

Tadeusz GLINKA

Barbara KULESZ

Zakład Inżynierii Elektrycznej w Transporcie

BADANIA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W IZOLACJI ZWOJOWEJ SILNIKÓW INDUKCYJNYCH ZASILANYCH Z FALOWNIKÓW PWM

Streszczenie. Przy zasilaniu maszyn elektrycznych z falowników tranzystorowych PWM o częstotliwości kluczowania rzędu kilku kHz występuje, przy każdym załączeniu i wyłączeniu klucza, duża szybkość (stromość) zmiany napięcia na uzwojeniu. W układzie: falownik, kabel zasilający, silnik, występują zjawiska falowe. W pierwszej chwili po załączeniu klucza rozkład napięcia na uzwojeniu nie jest równomierny, prawie całe napięcie występuje na pierwszych zwojach. Tak duże napięcie pojawiające się na izolacji zwojowej z częstotliwością kluczowania stwarza zagrożenie występowania wyładowań niezupełnych w izolacji zwojowej. Wyładowania niezupełne w izolacji zwojowej są niekorzystne, gdyż stopniowo zmniejszają jej właściwości dielektryczne i wzbudzają fale elektromagnetyczne zakłócające pracę innych urządzeń elektrycznych. W artykule wyjaśniono przyczynę powstawania wyładowań niezupełnych w izolacji zwojowej, zaproponowano metodykę ich pomiaru oraz pokazano wyniki przeprowadzonych testów.

TESTING FOR PARTIAL DISCHARGES IN THE COIL INSULATION OF THE INDUCTION MOTORS FED FROM PWM-INVERTERS

Summary. When electric machines are fed from transistor inverters with the switching frequencies of several kHz, each switch-over produces a sudden fast voltage rise at the winding. The wave effect occurs in the system consisting of inverter, supply line and motor. At the switching instance, the voltage distribution is uneven, almost all the voltage is present in the first coils of the winding. Such a big voltage overshoot occurring in the coil insulation at the switching frequency rate, poses a serious threat of the generation of partial discharges in the coil insulation. The partial discharges in the coil insulation have an adverse effect on its dielectric properties and excite the electromagnetic waves which may interfere with the operation of other electrical devices. The paper explains the reasons for the formation of the partial discharges in the coil insulation, proposes some measurement methods and gives partial discharge test results.

1. WSTĘP

Wyładowania niezupełne są to lokalne wyładowania elektryczne występujące w układzie izolacyjnym między elektrodami będącymi pod napięciem [1]. Badania wyładowań niezupełnych przeprowadzane są zarówno przy próbach odbiorczych nowych urządzeń elektrycznych (np. w transformatorach energetycznych blokowych), jak i w badaniach diagnostycznych transformatorów i maszyn elektrycznych [2]. Badania te, jak dotychczas, dotyczą izolacji głównej. W normalnych warunkach eksploatacyjnych przy zasilaniu uzwojeń maszyn elektrycznych napięciem sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz wyładowania niezupełne w izolacji zwojowej nie występują, gdyż napięcie zwojowe jest napięciem małym.

Przy zasilaniu maszyn elektrycznych z falowników tranzystorowych PWM o częstotliwości kluczowania kilka, a nawet kilkanaście kHz przy każdym załączeniu i wyłączeniu klucza występuje duża szybkość (stromość) zmiany napięcia na uzwojeniu osiągająca wartość 1500 V/ μ s. Przy tej szybkości zmiany napięcia w układzie: falownik, kabel zasilający, silnik, występują zjawiska falowe. Rezultatem tego jest, że w pierwszej chwili po załączeniu klucza rozkład napięcia na uzwojeniu nie jest równomierny, prawie całe napięcie występuje na pierwszych zwojach, a następnie przemieszcza się na zwoje następne. Tak duże napięcie pojawiające się na izolacji zwojowej z częstotliwością kluczowania stwarza zagrożenie występowania wyładowań niezupełnych w izolacji zwojowej.

