

## POMIAROWA OCENA STANU IZOLACJI SILNIKÓW KOMUTATOROWYCH WIELKICH MOCY

### *Measurement Evaluation of Insulation State of the Large Power Commutator DC-Motors*

Zbigniew TERTIL, Paweł DYBOWSKI

Akademia Górniczo-Hutnicza

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono pomiarowe możliwości oceny zużycia materiałów izolacyjnych w silnikach komutatorowych wielkich mocy. Silniki tego typu pracują w dużych napędach przemysłowych wymagających wysokiej pewności ruchu i stąd tego typu pomiary kontrolne mają duże znaczenie energetyczne i ekonomiczne. Podano sposoby wykonania konkretnych pomiarów z uwzględnieniem warunków przemysłowych. W ich rezultacie można z dobrym przybliżeniem określić stopień zużycia izolacji silnika, poleca się jednak wykonywać je okresowo, co daje znacznie lepsze możliwości obserwacji zmian stanu izolacji.

**Summary:** Possibilities of measuring electrical insulation consumption in high-power commutator DC-motors are presented. These types of motors operate in large industry drives with high motor reliability. Thus inspection measurement of the machines are very important for power generation and economy. Measurement procedures for specific industrial conditions are given. Determination of the level of motor insulation consumption by these measurement methods are close enough from the engineering point of view. Periodic inspection measurements permit us to better observe changes in the state of the insulation.

#### 1. WSTĘP

Przedstawione w niniejszym artykule problemy dotyczą wielkich i ważnych ze względu na pewność ruchu odbiorników energii elektrycznej, jakimi są silniki komutatorowe wielkich napędów przemysłowych. Głównie są to silniki wyciągowe szybów kopalnianych i walcownicze w hutach. Właściciele i użytkownicy tego typu napędów chcieliby mieć pewność, że stan izolacji silników jest dobry i nie spowoduje ich uszkodzenia (problemów powstawania ew. innych usterek, np. mechanicznych w tym miejscu nie rozpatrujemy). Użytkownik silnika często wprost stawia wymaganie określenia, jak długo i w jakich warunkach dany silnik może pracować bez obawy większej awarii. Jednoznaczna odpowiedź jest utrudniona z trzech powodów:

- w prawie wszystkich dotychczasowych przypadkach żąda się oceny stanu silnika na podstawie jednorazowych prób lub pomiarów;
- użytkownik zawsze stawia warunek, aby przeprowadzone próby nie spowodowały osłabienia lub (co gorsze) uszkodzenia izolacji silnika; jakiegokolwiek ryzyko jest zwykle z góry wykluczane;
- silniki komutatorowe wielkich mocy pracują — jak wiadomo — najczęściej przy napięciu ok. 800V i wo-

bec tego nie bardzo wiadomo do jakiego rodzaju zakwalifikować ich układ izolacyjny: od strony bezpieczeństwa jest to niewątpliwie napięcie wysokie, ale od strony układu materiałów izolacyjnych raczej jeszcze napięcie niskie.

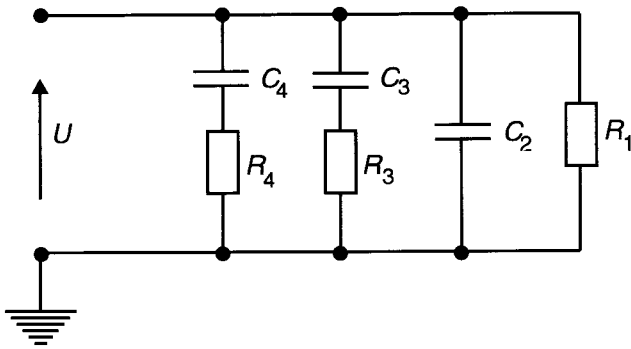
Taka sytuacja nie pozostaje bez wpływu na możliwości pomiaru izolacji.

#### 2. UKŁAD IZOLACYJNY SILNIKA — KRÓTKI OPIS ZJAWISK OD STRONY TEORETYCZNEJ

Obserwując przepływ prądu przez materiał izolacyjny rozróżnia się jego rezystywność  $\rho$  (lub konduktywność  $\gamma$ ) oraz zjawisko polaryzacji. Polaryzacja, czyli orientacja ładunków związanych (dipoli) pod wpływem pola elektrycznego, powoduje w ośrodku izolacyjnym przepływ prądu elektrycznego zwanego prądem absorpcji.

