ZALEŻNOŚCI TRWAŁOŚCI ORAZ NAPIĘCIA ZAPŁONU WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH IZOLACJI PRZY NAPIĘCIU IMPULSOWYM OD JEJ WYMIARÓW**

### **INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE INTERTURN INSULATION SIZE ON THE PARTIAL DISCHARGES INCEPTION VOLTAGE AND LIFETIME**

**Abstract:** The phenomena that appear in electrical motors insulation due to pulse voltage coming from inverters can depend on both the pulse voltage parameters as dimensions and characteristics of insulation. The result of investigation of dielectric properties as well durability and PDIV of various models of turn insulation (the twisted pairs and parallel wound helical coils with different number of coils) are presented in this paper. The “size effect” observed by group of Japan researchers under very short pulse duration have been not confirmed in our results under other pulse voltage. Because the size effect could be important for inverter-fed motors, the testing should be performed under pulse voltage that followed the real conditions. Probably the existing standard IEC 62068-1 specifies too extensive parameters of test pulse voltage.

#### **1. Wprowadzenie**

Naukowcy z Nagoya University w serii artykułów [1-7] opisują zjawiska zachodzące w izolacji zwojowej pod wpływem napięcia impulsowego przedstawiając wyniki badań napięcia zapłonu wyładowań niezupełnych PDIV (Partial Discharge Inception Voltage) oraz przebiega na modelach uzwojeń w postaci skrętek oraz spiralek o różnych długościach nawiniętych z podwójnego przewodu. Ponieważ jest liniowa zależność między liczbą zwoi, a długością styku zwoi, badano tzw. efekt wymiarowy. Stosowano impulsowe napięcie probiercze:

- częstotliwość 6-60 Hz, czas trwania impulsu 1  $\mu$ s [2, 5, 6],
- częstotliwość 0-5 kHz czas trwania impulsu 10  $\mu$ s [1, 7],
- częstotliwość 5-10 kHz czas trwania impulsu 10  $\mu$ s [3, 4], czas narostu wynosił 20-900 ns.

Stwierdzono tzw. „efekt wymiarowy” polegający na obniżaniu się PDIV przy wzroście długości narażanego przewodu [5]. Efekt ten wyjaśniono tym, że przy małej liczbie szczelin powietrznych (krótkie spiralki) jest niskie prawdopodobieństwo wytworzenia elektronów zapoczątkowujących wyładowanie. Drugą przyczyną powstawania efektu wymiarowego według autorów może być zwiększenie prawdopodobieństwa wystąpienia słabych miejsc w próbkach o większej liczbie zwojów. Stwierdzono również, że przy wzroście częstotliwości PDIV spada [2].

Wydaje się, że stosowane impulsowe napięcie probiercze o niskiej częstotliwości 6-60 Hz i małej szerokości impulsu 1  $\mu$ s znacznie odbiega od napięcia impulsowego z przekształtnika tak, że mogą tu występować zupełnie odmienne zjawiska.

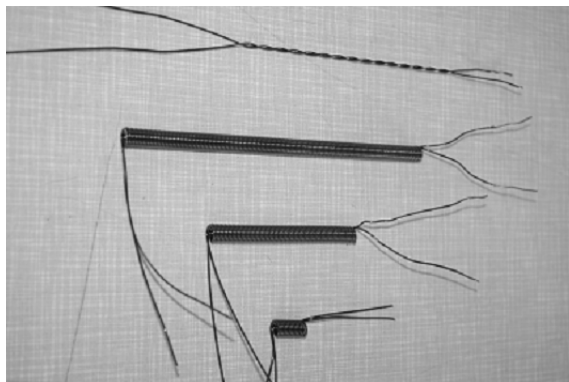
Ponieważ z badań prowadzonych do tej pory w Instytucie Elektrotechniki wynika, że przy wzroście częstotliwości PDIV nieco rośnie, a nie spada [8-10], co może być związane z tym, że czas rozwoju wyładowań jest porównywalny lub mniejszy z czasem trwania impulsu napięciowego, postanowiono sprawdzić również czy wystąpi efekt wymiarowy. Otrzymany przez japońskich badaczy efekt może mieć związek z mocą zastosowanego impulsowego napięcia, tzn. z czasem trwania impulsu w okresie. W przypadku występowania efektu wymiarowego w praktyce mogłoby być to istotne, np. w silnikach nawijanych podwójnym przewodem.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań parametrów elektrycznych modeli izolacji międzyzwojowej w postaci skrętek oraz spiralek nawiniętych podwójnym drutem w funkcji częstotliwości oraz napięcia zapłonu wyładowań niezupełnych i trwałości izolacji modeli przy napięciu impulsowym przy różnych parametrach napięcia impulsowego.

