

Czesław SZCZEPANIAK
Antoni KRAHEL
Elżbieta OGONOWSKA-SCHWEITZER

POMIAR REZYSTANCJI UZWOJEŃ MASZYN INDUKCYJNYCH PODCZAS PRACY

STRESZCZENIE *Jedną z prób wykonywanych podczas badań silników indukcyjnych jest wyznaczenie przyrostu temperatury uzwojenia stojana pracującej maszyny. W referacie przedstawiono metodę pomiaru tej wielkości, oraz opis modelu skonstruowanego do tego celu przyrządu. Zamieszczono również wyniki badań porównawczych prezentowanego modelu przyrządu i dotychczas stosowanego w Laboratorium Zakładu Maszyn mostka MTME–101.*

Słowa kluczowe: *pomiar rezystancji uzwojeń, cyfrowe przetwarzanie sygnałów, DSP*

prof. dr hab. inż. Czesław SZCZEPANIAK

e-mail: c.szczepaniak@iel.waw.pl

Zakład Metrologii i Badań Nieniszczących,
Instytut Elektrotechniki

dr inż. Antoni KRAHEL

e-mail: antoni.krahel@iel.gda.pl

Instytut Elektrotechniki, Oddział w Gdańsku

dr inż. Elżbieta OGONOWSKA-SCHWEITZER

e-mail: e.ogonowska@iel.waw.pl

Zakład Maszyn Elektrycznych
Instytut Elektrotechniki

1. WSTĘP

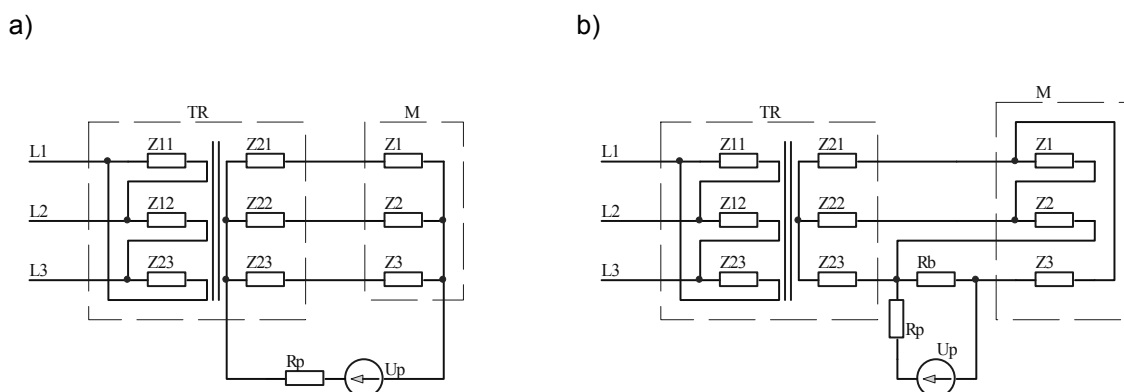
Jedną z prób wykonywanych podczas badań silników indukcyjnych jest wyznaczenie przyrostu temperatury uzwojenia stojana pracującej maszyny. Temperatura i czas jej występowania mają największy wpływ na szybkość starzenia się izolacji, a trwałość izolacji decyduje o trwałości maszyny. Pomiar przyrostu temperatury uzwojenia stojana jest wykonywany metodą rezystancyjną zgodnie z zaleceniem normy [1], poprzez pomiar przyrostu rezystancji uzwojenia – uzwojenie jest traktowane jako termorezystor. Podczas próby nagrzewania pomiary rezystancji wykonuje się w stanie zimnym i po ustaleniu temperatury (stan gorący). Ponadto w celu wyznaczenia krzywej nagrzewania wykonuje się również pomiary w trakcie nagrzewania w równych odstępach czasu, najczęściej co pół godziny. Pomiary te mogą być wykonane typowym przyrządem do pomiaru rezystancji o ile na czas pomiaru badana maszyna zostanie zatrzymana i odłączona od źródła zasilania. Wiąże się to z pewnym opóźnieniem pomiaru przez co zmierzone wartości są różne od tych jakie były przed wyłączeniem maszyny (uzwojenie zdążyło ostygnąć) [7], a w przypadku gdy pomiar rezystancji jest wykonywany po czasie dłuższym niż podany w normie [1], konieczne jest wyznaczenie krzywej stygnięcia maszyny. Przyrost temperatury uzwojenia odpowiadający momentowi wyłączenia silnika wyznacza się przez ekstrapolacje krzywej stygnięcia.