W zależności od struktury materiału izolacyjnego rozróżnia się kilka rodzajów polaryzacji różniących się czasem relaksacji  $\tau$ , tzn. czasem, po którym prąd absorpcji zmniejsza się  $e$  razy. Dla różnych rodzajów polaryzacji wynosi on od ułamków nanosekund do kilkudziesięciu sekund. Bliższe szczegóły na ten temat można znaleźć w literaturze specjalistycznej, np. [1].

Przedstawiając obwodowy schemat zastępczy rzeczywistego układu izolacyjnego zestawia się go z elementów RC. Liczba i układy zastępczych elementów RC są różne. Najwłaściwszy wydaje się układ pokazany na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy układu izolacyjnego

Oznaczono na nim:

- $R_1$  — rezystancję związaną z rezystywnością materiału izolacyjnego,
- $C_2$  — pojemność reprezentującą tzw. polaryzację elektronową, dającą przebiegi najszybsze — praktycznie przy stałej czasowej  $T_c = 0$ ,
- $C_3, C_4, R_3, R_4$  — elementy reprezentujące wolniejsze przebiegi absorbcyjne.

Można łatwo wyliczyć, że po załączeniu stałego napięcia  $U$  na układ izolacyjny zgodnie ze schematem z rysunku 1 popłynie prąd:

$$i_{iz}(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) + i_4(t) \quad (1)$$

lub

$$i_{iz}(t) = \frac{U}{R_1} + UC_2\delta(t) + \frac{U}{R_3}e^{-\frac{t}{T_3}} + \frac{U}{R_4}e^{-\frac{t}{T_4}} \quad (2)$$

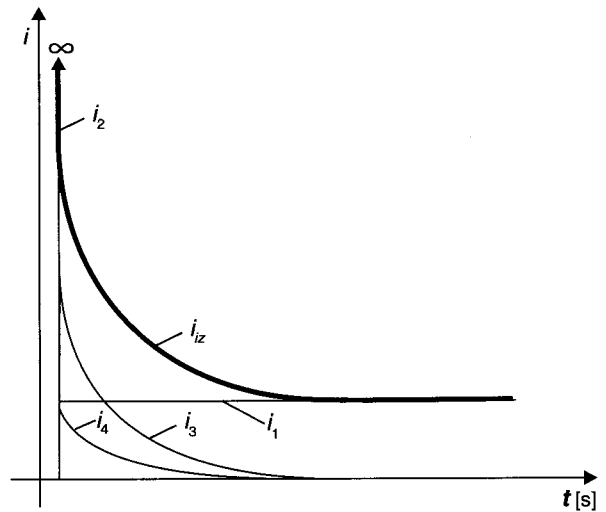
gdzie:

$$T_3 = \frac{1}{R_3 C_3} \quad T_4 = \frac{1}{R_4 C_4}$$

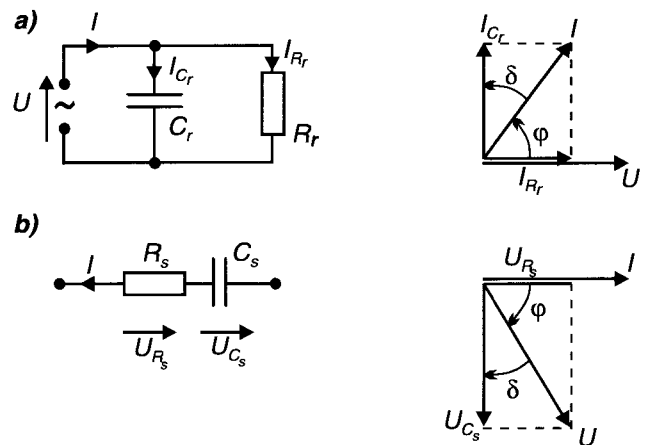
$\delta(t)$  — funkcja Diraca.

Graficzne przebiegi wszystkich prądów można przedstawić jak na rysunku 2.