## 2. Opis badanej izolacji zwojowej

Badano przewód dwuwarstwowy emaliowany lakierem poliesterimid-poliamidimid o średnicy 1,00 mm. Badania wykonano na następujących modelach izolacji międzyzwojowej (Rys. 1):

- spiralki („helical coils”) nawinięte podwójnym przewodem na trzpieniu o średnicy 6,3 mm (podobny trzpień stosuje się przy pomiarze siły wiążącej lakieru) o liczbie zwoi podwójnych: krótka 10 zwoi (21 mm), średnia 37 zwoi (77 mm), długa 88 zwoi (179 mm).
- skrętki („twisted pairs”) z przewodu wg PN-EN 60851-5.



Rys. 1. Badane modele izolacji międzyzwojowej – skrętka i spiralki o różnej długości

## 3. Wykonane badania właściwości dielektrycznych

Zmierzono charakterystyki częstotliwościowe przy napięciu sinusoidalnym (pomiędzy dwoma nawiniętymi równolegle przewodami) w zakresie 50 Hz – 100 kHz indukcyjności  $L$ , reaktancji  $X$ , rezystancji  $R$  oraz pojemności  $C$  na spiralkach o różnej długości i skrętkach. Do pomiarów zastosowano mostek HP 4284A, napięcie pomiarowe 10 V.

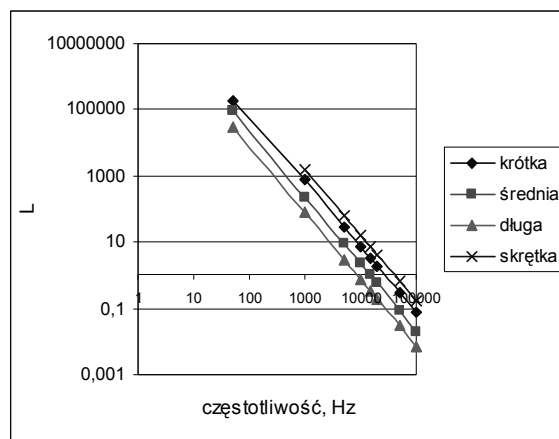
Za pomocą oscyloskopu zmierzono napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych na spiralkach przy napięciu impulsowym o częstotliwości 20 kHz. Zastosowano oscyloskop firmy TEKTRONIX, typu TDS 3032B, szerokość pasma 300 MHz, wyposażony w dwie sondy: P5210 – wysokonapięciową sondę różnicową oraz TCP 202 – sondę prądową. Jako źródło napięcia impulsowego zastosowano generator impulsów prostokątnych bipolarnych 50% o czasie narostu impulsu 0,7  $\mu$ s. Napięcie podnoszono powoli, aż do napięcia zaobserwowania szumów na fali prądowej w obszarze narostu napięcia, świadczących o zapłonie wyładowań niezupełnych.

Ponadto wykonano pomiary trwałości modeli w postaci spiralek o różnej długości oraz skrętek przy napięciu impulsowym prostokątnym o częstotliwości 20 kHz i amplitudach 1 kV, 1,2 kV jak również przy napięciu impulsowym o częstotliwości 2 kHz i amplitudzie 1,5 kV. Źródłem napięcia był ww. generator impulsów prostokątnych bipolarnych. Badania wykonano na 5. próbkach.