W celu uniknięcia powyższej niedogodności opracowano metodę pomiaru rezystancji uzwojeń prądem stałym bez konieczności wyłączania silnika, zwaną metodą superpozycji [2]. Metoda ta polega na nałożeniu na prąd przemienny płynący przez uzwojenie stałego prądu pomiarowego o niewielkiej wartości, a następnie na wykonaniu pomiaru rezystancji uzwojenia wykorzystując tę składową. W tej metodzie pomiar rezystancji może być wykonywany zarówno odpowiednio zmodyfikowanym mostkiem pomiarowym [6, 7, 8, 9, 10] – rozwiązanie opracowane przez doc. dr hab. inż. R. Zapaśnika i wykorzystywane w Laboratorium Zakładu Maszyn Elektrycznych IEL, jak i metodą techniczną [3, 4, 5] – rozwiązanie zrealizowane przez prof. dr hab. inż. Cz. Szczepaniaka z Zakładu Metrologii i Badań Nieniszczących IEL. Oba urządzenia wykonano w technice analogowej. Niniejsza publikacja prezentuje opis modelu cyfrowego przetwornika pomiarowego działającego według metody technicznej.

2. WPROWADZANIE SKŁADOWEJ STAŁEJ

Pomiar rezystancji metodą superpozycji wymaga nałożenia na prąd przenienny płynący przez uzwojenie niewielkiej składowej stałej. Norma oraz publikacje [1, 2, 9] zalecają, aby jej wartość nie przekraczała 5 % wartości prądu znamionowego maszyny dla połączenia uzwojenia w gwiazdę, 10 % ÷ 15 % wartości prądu znamionowego dla połączenia uzwojenia w trójkąt, a czas pomiaru (przepływu składowej stałej) nie przekraczał 5 min. Wprowadzenie składowej stałej prądu do uzwojeń maszyny można zrealizować poprzez włączenie do obwodu zasilania badanego uzwojenia źródła prądu stałego, albo poprzez dołączenie elementu nieliniowego o niesymetrycznej charakterystyce prądowo-napięciowej.

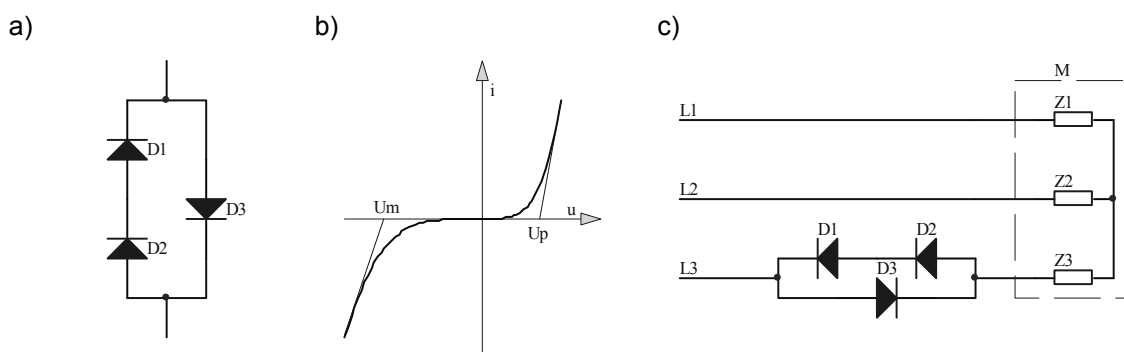
W pierwszym przypadku źródło napięcia stałego powinno być włączone w sposób ograniczający przepływ przez źródło składowej zmiennej prądu. Rozwiązania układowe można znaleźć w literaturze [2, 4, 7]. Na rysunku 1 przedstawiono dwa z nich uznane przez autora jako najbardziej reprezentatywne. W układzie oznaczonym jako a) źródło napięcia stałego włączono w przewód zerowy, a więc w przewód w którym przy zachowaniu symetrii zasilania i obciążenia prąd zmienny nie płynie. Rozwiązanie to może być jednak zastosowane jedynie w przypadku maszyny trójfazowej z uzwojeniami połączonymi w gwiazdę z dostępnym punktem zerowym. Ograniczenia tego nie posiada układ b), w którym źródło napięcia stałego jest włączone w szereg z badanym uzwojeniem i zobciążone rezystancją o niewielkiej wartości, przez którą przepływa prawie cały prąd składowej zmiennej. Jednak w tym przypadku wydajność prądowa źródła prądu stałego musi być zdecydowanie większa, ponieważ przez



Rys. 1. Przykładowe sposoby włączenie źródła składowej stałej do obwodu pomiarowego:
 a) źródło włączone pomiędzy punkty zerowe uzwojeń maszyny i transformatora zasilającego,
 b) źródło włączone w szereg z badanym uzwojeniem

obwód zawierający R_b popłynie większa część prądu stałego, natomiast prąd płynący przez badane uzwojenie będzie niewielki. W publikacji [4] autor proponuje przyjęcie wartości prądu stałego źródła równej prądowi znamionowemu maszyny. Wtedy spadki napięcia na rezystorze bocznikującym R_b pochodzące od prądu stałego i zmiennego będą sobie równe i będą wynosić kilka dziesiątych części volta.