Wyładowania niezupełne w izolacji zwojowej są niekorzystne, gdyż:

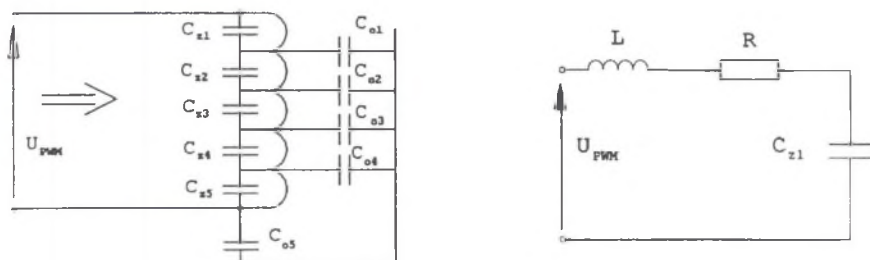
- stopniowo zmniejszają jej właściwości dielektryczne, co po pewnym czasie prowadzi do uszkodzenia izolacji (zwarć zwojowych) i awarii silnika,
- mają charakter impulsowy o dużej częstotliwości (do setek MHz) i wzbudzają fale elektromagnetyczne zakłócające pracę innych urządzeń elektrycznych.

Zagadnienie pomiaru wyładowań niezupełnych w izolacji zwojowej jest zagadnieniem nowym, w normach nie jest jeszcze opracowane [3], także inne publikacje na ten temat są skąpe. Odnosi się wrażenie, że firmy, które opanowały ten problem (amerykańskie), metodykę pomiaru utrzymują w tajemnicy, gdyż produkują i sprzedają aparaturę do tych pomiarów.

2. NAPIĘCIE KORONY WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

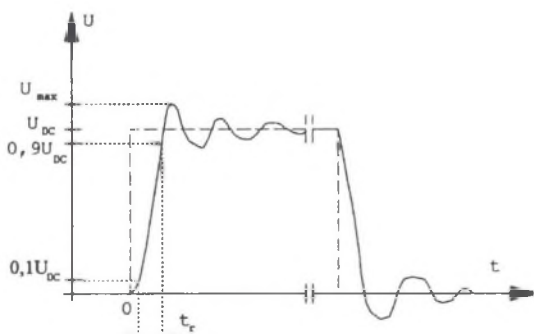
Dla szybkozmiennych przebiegów napięcia przy kluczowaniu tranzystorów uzwojenie silnika charakteryzuje się parametrami rozłożonymi, podobnie jak linia długa. Dla wyjaśnienia zjawiska powstawania przepięć zwojowych posłużymy się jednak schematem zastępczym uzwojenia o parametrach skupionych, przy czym dominującą rolę spełniają pojemności międzyzwojowe C_z i pojemności do masy C_o – rys.1a.

Pojemności własne uzwojenia do masy C_o są znacznie większe od pojemności zwojowych C_z ($C_o \gg C_z$). Dlatego też w pierwszej chwili załączenia napięcia ($t=0$) można założyć $C_o = \infty$ i schemat zastępczy uprościć do dwójnika szeregowego L,R, C_{z1} – rys. 1b, przy czym L i R reprezentują indukcyjność i rezystancję przewodów łączących falownik z silnikiem. Przebieg napięcia na uzwojeniu (na pojemności C_z) ma charakter wykładniczo-oscylacyjny – rys.2. Częstotliwość oscylacji dochodzi do kilku MHz i zależy, podobnie jak wartości maksymalne napięcia, od długości przewodów łączących falownik z silnikiem (parametry L, R na rys.1b)



Rys.1. a) Schemat zastępczy uzwojenia silnika z pojemnościami do masy C_o i międzyzwojowymi C_z ; b) schemat zastępczy dla chwili ($t=0$) załączenia impulsu napięcia

Fig.1. a) Equivalent circuit of motor winding with winding-to-earth capacitances C_o and intercoil capacitances C_z ; b) equivalent scheme for the voltage switch-on time ($t=0$)



Rys.2. Wygenerowane przebiegię na uzwojeniu

Fig.2. Overvoltage generated at a winding

Maksymalna szybkość narastania napięcia $\left(\frac{du}{dt}\right)_{\max}$ jest definiowana tak, jak to zaznaczono na rys.2, czyli

$$\left(\frac{du}{dt}\right)_{\max} = \frac{0,9U_{DC} - 0,1U_{DC}}{t_r} \quad (1)$$