Podając na układ izolacyjny sinusoidalne napięcie przemienne, otrzymuje się oczywiście przemienne przebiegi prądów. Taki przypadek często opisuje się uproszczonym schematem zastępczym układu izolacyjnego, składającym się z pojedynczych elementów RC jak na rysunku 3. Kąt  $\delta$ , którego tangens dla układu równoległego wynosi  $(\omega C_r R_r)^{-1}$ , a dla szeregowego  $\omega C_s R_s$ , znany jest ogólnie jako kąt strat dielektrycznych. Dalsze szczegóły na temat równoważności układów, sposobu pomiarów  $\text{tg}\delta$ , interpretacji otrzymywanych wyników można znaleźć w wielu podręcznikach i publikacjach, np. [1, 4] i nie ma potrzeby ich tu przytaczać.



Rys. 2. Przebiegi prądów po przyłożeniu napięcia na układ izolacyjny

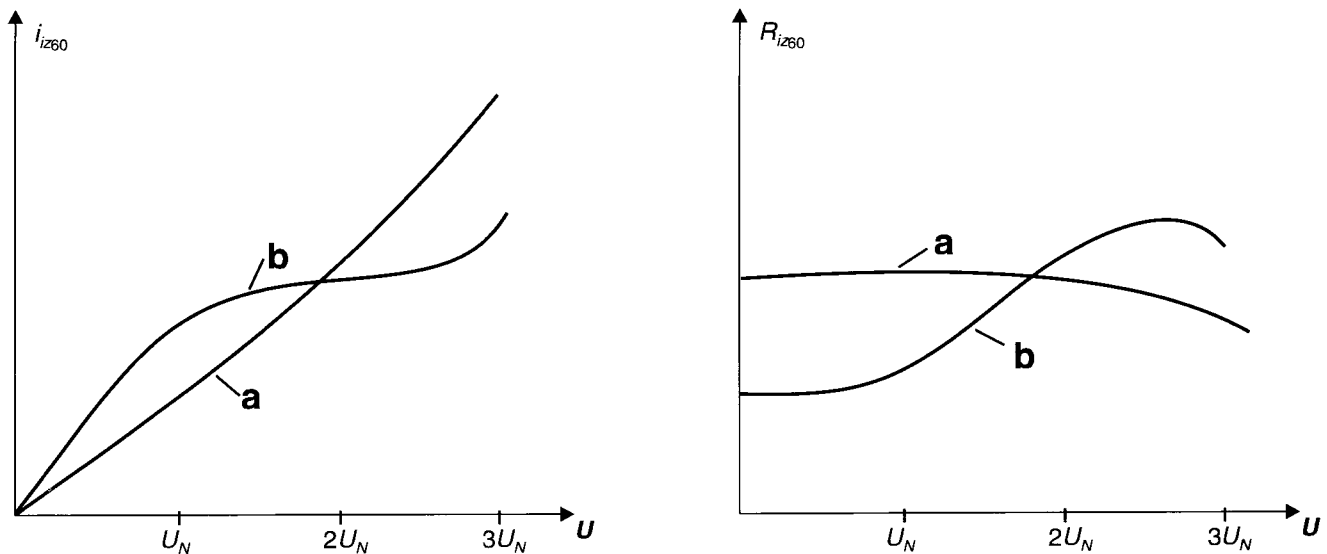


Rys. 3. Schematy zastępcze i wykresy wskazowe przyjmowane przy pomiarze współczynnika strat dielektrycznych napięciem przemiennym: a — układ równoległy, b — układ szeregowy

### 3. POMIARY WYKONYWANE NA UKŁADACH IZOLACYJNYCH SILNIKÓW

W tym miejscu, już na wstępie należy zaznaczyć, że w dotychczasowych normach, zaleceniach, czy podręcznikach nie ma jednoznacznego stanowiska co do zakresu takich pomiarów i ich wykonywania. Problematyka jest znana oczywiście od dawna, ale dopiero w ostatnich latach zaczyna się bliżej konkretyzować. Można tu wymienić:

- 3.1. Prosty, prymitywny pomiar rezystancji izolacji w stanie ustalonym (a więc po ok. 60s od chwili przyłożenia napięcia) napięciem stałym, na ogół niższym od napięcia znamionowego silnika. Zalecany on jest np. w [7] i innych przepisach. Wykonuje się go zwykle za pomocą megaomomierza induktorowego lub (lepiej) megaomomierza elektronicznego.
- 3.2. Wyznaczanie charakterystyki  $i_{iz} = f(t)$  po przyłożeniu na układ izolacyjny napięcia znamionowego. Przebieg tego prądu pokazuje rysunek 2. Na podstawie tego przebiegu wyznacza się różne wskaźniki, np.  $i_{iz60}$  /