Jak wcześniej wspomniano alternatywnym sposobem dodania składowej stałej jest zastosowanie nieliniowego dwójnika o niesymetrycznej względem zera charakterystyce prądowo-napięciowej. Element taki należy włączyć w obwód prądu przemiennego szeregowo z badanym uzwojeniem. Przepływ prądu przemiennego przez taki element wymusza na nim niesymetryczny względem zera, a więc zawierający składową stałą, spadek napięcia. Jedno z możliwych rozwiązań takiego dwójnika przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Realizacja dwójnika diodowego o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej: a) układ połączeń dwójnika, b) charakterystyka prądowo-napięciowa dwójnika, c) przykładowy sposób włączenia dwójnika do obwodu zasilania badanej maszyny

Charakterystykę prądowo-napięciową przedstawionego dwójnika diodowego można w przybliżeniu rozpatrywać jako składającą się z trzech prostoliniowych odcinków:

$$U(I) \approx \begin{cases} -U_F + r_F I & , I < 0 \\ 0 & , I = 0 \\ 2U_F + 2r_F I & , I > 0 \end{cases} \quad (1)$$

przy czym:

- I – prąd płynący przez dwójnik,
- U – spadek napięcia na dwójniku,
- U_F – napięcie przewodzenia diody,
- r_F – rezystancja dynamiczna diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia.

Przepływ przez taki dwójnik sinusoidalnego prądu $i(t)$:

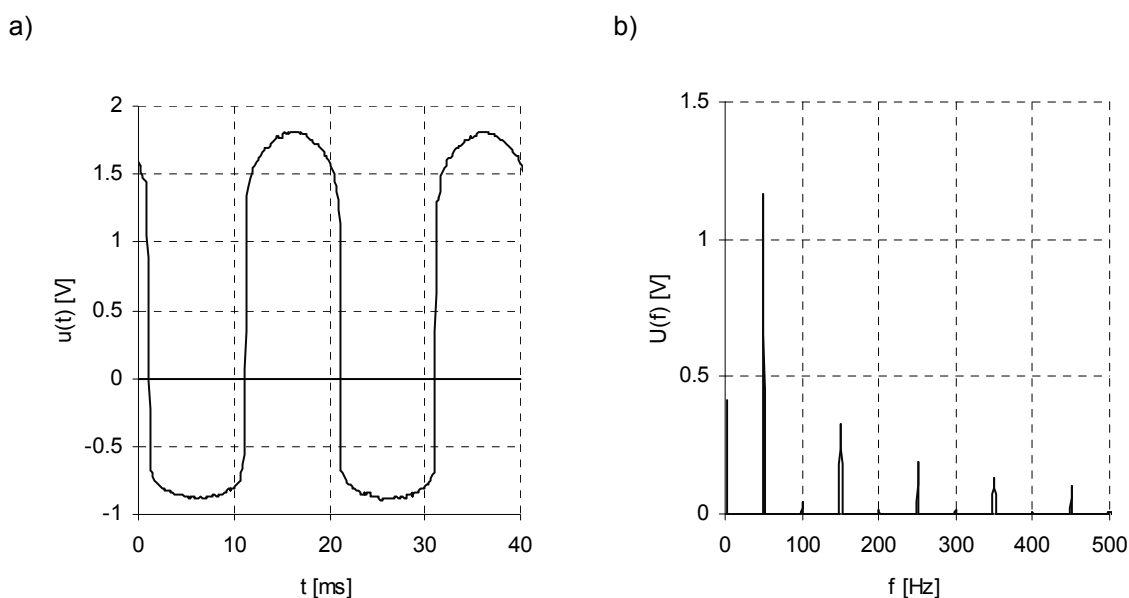
$$i(t) = I_m \sin \omega t \quad (2)$$

wymusza na nim spadek napięcia, który można oszacować jako:

$$u(t) \approx 0.5U_F + \frac{r_F}{\pi} I_m + u_z(t) \quad (3)$$

przy czym: dwa pierwsze składniki reprezentują składową stałą, zaś $u_z(t)$ jest niesinusoidalną składową przemienną spadku napięcia na dwójniku. Dla niskonapięciowych diod krzemowych można przyjąć: $U_F \approx 0,7$ V, zaś iloczyn $r_F I_m \approx 0,3$ V przy I_m bliskim wartości znamionowej prądu przewodzenia diody. W efekcie można oszacować wartość składowej stałej spadku napięcia na prezentowanym dwójniku w granicach: $0,35 \div 0,45$ V w zależności od wartości przepływającego prądu.

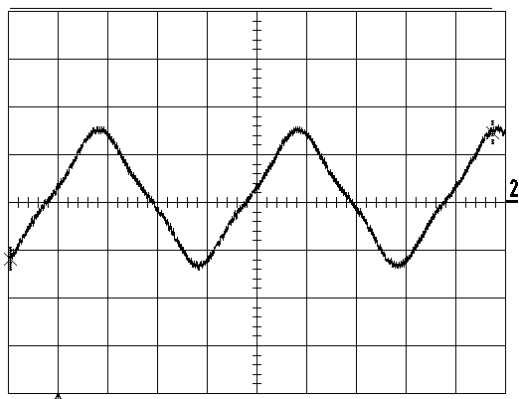
Na rysunku 3a) przedstawiono oscylogram spadku napięcia na nieliniowym dwójniku zbudowanym z trzech diod BYV-29-500 zasilanym prądem sinusoidalnym o wartości ok. 1 A.