W literaturze [4] napięcie maksymalne na uzwojeniu przyjęto określać jako

$$U_{\max} = 2,1U_{DC} \quad (2)$$

przy czym napięcie stałe w obwodzie pośredniczącym prostownik-falownik z uwagi na dużą wartość pojemności (falownik napięciowy) przyjmuje się dla prostownika zasilanego napięciem 3-fazowym

$$U_{DC} = 2\sqrt{2}U_f. \quad (3)$$

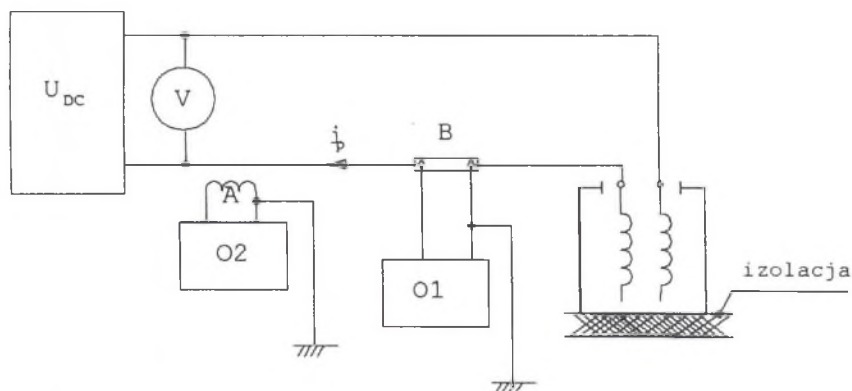
Dla falownika zasilanego z sieci 3x400V, $U_f=231$ V; $U_{DC}=653$ V; $U_{max}=1371$ V, czyli $U_{max} = 3,4[\sqrt{3}U_f]$.

Minimalny czas narastania napięcia na uzwojeniu od wartości $0,1U_{DC}$ do $0,9U_{DC}$ wynosi $(t_r)_{min} \approx 0,45\mu s$, stąd maksymalna szybkość narastania napięcia $\left(\frac{du}{dt}\right)_{max} = 1450V/\mu s$.

Jak wynika z pojemnościowego schematu zastępczego uzwojenia – rys.1a, w pierwszej mikrosekundzie prawie całe napięcie odkłada się na pierwszych zwojach uzwojenia, gdyż $C_o \gg C_z$, a następnie przechodzi na pozostałe zwoje. Gdy przebieg napięcia na uzwojeniu ustali się, wówczas jego rozkład na poszczególnych zwojach jest równomierny.

Występowanie wysokich napięć, kilkakrotnie większych od napięcia znamionowego, na pierwszych zwojach uzwojeń silników zasilanych z falowników powoduje dodatkowe narażenia izolacji zwojowej i izolacji głównej. Z uwagi na to, że izolacja zwojowa w silnikach elektrycznych ma ok. 10 razy mniejszą wytrzymałość elektryczną na przebicie od izolacji głównej, ona w tym przypadku jest najbardziej narażona na uszkodzenie. Napięcie występujące między sąsiednimi przewodami w żłobku (dwa skrajne przewody zezwoju mogą w żłobku leżeć koło siebie) wzbudzają pole elektryczne. Przewody są izolowane w maszynach małej mocy najczęściej emalią, a między przewodami jest powietrze. Jeśli natężenie pola elektrycznego przekroczy wartość wytrzymałości elektrycznej powietrza (ok. 3 kV/mm), to następuje przeskok ładunku elektrycznego w powietrzu. Jest to wyładowanie niezupełne, gdyż izolacja samych przewodów nie ulega przebiciu. Napięcie podawane na uzwojenie silnika, przy którym rozpoczynają się wyładowania niezupełne, określane jest nazwą „napięcie korony wyładowań niezupełnych” (z ang. CIV - corona inception voltage). W powietrzu w czasie wyładowań zachodzą intensywne przemiany chemiczne, z cząsteczek tlenu powstaje ozon, wytwarzany jest również dwutlenek azotu. Oba te związki są silnie agresywne i wchodzą w reakcję z izolacją przewodów, powodując jej przyspieszone starzenie. Efektami towarzyszącymi wyładowaniu niezupełnemu są wyczuwalny zapach ozonu i słyszalne trzaski. Drugim negatywnym skutkiem jest oddziaływanie wyładowań niezupełnych na środowisko.