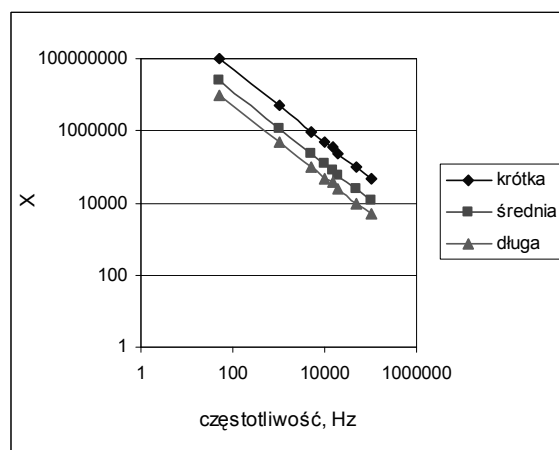
## 4. Wyniki badań

### 4.1 Charakterystyki częstotliwościowe parametrów dielektrycznych badanych modeli

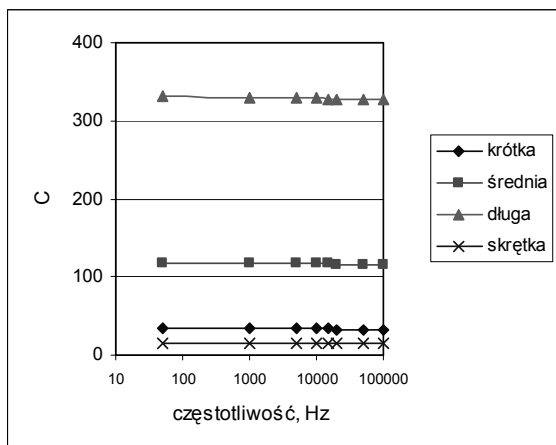
Charakterystyki częstotliwościowe parametrów dielektrycznych badanych modeli podano na rys. 2-5.



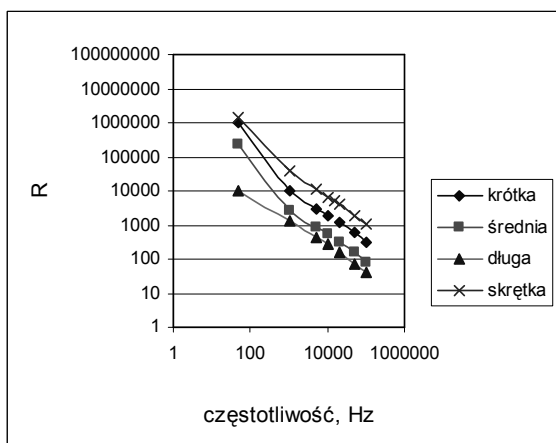
Rys. 2. Indukcyjność w [H] spiralek o różnej długości w funkcji częstotliwości