Rys. 3. Spadek napięcia na dwójniku zbudowanym z trzech diod BYV29-500 zasilanych prądem ok. 1 A: a) przebieg czasowy, b) widmo amplitudowe (wartości skuteczne poszczególnych harmonicznnych)

Wyraźnie widoczna jest niesymetria przebiegu, wynikająca zarówno z różnych spadków napięcia na złączach: (U_F w jedną stronę, $2U_F$ w drugą), jak

i różnych rezystancji szeregowych (r_F i $2r_F$). Na rysunku 3b) przedstawiono widmo amplitudowe przebiegu z rys 3a). Jak widać, oprócz składowej stałej i pierwszej harmonicznej prezentowany dwójnik jest źródłem wyższych harmonicznych. Ich wartości nie przekraczają jednak kilku dziesiątych części volta, co w porównaniu z napięciem zasilania uzwojenia, daje współczynniki zawartości harmonicznych w granicach 0,1 %.



Rys. 4. Odkształcony przebieg prądu w uzwojeniu silnika z włączonym dwójnikiem diodowym

Jednak nawet tak niewielki spadek napięcia na dwójniku włączonym w szereg z jednym z uzwojeń może być przyczyną znacznego odkształcenia prądu płynącego w tym uzwojeniu. Zobrazowano to na rys. 4, gdzie przedstawiono oscylogram prądu w uzwojeniu silnika z szeregowo włączonym dwójnikiem diodowym.

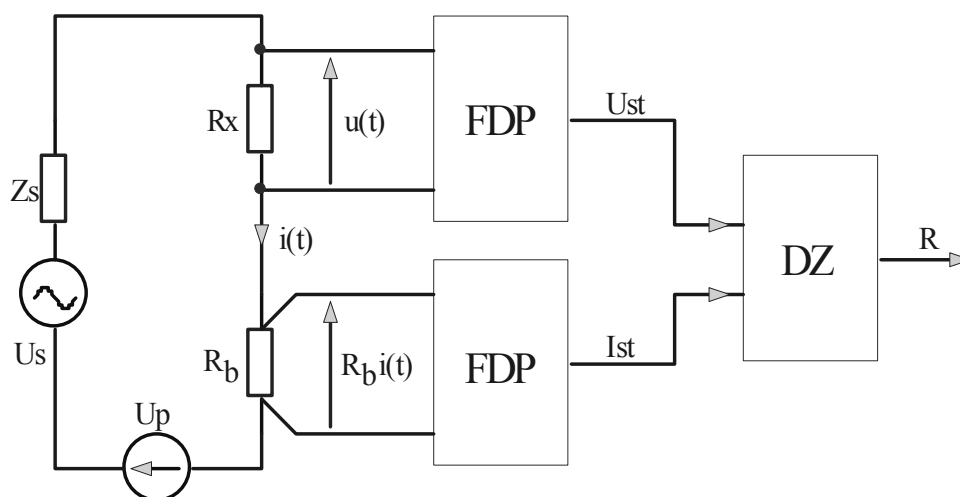
Porównując rozwiązania z nieliniowym dwójnikiem i aktywnymi źródłami prądu stałego można zauważyć że rozwiązania z nieliniowym dwójnikiem:

- są prostsze a ich wykonanie tańsze,
- nie wymagają osobnego źródła zasilania,
- nie generują składowej stałej przy wyłączonej maszynie – pomiar w stanie zimnym można jednak wykonać zasilając maszynę znacznie obniżonym napięciem,
- praktycznie nie umożliwiają regulacji składowej stałej, jednak uzyskiwane wartości składowej stałej mogą okazać się w większości przypadków odpowiednie,
- są źródłem dodatkowych niewielkich zniekształceń napięcia zasilającego maszynę, które jednak mogą powodować znaczące odkształcenie prądu płynącego przez uzwojenie.

3. POMIAR REZYSTANCJI UZWOJENIA

Jeżeli uzwojenie maszyny potraktuje się jako liniowy dwójnik RL , przez który przepływa prąd zawierający składową stałą, to jego rezystancję można wyznaczyć z prawa Ohma. Potrzebne składowe stałe prądu i napięcia można

wyznaczyć poprzez odfiltrowanie ich z przebiegów wartości chwilowych za pomocą filtrów dolnoprzepustowych (rys. 5).