Przeskoki ładunków elektrycznych w powietrzu zachodzące w czasie wyładowań niezupełnych indukują przepływ podobnych ładunków w uzwojeniu i przewodach łączących falownik z silnikiem, a ponieważ częstotliwość ich jest duża, przewody jako anteny emitują fale elektromagnetyczne do otoczenia. Fale te oddziałują na inne urządzenia elektryczne, na przykład systemy pomiarowe, komputery, urządzenia sterujące i regulacyjne. Przy zbyt wysokim poziomie mogą w sposób niekorzystny wpływać na ich funkcjonowanie.



Rys.3. Układ do badania prądu upływu i wyładowań niezupełnych w izolacji zwojowej modelu fizycznego zezwojów

Fig.3. Measurement diagram for testing the current leakage and partial discharges in coil insulation; the physical model of the coils is tested

3. POMIAR WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W IZOLACJI ZWOJOWEJ

Dla danego układu napędowego (falownik, kabel, silnik) istotne staje się określenie napięcia korony wyładowań niezupełnych bądź też sprawdzenie, że przy napięciu falownika $2,1 U_{DC}$ wyładowania niezupełne nie występują.

Badanie wyładowań niezupełnych można przeprowadzić na modelach fizycznych uzwojeń i na rzeczywistym układzie napędowym.

3.1. Badanie na modelu fizycznym uzwojenia

Model fizyczny uzwojenia do badania wyładowań niezupełnych można zbudować w ten sposób, że zezwój uzwojenia nawija się z dwóch izolowanych przewodów i wkłada się go do żłobków w pakiecie silnika. Nawinięty zezwój na cztery końce uzwojenia, czyli są to faktycznie dwie cewki uzwojenia, przy czym przewody tych cewek są wymieszane ze sobą.

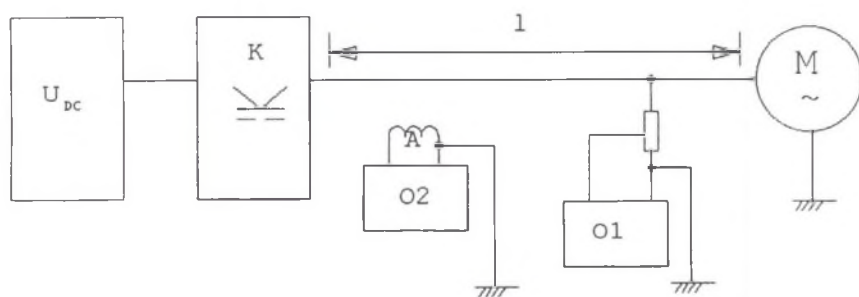
Schemat układu pomiarowego do badania prądu upływu i_p w izolacji między tymi dwoma cewkami przedstawiono na rys.3. Źródło napięcia stałego U_{DC} o regulowanej wartości pozwala uzyskać natężenie pola w powietrzu między przewodami, przy którym rozpoczynają się wyładowania niezupełne (CIV). Rejestrując prąd upływu oscyloskopem O1 jako spadek napięcia z bocznika B przy różnej wartości napięcia U_{DC} można określić napięcie korony wyładowań niezupełnych. Częstotliwość rejestracji oscyloskopu powinna wynosić od 0,5 GHz do 1 GHz. Jeśli częstotliwość wyładowań niezupełnych jest większa od 30 MHz, to wyładowania te emitują fale elektromagnetyczne, których obecność można stwierdzić przy pomocy anteny A (ew. cewki powietrznej) ustawionej w pobliżu przewodów łączących źródło napięcia U_{DC} z badanym uzwojeniem. Aby wykluczyć prawdopodobieństwo wystąpienia

wyładowań niezupełnych w izolacji głównej, co spowodowałoby błędną interpretację wyników pomiarowych, obudowę silnika należy dobrze izolować.