Rys. 4. Przykładowe przebiegi zależności prądu i rezystancji izolacji od przyłożonego napięcia w stanie ustalonym: po lewej — przebiegi normalne, po prawej — przebiegi zniekształcone

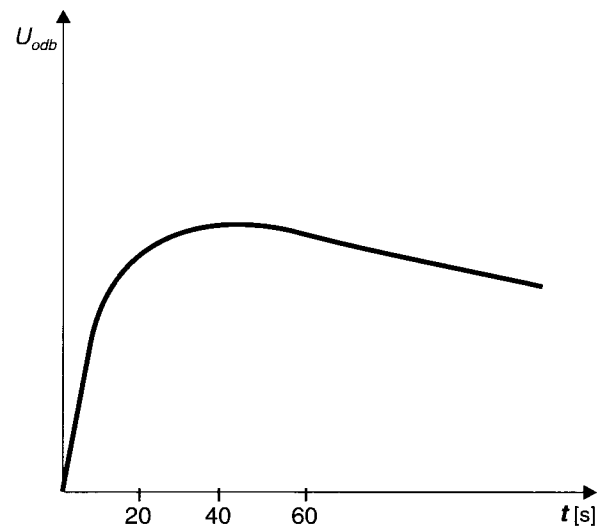
$i_{iz60}$  [3] lub  $R_{iz60} / R_{iz15}$  [3, 6], albo też  $R_{iz600} / R_{iz60}$  [3]. Indeksy liczbowe oznaczają czas w sekundach, po jakim należy odczytywać wartość prądu.

**3.3.** Wyznaczanie charakterystyki  $i_{iz60} = f(U)$  lub  $R_{iz60} = f(U)$ . Przebiegi tych charakterystyk mogą być różne w zależności od typu i stanu izolacji silnika. Przykładowo pokazano to na rysunku 4, gdzie krzywe **a** pokazują typowe przebiegi prawidłowe, a krzywe **b** przebiegi zniekształcone niewłaściwym stanem izolacji. Wyznaczanie tych charakterystyk zaleca się prowadzić przynajmniej do wartości  $2-3U_n$  [2, 4] — tak, aby przez ekstrapolację charakterystyki  $R_{iz60} = f(U)$  można było wyznaczyć napięcie, przy którym  $R_{iz60} = 0$ , czyli napięcie przebicia izolacji. O ile oczywiście izolacja nie zostanie przebita w trakcie pomiarów!

**3.4.** Pomiar odbudowy napięcia po naładowaniu układu izolacyjnego napięciem znamionowym i krótkotrwałym zwarcie. Biorąc pod uwagę schemat zastępczy układu izolacyjnego podany na rysunku 1 można stwierdzić, że krótkotrwałe zwarcie „zacisków wejściowych” układu spowoduje całkowite rozładowanie pojemności  $C_2$ , ale tylko częściowe rozładowanie pojemności  $C_3$  i  $C_4$ . Po otwarciu „zacisków” pojawi się na nich napięcie powrotne  $U_p < U_n$ . Całkowity zanik napięcia na „zaciskach” po krótkotrwałym rozładowaniu świadczy, że albo pojemności  $C_3$  i  $C_4$  nie istnieją, albo rezystancje  $R_3$  i  $R_4$  są bardzo małe. Może też się zdarzyć, że układ po odłączeniu napięcia zasilającego nie będzie utrzymywał napięcia na „zaciskach”, co świadczy o małej wartości  $R_1$ . Typowy przebieg odbudowy napięcia na prawidłowym układzie izolacyjnym pokazuje rysunek 5. Powyższy sposób kontroli stanu izolacji silników pojawił się w literaturze stosunkowo niedawno [2].

**3.5.** Wyznaczanie współczynnika strat dielektrycznych tgδ. Pomiar ten stosowany jest od dawna w badaniu stanu izolacji maszyn wysokiego napięcia. Metoda

pomiarowa i wykorzystanie otrzymanych wyników są szeroko opisywane w literaturze, np. [1, 4], wszystkie jednak charakterystyki zaczynają się od napięcia 1–2kV i prowadzone są do 15–20kV (generatory synchroniczne wielkich mocy). Jak już było wcześniej podane, w maszynach komutatorowych wykonuje się pomiary jedynie do napięcia ok. 1kV, wobec czego powyższa metoda pomiarowa nie znajduje w nich zastosowania i dalej nie będziemy się nią zajmować.