Rys. 5. Uproszczony schemat pomiaru rezystancji uzwojenia pod napięciem metodą superpozycji

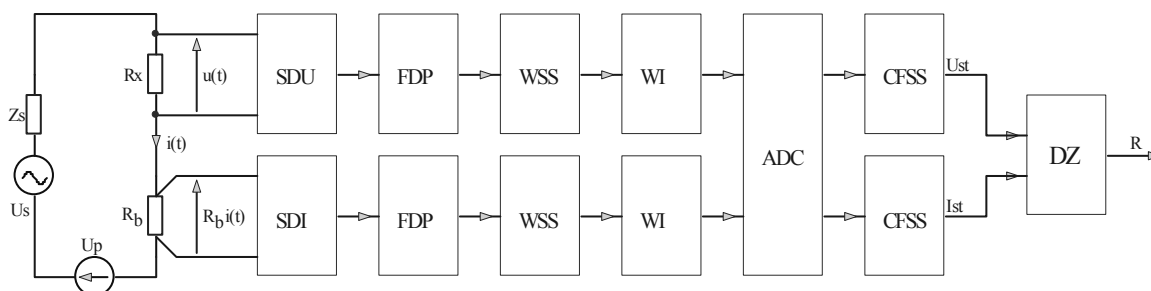
Oznaczenia:

R_x – mierzone uzwojenie, R_b – bocznik pomiarowy, FDP – filtr dolnoprzepustowy, DZ – dzielnik

Największą trudnością do pokonania w wyznaczaniu składowych stałych jest ich mała wartość w stosunku do wartości składowych przemiennej o częstotliwości sieciowej. Stosunek składowej przemiennej o częstotliwości sieciowej do mierzonej składowej stałej może być rzędu tysięcy. Przykładowo w przypadku maszyny trójfazowej o uzwojeniach połączonych w trójkąt zasilanej z sieci 400 V wartość chwilowa napięcia na uzwojeniu może się zmieniać w granicach ± 600 V zaś mierzona wartość składowej stałej nie przekracza 0,3 V. Podobne proporcje występują w przypadku przebiegu mierzonego prądu. Tak duże stosunki składowej zmiennej do stałej ograniczają możliwość bezpośredniego przetwarzania cyfrowego mierzonych przebiegów ze względu na ograniczoną rozdzielczość przetwornika A/C. Utrudnione też byłoby oddzielenie galwaniczne wejść przetwornika A/C i reszty przyrządu od mierzonych obwodów energetycznych ze względu na ograniczoną dynamikę dostępnych wzmacniaczy izolacyjnych.

Pokonanie obu ograniczeń jest możliwe poprzez zrealizowanie przynajmniej częściowej filtracji składowej sieciowej w technice analogowej na wejściach

torów pomiarowych (przed wzmacniaczami izolacyjnymi). Prowadzi to do struktury torów pomiarowych przedstawionej na rys. 6.



Rys. 6. Zaproponowana struktura toru torów pomiarowych prądu i napięcia

Oznaczenia:

SDU – stopień dopasowujący napięcia, SDI – stopień dopasowujący prądu, FDP – filtr dolnoprzepustowy, WSS – wzmacniacz składowej stałej, WI – wzmacniacz izolacyjny, ADC – przetwornik analogowo-cyfrowy, CFSS – cyfrowy filtr składowej stałej, DZ – dzielnik składowych stałych