3.2. Badania prowadzone na silniku

Wydaje się, że badania wyładowań niezupełnych w izolacji zwojowej uzwojenia silnika można prowadzić przy wirniku nieruchomym, gdyż prędkość obrotowa silnika nie ma wpływu na napięcie korony (CIV). Propozycję układu pomiarowego przedstawiono na rys.4. Źródło napięcia stałego U_{DC} musi mieć odpowiednio dużą moc, a wartość jego powinna być regulowana. Kluczami tranzystorowymi dokonuje się załączania i wyłączania napięcia na uzwojenie silnika z częstotliwością odpowiadającą kluczowaniu tranzystorów w falowniku PWM, np. 5 kHz. Czas załączenia napięcia powinien być odpowiednio krótki, aby prąd nie przekraczał prądu znamionowego silnika, najlepiej, żeby prąd ten był w przybliżeniu równy prądowi biegu jałowego. Odległość silnika M od klucza tranzystorowego powinna wynosić $l_{min} = 5$ m. Przewody zasilające powinny być rozciągnięte w linii prostej.

Oscyloskopem O1 rejestruje się napięcie na zaciskach silnika, z którego można określić zarówno napięcie U_{max} , jak i czas t_r , co pozwala obliczyć maksymalną pochodną napięcia $\left(\frac{du}{dt}\right)_{max} = \frac{0,8U_{DC}}{t_r}$. Aby napięcie na izolacji zwojowej miało odpowiednio dużą wartość, to $\left(\frac{du}{dt}\right)_{max} \approx 1500V/\mu s$. Jeśli szybkość narastania napięcia jest mniejsza, to należy zmienić parametry układu pomiarowego. Za pomocą anteny A rejestruje się występujące wyładowania niezupełne.

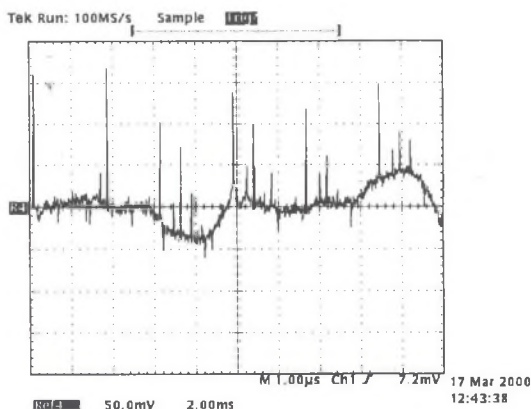


Rys.4. Schemat układu pomiarowego do badania wyładowań niezupełnych w izolacji zwojowej
Fig.4. Measurement diagram for testing the partial discharge in coil insulation

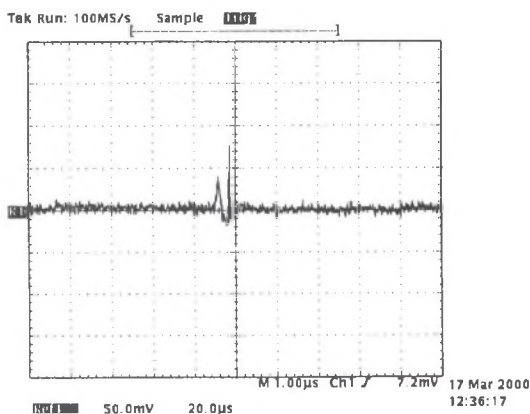
W pomiarach zamiast dwóch oscyloskopów O1 i O2 można wykorzystać oscyloskop dwukanałowy.

4. PRZYKŁAD BADAŃ WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W IZOLACJI ZWOJOWEJ

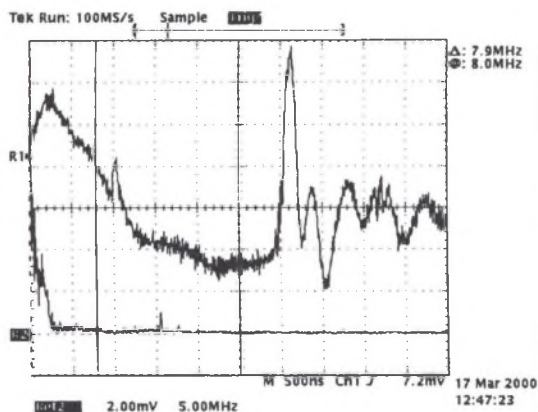
Badania przeprowadzono na dwóch cewkach (zezwojach) nawiniętych przewodem prostokątnym 3x5 mm w izolacji szklanej. Cewki nawinięto tak, jak to opisano w pkt.3.1. Badania przeprowadzono w układzie pomiarowym jak na rys.3. Przebiegi prądu i zarejestrowane wyładowania niezupełne przedstawiono na rys.5, 6 i 7.