Rys. 5. Przykładowy przebieg odbudowy napięcia na naładowanym i krótkotrwałe zwartym układzie izolacyjnym

#### 4. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA WYNIKÓW POMIARÓW DLA OCENY STANU IZOLACJI SILNIKA

Rozpatrując kolejno pomiary omówione w podrozdziałach 3.1 do 3.4 można stwierdzić:

4.1. Ogólny pomiar rezystancji izolacji megaomierzem nie daje żadnych podstaw do wyciągania wniosków co do stanu zużycia izolacji silnika, np. duża rezystancja izolacji może być rezultatem ogólnie dobrego jej stanu, ale również może być uzyskana dla starej, popękanej, a jedynie dobrze wysuszonej w chwili pomiaru. Dobrze jest jednak pomiar ten wykonać na wstępie, przed bardziej szczegółowymi pomiarami (napięcie zasilające megaomierz może być dowolnie niższe od znamionowego napięcia silnika). Za pomocą tego pomiaru uzyskuje się ogólne rozeznanie, czego należy oczekiwać po dalszych pomiarach, np. gdy pomiar megaomierzem wykaże rezystancję izolacji uzwojenia biegunów głównych rzędu kilku GΩ, to przy napięciu znamionowym ok. 100V można się spodziewać prądu upływu rzędu kilkudziesięciu nA. Pomiar takich prądów staje się w warunkach przemysłowych bardzo utrudniony: należy się liczyć z silnymi zakłóceniami przez pracujące urządzenia przemysłowe, a nawet przez silne radiostacje. Tak więc wstępna informacja o wysokich rezystancjach ogranicza zakres dalszych pomiarów.

4.2. Charakterystyka  $i_{iz} = f(t)$  (przy  $U = U_n$ ) pozwala na wyznaczenie współczynnika absorpcji:

$$k_a = \frac{i_{iz15}}{i_{iz60}} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}},$$

który powinien być większy od 1. Współczynnik  $k_a = 1$  świadczy przede wszystkim o zawilgoceniu izolacji. Jeżeli jednak istnieje pewność, że izolacja jest sucha, a  $k_a \approx 1$ , to jest to sygnałem, że izolacja jest silnie zużyta. Ponadto źródłem informacji jest kształt przebiegu  $i_{iz} = f(t)$ . Jeśli jest on zbliżony do „gładkiego” przebiegu z rysunku 2, to układ izolacyjny można traktować jako prawidłowy. Jeżeli natomiast przystaw rejestrujący prąd wykazuje stochastyczne „wysoki”, to świadczy to o niekontrolowanych przebiegach spowodowanych zużyciem izolacji. Na schemacie zastępczym przedstawionym rysunku 1 można te przebiegi tłumaczyć skokowymi zmianami pojemności  $C_3$  i  $C_4$ .

4.3. Charakterystyka  $R_{iz60} = f(U)$  ograniczona jest dla silników komutatorowych w praktyce do maksymalnego napięcia 1000–1200V i to powoduje, że wyznaczenie napięcia, dla którego  $R_{iz}$  wynosi zero (napięcia przebicia), staje się praktycznie niemożliwe — choć jest to istotny parametr. Przy napięciu znamionowym można jedynie wyznaczyć współczynnik

$$k_{iz} = \frac{R_{iz60}}{U_n} \text{ [k}\Omega / \text{V]},$$

który powinien być możliwie wysoki.

4.4. Kontrola odbudowy napięcia po krótkotrwałym zwarciu układu izolacyjnego jest pomiarem możliwym do wykonania dla każdego silnika i każdego uzwojenia. Im wyższe napięcie odbudowy i im czas odbudowy dłuższy, tym stan izolacji można uznać za lepszy.

## 5. ZESTAWIENIE WARTOŚCI WYNIKÓW POMIARÓW I OSTATECZNE USTALENIE STANU IZOLACJI SILNIKA

Wyniki każdego pomiaru zestawione są w tabeli 1 dla trzech kategorii stanów izolacji: stan dobry, stan średni, stan zły (pomiar wg punktu 4.1 nie wchodzi do ogólnej oceny).