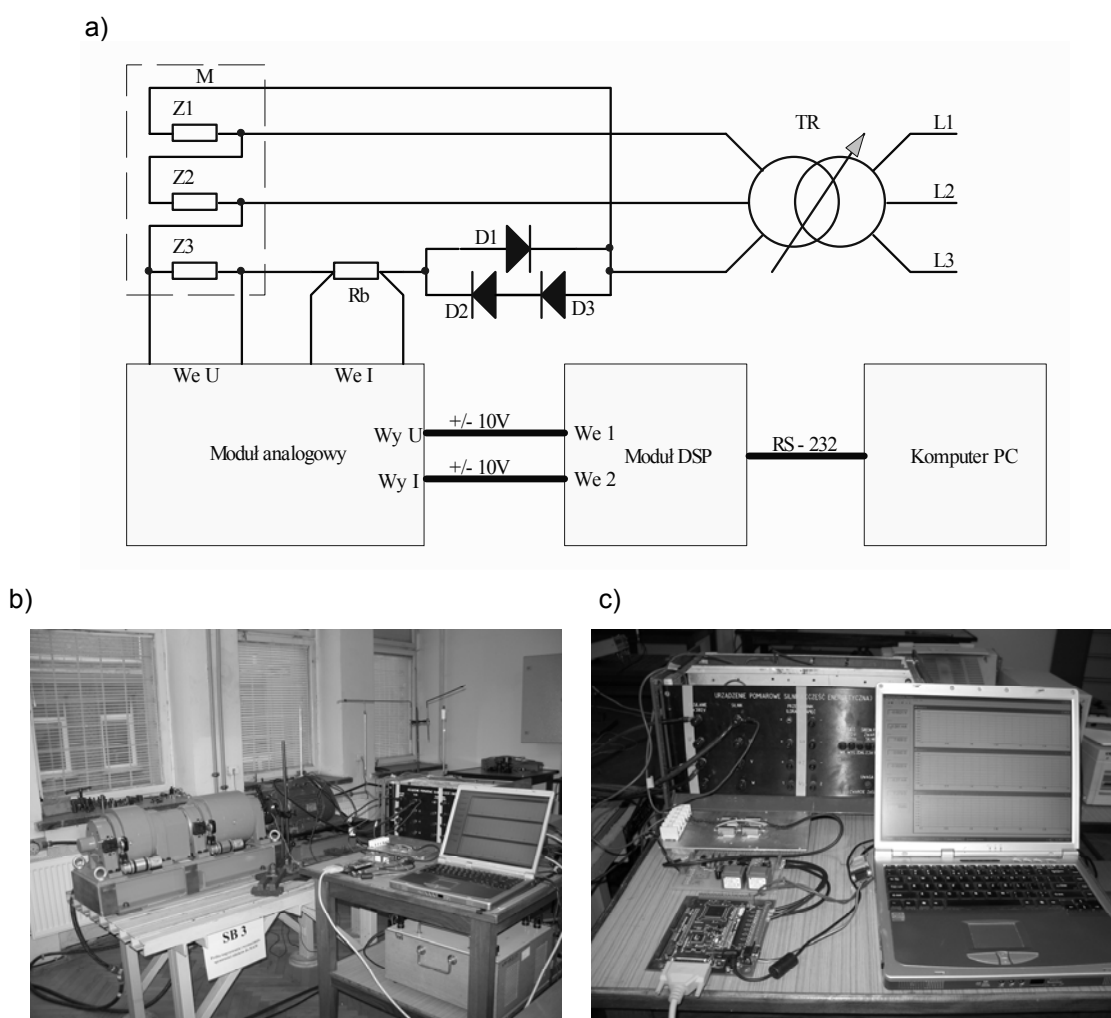
Na wejściach obu torów pomiarowych znajdują się stopnie dopasowujące poziomo przetwarzanych sygnałów do standardowego zakresu ± 10 V. Są one różne dla toru napięciowego i prądowego. Stopień wejściowy toru napięciowego odznacza się dużą impedancją wejściową, zakresem napięć wejściowych wynoszącym ± 600 V i wzmocnieniem wynoszącym $1/60$. Redukuje on mierzoną składową stałą ze spodziewanej wartości $0,3$ V do 5 mV. Stopień wejściowy toru prądowego ma zakres sygnału wejściowego dopasowany do napięcia z bocznika pomiarowego ± 1 V (w modelowym rozwiązaniu zastosowano bocznicnik 10 A/ 500 mV) oraz wzmocnienie napięciowe wynoszące 10 . Zatem jeżeli składowa stała na wejściu jest rzędu 5 mV, to na wyjściu wyniesie ona 50 mV. Wprowadzenie stopni dopasowujących na wejściach obu torów pomiarowych pozwoliło na zbudowanie w obu kanałach identycznych filtr dolnoprzepustowych. Filtry te redukują składową zmienną o częstotliwości sieciowej do wartości nie przekraczającej kilku procent składowej stałej. Kolejny stopień w obu kanałach pomiarowych stanowią wzmacniacze składowej stałej. Ich zadaniem jest dopasowanie wartości sygnałów ze zredukowaną składową zmienną do zakresu poziomów wejściowych wzmacniaczy izolacyjnych. Wstępnie przetworzone sygnały pomiarowe poprzez wzmacniacze izolacyjne i układy przesuwania poziomu (nie uwzględnione na rysunku) są doprowadzane do wejść dwunastobitowego przetwornika AC, który próbkuje je z częstotliwością 800 Hz i zamienia na postać cyfrową.

W części cyfrowej z przebiegów prądu i napięcia wyodrębnia się składową stałą za pomocą pary filtrów FIR o współczynnikach opisanych okienkiem

Hanninga o rozpiętości czasowej wynoszącej 65536 okresy próbkowania tj. ok. 82 s. Zgodnie z założeniami oraz wyznaczonych składowych stałych stanowi wynik pomiaru rezystancji uzwojenia.