Rys.5. Przebieg prądu upływu w izolacji zwojowej – widoczne piki pochodzące od wyładowań niezupełnych
 Fig.5. The course of leakage current in the coil insulation – the peaks generated by partial discharges are depicted



Rys.6. Pojedyncze wyładowanie widoczne w prądzie upływu, $U_{DC}=810$ V
 Fig.6. A single partial discharge is observed in the leakage current. $U_{DC}=810$ V



Rys.7. Fragment przebiegu prądu upływu izolacji zwojowej, częstotliwość próbkowania 100MS/s. Naniesiono widmo amplitudowe przebiegu (FFT)

Fig.7. Fragment of the course of the leakage current, oscilloscope sample rate 100 MS/s. Fourier spectrum is presented (FFT)

5. DOPUSZCZALNE POZIOMY NAPIĘĆ WYSTĘPUJĄCYCH NA SILNIKACH

Firma Magnatec przyjmuje następujące poziomy minimalne napięcie zapłonu koronowego:

- dla silników o napięciu znamionowym 230 V - $U_{CIV} \geq 800V$,
- dla silników o napięciu znamionowym 460 V - $U_{CIV} \geq 1600V$,
- dla silników o napięciu znamionowym 575 V - $U_{CIV} \geq 2000V$.

Norma amerykańska NEMA [5] stawia następujące wymagania silnikom elektrycznym:

- dla silników o napięciu znamionowym $U_N \leq 600V$ $U_{CIV} \geq 1600V$ przy $t_r \geq 0,1\mu s$,
- dla silników o napięciu znamionowym $U_N > 600V$ $U_{CIV} \geq 2,5 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U$ przy $t_r \geq 1\mu s$,

gdzie U_N – napięcie znamionowe silnika.

LITERATURA

1. PN-86/E-04066 (TEC270). Pomiary wyładowań niezupełnych.
2. Glinka T.: Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. Wyd. BOBRME KOMEL, Katowice 1998.
3. PN-E-06717 z 1994 r. Maszyny elektryczne wirujące. Wytyczne stosowania silników indukcyjnych zasilanych z przekształtników.

4. Langhorst P., Hancock C.: The Simple Truth About Motor-Drive Compatibility. Publication of Advanced Development Center, Magnatec Inc.
5. NEMA MG1-1993, Part 31.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Zawilak

Wpłynęło do Redakcji dnia 4 kwietnia 2000 r.

Abstract

When electric machines are fed from transistor inverters with the switching frequencies of several kHz, each switch-over produces a sudden fast voltage rise at the winding. The wave effect occurs in the system consisting of inverter, supply line and motor. At the switching instance, the voltage distribution is uneven, almost all the voltage is present in the first coils of the winding. Such a big voltage overshoot occurring in the coil insulation at the switching frequency rate, poses a serious threat of the generation of partial discharges in the coil insulation. The partial discharges in the coil insulation have an adverse effect on its dielectric properties and excite the electromagnetic waves which may interfere with the operation of other electrical devices. The paper presents a simplified model used to discuss the causes of origin of partial discharges. The equivalent circuit of motor winding with winding-to-earth capacitances C_0 and intercoil capacitances C_z is given in Fig.1a. The simplified model consists of inductance, capacitance and resistance connected in series, and supplied from PWM-type voltage. This circuit is presented in Fig. 1b. The overvoltage generated at a winding is shown in Fig.2. The voltage oscillations and, in particular, their frequency, depend on the LC parameters of the circuit. The voltage rise gradient is defined by formula 1 and the maximum voltage occurring at a winding is taken to be equal to $2,1 U_{DC}$, where U_{DC} is the d.c. link voltage of the PWM inverter. The measurement diagram for testing the current leakage and partial discharges in coil insulation is depicted in Fig.3. This circuit scheme was used during the measurements described in chapter 4. The results of the tests are given in Figs. 5,6, and 7. In particular, the FFT analysis (frequency spectrum) of the partial discharges is shown in Fig.7. The minimum values of the corona inception voltage are presented in Chapter 5.