Rys. 3. Reaktancja w [ohm] spiralek o różnej długości w funkcji częstotliwości



Rys. 4. Pojemność w [pF] spiralek o różnej długości w funkcji częstotliwości

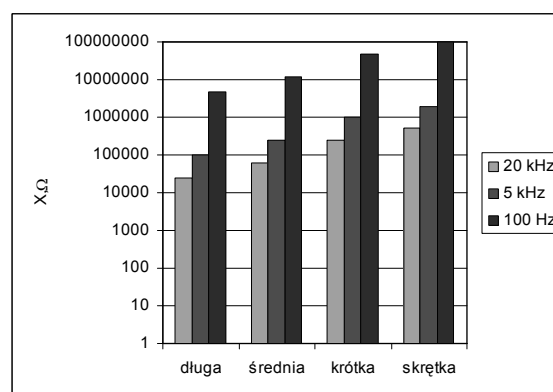


Rys. 5. Rezystancja w [ohm] spiralek o różnej długości w funkcji częstotliwości

Wysoka indukcyjność oraz reaktancja spiralek (rys. 2 i 3) wynika z tego, że napięcie przykładano między dwa równoległe przewody, czyli mierzono parametry izolacji pomiędzy dwoma równoległymi przewodami. Spiralki krótkie mają indukcyjności oraz reaktancje około 10 razy wyższe niż długie i 3 razy wyższe niż średnie, czyli jest pewna odwrotna proporcjonalność do liczby zwojów. Zarówno indukcyjność jak i reaktancja silnie spada ze wzrostem częstotliwości od 50 Hz do 20 kHz – o 2 rzędy, co jest spowodowane wzrostem pojemnościowego charakteru izolacji. Najkrótsza cewka wykazuje najmniejszą pojemność, w przybliżeniu 3,5-krotnie niższą niż średnia i 10-krotnie niższą niż długa (rys. 4). Pojemność jest więc proporcjonalna do długości przewodu, czyli do liczby zwoi, których jest 3,7 oraz 8,8 razy więcej odpowiednio dla cewki średniej i długiej w stosunku do spiralki krótkiej. Pojemność w funkcji częstotliwości prawie się nie zmienia,

osiągając przy 100 kHz wartość tylko o 1% niższą niż przy 50 Hz, co świadczy o braku zmian współczynnika przenikalności elektrycznej przy wzroście częstotliwości, a co za tym idzie o dominującej roli powietrza w układzie. Rezystancja dla badanych modeli jest o 2 rzędy niższa niż reaktancja (rys. 5 i 3), co świadczy o tym, że o impedancji wypadkowej decyduje reaktancja pojemnościowa.

Na rysunku 6 podano parametry badanych spiralek przy częstotliwości 20 kHz, 5 kHz oraz 100 Hz. Przy 20 kHz model w postaci skrętki wykazuje impedancję 20 razy wyższą niż krótka spiralka i 200 razy wyższą niż spiralka długa. Spośród badanych modeli najwyższą reaktancję (rys. 6), czyli najniższe prądy upływu, wykazuje skrętka.

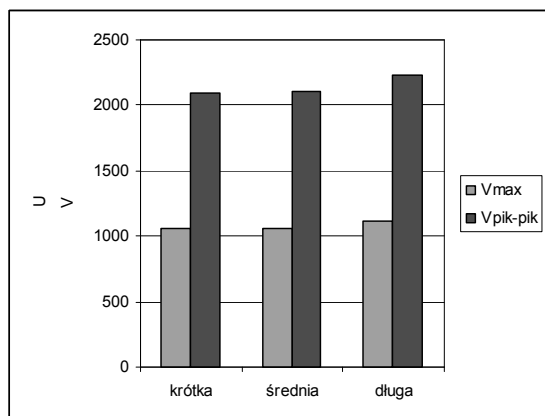


Rys. 6. Reaktancja spiralek o różnej długości oraz skrętki przy różnych częstotliwościach

#### 4.2 Wyniki badań napięcia zapłonu wyładowań niepełnych

Obserwowano rozwój wyładowań niepełnych przy wzroście napięcia impulsowego na różnych modelach. Wyładowania rozwijają się od lokalnych słabych, poprzez intensywne nierównomierne, równomierne obejmujące całą spiralkę do nierównomiernych. Na spiralkach zwarcie następuje w miejscu zapłonu najsilniejszych wyładowań. W przypadku skrętek charakterystyczne jest, że zwykle przebiecie następuje w innym miejscu niż to, w którym obserwuje się silne punktowe wyładowanie tuż przed przebieciem.

Wartości maksymalne oraz pik-pik napięcia zapłonu wyładowań niepełnych (PDIV) na spiralkach przy napięciu impulsowym o częstotliwości 20 kHz określone za pomocą oscyloskopu przedstawiono na wykresie 9.