4. PRÓBY LABORATORYJNE

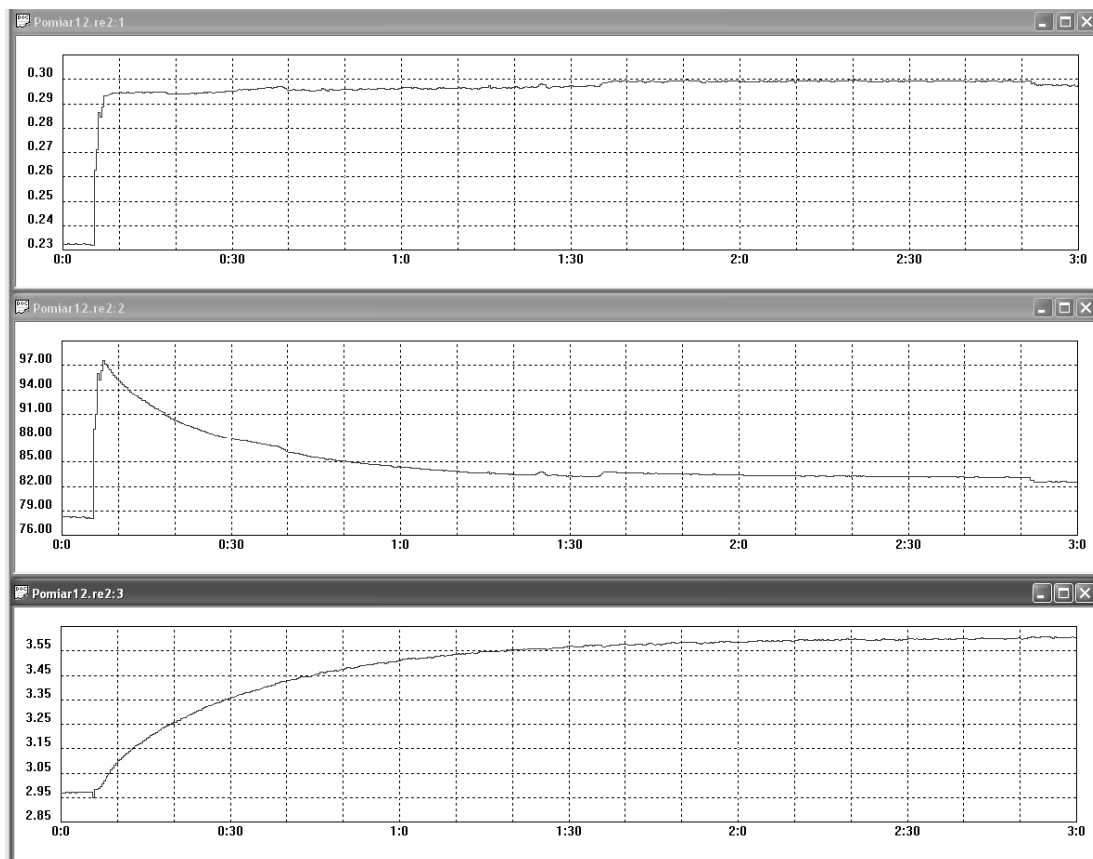
W celu praktycznej weryfikacji zaprezentowanej wcześniej koncepcji układu pomiarowego zbudowano model przetwornika rezystancji uzwojenia i poddano go próbom laboratoryjnym. Na rysunku 7 przedstawiono schemat blokowy i zdjęcia stanowiska laboratoryjnego.



Rys. 7. Stanowisko laboratoryjne do pomiaru przyrostu temperatury uzwojeń maszyny indukcyjnej w czasie pracy. a) schemat blokowy b) widok ogólny: po lewej hamownia z badaną maszyną, po prawej model przetwornika rezystancji uzwojeń, c) zbliżenie modelu przetwornika rezystancji uzwojeń: z lewej od dołu moduł DSP, powyżej moduł z analogowymi torami pomiarowymi, z prawej komputer PC z uruchomionym programem rejestrującym wyniki pomiarów.

Model przetwornika wykonano w postaci dwóch modułów: analogowego zawierającego analogową część torów pomiarowych prądu i napięcia wg. rys. 6, oraz cyfrowego zawierającego mikrokontroler DSP TMS320F2812, na którym uruchomiono oprogramowanie realizujące algorytmy pomiarowe opisane w rozdz. 2. Wyniki pomiarów z procesora DSP przesyłano na bieżąco łączem szeregowym RS-232 do komputera PC, który je archiwizował i udostępniał operatorowi w postaci odczytów i rysowanych na bieżąco wykresów.

W celu sprawdzenia poprawności działania przetwornika pomiarowego w rzeczywistych warunkach pracy użyto go do pomiaru rezystancji uzwojenia stojana podczas próby nagrzewania silnika indukcyjnego. Uzyskane przebiegi składowych: stałych napięcia i prądu, oraz rezystancji uzwojenia przedstawiono na rys. 8.