Tabela 1. Zestawienie i ocena wyników pomiarów

Dobry stan izolacji	Średni stan izolacji	Zły stan izolacji
Charakterystyka $i_{iz} = f(t)$		
$k_a \geq 1,5$	$1,2 \geq k_a \geq 1,0$	$k_a \approx 1,0$
Charakterystyka $R_{iz60} = f(U)$		
regularna z małymi wahaniami w stanie ustalonym do ok. 50% wartości średniej dla stanu wolnego $k_{iz} \geq 100 \text{ k}\Omega / \text{V}$	nieregularna z odchyleniami rzędu $\pm 100\%$	nieregularna z odchyleniami rzędu $\pm 200\%$
	$100 \text{ k}\Omega / \text{V} \geq k_{iz} \geq 10 \text{ k}\Omega / \text{V}$	$k_{iz} < 10 \text{ k}\Omega / \text{V}$
Odbudowa napięcia		
Czas zwarcia 5s $U_{odb} > 0$ (zwykle dla twornika przy $U_n = 800\text{V}$ , $U_{odb} = 150\text{--}250\text{V}$ i 100–150V dla biegunów komutacyjnych i uzw. kompensacyjnego)	Czas zwarcia 1s $U_{odb} > 0$	Czas zwarcia $\approx 0,1\text{s}$
Czas wystąpienia $U_{odb \text{ max}} > 30\text{s}$	Czas wystąpienia $U_{odb \text{ max}} > 10\text{s}$	$U_{odb} = 0$

## 6. WARUNKI TECHNICZNE I SPOSÓB WYKONYWANIA POSZCZEGÓLNYCH POMIARÓW

Dla ułatwienia korzystania z podanych w rozdziale 3 metod pomiarowych niżej podane są warunki, w których mogą być one stosowane.

### 6.1. Przygotowanie silnika do pomiarów

Odpowiednie przygotowanie silnika do prób jest bardzo ważne, gdyż w przeciwnym przypadku można otrzymać bardzo zniekształcone wyniki, trudne do oceny. Tak więc:

- silnik nie może przez kilka dni przed pomiarami mieć postoju, gdyż izolacja może być wtedy zawilgocona;
- jeżeli silnik przez długi czas nie pracował, należy koniecznie izolację wysuszyć (szczególnie izolację twornika), najlepiej przepuszczając przez uzwojenia prąd o wartości ok.  $0,5 I_n$  tak, aby uzwojenie osiągnęło temperaturę 40–50°C; czas suszenia można uznać za wystarczający, jeśli pomiary rezystancji izolacji megaomierzem, wykonywane co kilka godzin, kilkakrotnie dadzą takie same wyniki;

- silnik nie może być również, na skutek przeciążeń, zbyt silnie nagrzany; najlepsze wyniki można uzyskać, jeżeli pomiary wykonuje się po 8-godzinnej pracy silnika z niepełnym obciążeniem i gdy temperatura uzwojeń wynosi 40–50°C;
- bezpośrednio przed pomiarami wszystkie uzwojenia muszą być całkowicie odpięte od zasilania, szczotki na tworniku powinny być podniesione, albo może być wsunięty pod nie bardzo dobry materiał izolacyjny (papier lub preszpan nie nadają się do tego celu).

## 6.2. Techniczne warunki wykonywania pomiarów podanych w punktach 3.2, 3.3, 3.4

Do wszystkich pomiarów niezbędny jest układ zasilający dający napięcie stałe, regulowane płynnie od 0 do ok. 1200V. Może to być zasilacz prostownikowy o mocy 100–200W z kilkustopniowym filtrem RC na wyjściu i zasilany z sieci przez filtr i stabilizator. Dla wyznaczenia przebiegu  $i_{iz} = f(t)$  (punkty 3.2, 4.2) najdokładniejszy jest układ rejestrujący prąd o bardzo małej wartości w ciągu ok. 100s. Pomiar cyfrowy jest lepszy od zapisu analogowego, który zawsze jest obciążony bezwładnością układu. Pamiętać jednak należy, że czas próbkowania musi być możliwie krótki, a liczba próbek taka, żeby pokryć zakres ok. 100s. Dodatkową trudność przy rejestracji stanowi mała wartość  $i_{iz}$  (często w zakresie kilku do kilkudziesięciu  $\mu A$ ). W ostateczności do pomiaru można zastosować mikroamperomierz wskazówkowy o małej bezwładności i z notowaniem czasu za pomocą sekundomierza. Napięcie podawane przez zasilacz można kontrolować wysokoomowym woltomierzem klasy 0,5–1,0, natomiast do odczytu napięcia odbudowy (punkty 3.4, 4.4) niezbędny jest elektroniczny woltomierz o zakresach 10–500V i rezystancji wejściowej rzędu 100M $\Omega$ .