Rys. 7. Napięcie zapłonu PDIV spiralek o różnej długości, wartość maksymalna i pik-pik

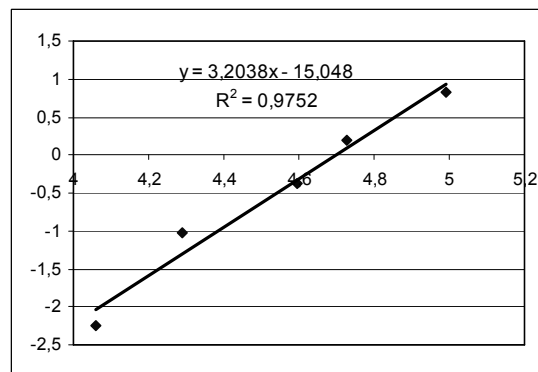
Wartość napięcia pik-pik jest dwukrotnie wyższa od napięcia maksymalnego. Jak widać, wartość PDIV praktycznie nie zależy od długości spiralki. Dla spiralki średniej i krótkiej jest identyczna; dla długiej – nieco wyższa – o około 5%. Ten nieznaczny wzrost może być spowodowany występowaniem największych prądów upływu w spiralcie długiej. Nie potwierdzono więc opisywanego w literaturze [4, 8, 9] „efektu wymiarowego”. Jest wręcz odwrotnie – dla spiralki długiej napięcie jest nieznacznie wyższe. Opisywany w literaturze efekt wymiarowy [5] był obserwowany przy napięciu impulsowym o częstotliwości 6-60 Hz i o czasie trwania impulsu 1  $\mu$ s, czyli o niezwykle małym współczynniku wypełnienia, czyli stosunku czasu trwania impulsu do okresu impulsowania, który wynosił 0,006%.

Norma IEC 62068-1 *Electrical insulation systems. Electrical stresses produced by repetitive impulses Part 1: General method of evaluation of electrical endurance* zaleca impulsy o częstotliwości od 1 kHz do 20 kHz i czasie trwania od 0,08  $\mu$ s do 25  $\mu$ s. W naszych badaniach (podobnie jak firma Phelph Dodge, która pierwsza zastosowała generator symulujący narażenia pochodzące od przekształtników) stosujemy generator impulsów prostokątnych o współczynniku wypełnienia 50%, który lepiej odtwarza warunki rzeczywiste.

### 4.3 Wyniki badań trwałości napięciem impulsowym

Na rys. 8 pokazano przykładowy wykres prawdopodobieństwa Weibulla – dla trwałości modeli przy napięciu impulsowym 1,5 kV/2 kHz. Wyniki pomiarów trwałości modeli

(przy założeniu rozkładu Weibulla) w postaci spiralek o różnej długości oraz skrętek przy napięciu impulsowym prostokątnym o częstotliwości 20 kHz i amplitudach 1 kV, 1,2 kV jak również przy napięciu impulsowym o częstotliwości 2 kHz i amplitudach 1,5 kV przedstawiono w tabelicy 1.



Rys. 8. Wykres prawdopodobieństwa Weibulla dla trwałości spiralki krótkiej przy napięciu impulsowym 1,5kV/2kHz

Tablica 1 Trwałość (w minutach) modeli w postaci spiralek o różnej długości oraz skrętek przy napięciu impulsowym 1 kV/20 kHz, 1,2 kV/20 kHz, 1,5 kV/20 kHz oraz 1,5 kV/2 kHz

	krótka	średnia	długa	skrętka
1 kV/20kHz	29	40	38	47
1,2 kV/20kHz	4	8	8	20
1,5 kV/2kHz	110	107	125	169

Trwałości przy różnych parametrach napięcia impulsowego dla spiralki średniej i krótkiej są zbliżone, spiralka krótka natomiast wykazuje najniższą trwałość. Nie stwierdzono więc również efektu wymiarowego, tzn. obniżania trwałości przy wzroście ilości zwojów spiralki. Może mieć to związek z nieco wyższym napięciem zapłonu spiralki długiej oraz najmniejszą jej impedancją (większymi stratami).

## 5. Podsumowanie

Badane modele izolacji zwojowej w sposób uproszczony odzwierciedlają warunki rzeczywistego nieimpregnowanego układu izolacyjnego. Badania wstępne parametrów dielektrycznych modeli przy napięciu sinusoidalnym w funkcji częstotliwości wykazały silny spadek w impedancji. W badanych układach dielektryk-powietrze impedancja ma charakter po-

jemnościowy i jest odwrotnie proporcjonalna do liczby zwoi (zmiany  $\varepsilon'$  i  $\varepsilon''$  przy wzroście częstotliwości są nieznaczne).

Pomiary napięcia zapłonu wyładowań niezpełnych oraz trwałości izolacji modeli przy napięciu impulsowym nie potwierdziły opisywanego przez grupę japońskich badaczy z Nagoya University efektu wymiarowego, tzn. wprost proporcjonalnej zależności napięcia zapłonu wyładowań niezpełnych od długości modelu izolacji międzyzwojowej (spiralki). Badania wykonane w instytucie wykazały, że zarówno napięcia zapłonu, jak i trwałości nie zmniejszają się przy wzroście długości spiralki. Uzyskane rozbieżności prawdopodobnie spowodowane są zastosowaniem różnych parametrów probierczego napięcia impulsowego - w instytucie stosuje się impulsy napięciowe prostokątne o współczynniku wypełnienia 50%, natomiast w Nagoya University 0,006% - 10%. Przy tak krótkich impulsach o niskiej częstotliwości rozwój wyładowań może być utrudniony, stąd stwierdzony efekt wymiarowy. Narażenia probiercze powinny być więc ściśle znormalizowane i dobrze odwzorowujące warunki rzeczywiste. W przeciwnym przypadku badania na takich samych modelach izolacji prowadzi do zupełnie innych wniosków.

## 6. Literatura

- [1]. Morikawa M., Hayakawa N., Okubo H., *Partial Discharge Inception and Degradation Characteristics of Inverter-Fed Motor Sample under Surge Voltage Condition*, 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 426-429
- [2]. Hayakawa N., Okubo H., *Partial discharge characteristics of inverter-fed motor coil samples under ac and surge voltage conditions*, Electrical Insulation Magazine, IEEE, Volume 21, Issue 1, Jan.-Feb. 2005, pp. 5 – 10
- [3]. Inuzuka K., Inano H., Hayakawa N., Hirose T., Hamaguchi M., Okubo H., *Partial Discharge Characteristics of Nanocomposite Enameled Wire for Inverter-Fed Motor*, 2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 594-597
- [4]. Hayakawa N., Inano H., Inuzuka K., Morikawa M., Okubo H., *Partial Discharge Propagation and Degradation Characteristics of Magnet Wire for Inverter-Fed Motor under Surge Voltage Application*, 2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p.p. 565-568
- [5]. Hayakawa N., Morikawa M., Okubo H., *Partial Discharge Inception and Propagation Characteristics of Magnet Wire for Inverter-fed Motor un-*

*der Surge Voltage Application*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 1; February 2007, pp. 39-45

- [6]. Okubo H., Lu Y., Hayakawa N., *Partial Discharge Characteristics of inverter-fed motor coil samples under ac and surge voltage conditions*, 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p.p. 589-592
- [7]. Kimura K., Ushirone S., Fukushima T., Ohtsuka S., Hikita M., *Partial Discharge Inception Voltage of Twisted Pair Samples under Long-Time Repetitive Bipolar Impulses*, Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN USA, 19-22 September 2004, p.p. 192-195
- [8]. Górecki L., Górnicka B., *Degradacja izolacji międzyzwojowej silników pod wpływem narażeń pochodzących od przekształtników*, IV Konferencja Naukowa Postępy, Jamrozowa Polana 2000, Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Polit. Wrocław. nr 37, seria: konferencje nr 12 s. 37-40
- [9]. Górnicka B., Górecki L., *Degradation of winding insulation due to power electronics devices in induction motors*, Przegląd Elektrotechniczny AP-TADM'2001– Zeszyt Specjalny, s. 349-351
- [10]. Górnicka B., Górecki L., Czołowska B., Zawadzka J.: *Określenie napięcia zapłonu wyładowań koronowych izolacji międzyzwojowej przy zasilaniu napięciem impulsowym*, Komel 2005, Maszyny elektryczne – Zeszyty problemowe Nr 72/2005, s. 29-32