## 7. WNIOSKI

Na podstawie wyżej opisanych pomiarów możliwe jest określenie stanu zużycia izolacji silnika. Nie ma oczywiście możliwości odpowiedzi na częste pytania użytkowników, jak długo silnik może jeszcze pracować? Dodatkowe ograniczenie stanowią tu warunki stawiane przez nich — podane na wstępie. Ponadto, zwykle przy wykonywaniu pomiarów nic lub prawie nic nie wiadomo o materiałach, z jakich wykonany jest układ izolacyjny silnika — a to również wpływa na jego długotrwałość. Należy tu wyraźnie podkreślić, że dopiero prowadzenie pomiarów

w okresach 3–5-letnich pozwala na ocenę procesu starzenia się izolacji i lepsze przewidywanie jej dalszej trwałości. Pojedynczy pomiar nie jest niestety miarodajny.

Poza wytrzymałością elektroizolacyjną, długotrwałość pracy silników komutatorowych może być ograniczona również czynnikami mechanicznymi, ale elementy konstrukcji mechanicznej nie wykazują najczęściej zużycia stopniowego, w miarę eksploatacji. Jedynym elementem, który może się zużywać stopniowo, w długim czasie, jest komutator. Przy prawidłowej eksploatacji pracuje on zwykle kilkadziesiąt lat bez krytycznego zużycia.

## LITERATURA

1. Florkowska B.: *Podstawy metod badań układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. SU AGH, Kraków, 1991. 7–46. 120–123.
2. Glinka T.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń stojana silników indukcyjnych wysokiego napięcia*. Zeszyty Problemowe BOBRME 1992, 4, 17–21.
3. Glinka T.: *Eksploatacja maszyn prądu stałego — kłopoty eksploatacyjne i ich identyfikacja*. Mat. Konf. XII Szk. Niezawodności 1985, XX, 187–207.
4. Meyer H.: *Die Isolierung großer elektrischer Maschinen*. Springer — Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1962. 133–184.
5. Wichmann A.: *Missungen mit hoher Gleichspannung an Isolierstoffen für Generatoren*. ETZ Asugabe A, 10/1956. 289–294.
6. Wichmann A.: *Die Isolationsprüfung elektrischer Maschinen mit Gleichspannung*. ETZ Asugabe A, 15/1956. 512–517.
7. PN-88/E-06701: *Maszyny elektryczne wirujące. Ogólne wymagania i badania*.



**Dr hab. inż. Zbigniew Tertil.** Urodzony w 1931 roku. Studia ukończył w 1956 roku na ówczesnym Wydziale Elektryfikacji Górnicztwa i Hutnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. W roku 1954 rozpoczął pracę w Katedrze Maszyn i Pomiarów Elektrycznych, kierowanej w tym czasie przez prof. W. Kołka. Doktorat w 1964 roku, habilitacja w 1982 roku. Autor lub współautor kilkudziesięciu publikacji z dziedziny maszyn elektrycznych i kilkunastu skryptów uczelnianych. Interesuje się głównie pomiarami maszyn komutatorowych. Obecnie pracuje na stanowisku prof. nadzw. w Katedrze Maszyn Elektrycznych AGH. W latach 1987–1993 prodziekan Wydziału. Jest rzeczoznawcą i weryfikatorem IR SEP w zakresie maszyn i napędów elektrycznych.



**Mgr inż. Paweł Dybowski.** Urodzony w 1968 roku. Absolwent Technikum Elektrycznego w Zespole Szkół Elektrycznych nr 1 w Krakowie (ukończył je w 1988 roku) oraz Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej (magisterium w 1993 roku). W roku 1993 rozpoczął pracę w Katedrze Maszyn Elektrycznych AGH na stanowisku asystenta.