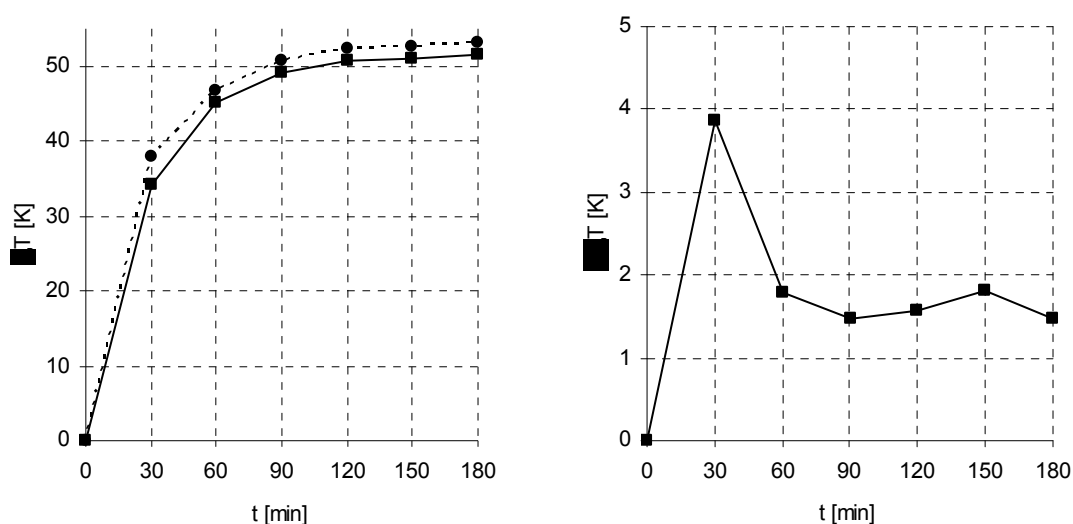


Rys. 8. Rejestracja próby nagrzewania silnika dokonana za pomocą modelu przetwornika rezystancji uzwojenia: góry wykres – składowa stała napięcia na uzwojeniu w V, środkowy wykres – składowa stała prądu w uzwojeniu mA, dolny wykres – zmierzona rezystancja uzwojenia w Ω , oś czasu na wszystkich wykresach w godz.:min.

W celu wyznaczenia rezystancji uzwojenia w stanie zimnym na początku próby zasilano silnik znacznie obniżonym napięciem (ok. 20 V), przy którym

przez uzwojenie przepływał prąd o wartości na tyle małej, że nie powodował jego szybkiego nagrzewania. Prąd ten jednak wystarczył do wytworzenia przez dwójnik diodowy składowej stałej o wartości wystarczającej do pomiaru rezystancji. W dalszej części próby napięcie podniesiono do wartości znamionowej $U_N = 400 \text{ V}$ i obciążono badany silnik znamionowym momentem wymuszającym pracę silnika przy znamionowej mocy elektrycznej.

Na podstawie zmierzonych rezystancji wyznaczano przyrosty temperatury w równych odstępach czasu (co 30 min), aż do osiągnięcia przez silnik stanu cieplnie ustalonego. Wyniki te porównano ze zmierzonymi dwa dni wcześniej za pomocą mostka MTME-101 podczas próby grzania tej samej maszyny w maksymalnie zbliżonych warunkach. Na rysunku 9 przedstawiono wyniki obu pomiarów.



Rys. 9. Porównanie wyników pomiarów przyrostu temperatury wykonanych mostkiem MTME-101 i badanym modelem przetwornika rezystancji uzwojenia:

a) wykres przyrostów temperatury uzwojenia zmierzonych co 30 min, linia przerywana – mostek MTME, linia ciągła model przetwornika, b) wykres różnicy wyników pomiarów mostka i modelu przetwornika

Przyrosty temperatury zmierzone modelem przetwornika są o kilka stopni mniejsze niż zmierzone mostkiem MTME-101. Przyczyną powyższych różnic może być inny sposób wprowadzania składowej stałej podczas obu pomiarów. Podczas pomiarów mostkiem składowa stała włączana była jedynie na czas pomiaru ok. 2 min, ale miała znaczną wartość co mogło być przyczyną zawyżenia wyników. Z kolei podczas próby z modelem przetwornika dwójnik diodowy co prawda był włączony na stałe ale generowana przez niego składowa stała wносиła ok. 1 % wartości znamionowej prądu uzwojenia. Z kolei spadek napię-

cia składowej zmiennej na dwójniku mógł spowodować znaczące zmniejszenie wartości skutecznej prądu płynącego przez uzwojenie a tym samym zmniejszyć straty i przyrost temperatury uzwojenia

5. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w referacie koncepcja oraz wyniki badań laboratoryjnych modelu przetwornika rezystancji uzwojenia stanowią dobry punkt wyjścia do konstrukcji miernika przyrostu temperatury uzwojenia. W przyrządzie tym należałoby raczej zrezygnować z zastosowania dwójnika diodowego na rzecz źródła prądu stałego włączanego jedynie na czas pomiaru. Ponadto wyposażenie przyrządu w czujniki temperatury otoczenia pozwoliłoby na bezpośredni odczyt przyrostu temperatury a nie jak dotąd zmian rezystancji.

LITERATURA

1. PN/EN 60034-1:2005, „Maszyny elektryczne wirujące – część 1: Dane znamionowe i parametry”.
2. PN-90 E-06729 „Pomiar rezystancji uzwojenia prądu przemiennego metodą superpozycji”.
3. Szczepaniak Cz.: „Układ przetwornika rezystancji uzwojeń na napięcie stałe silników indukcyjnych i transformatorów pod napięciem”, Patent PRL, nr 133.340 z dn. 5.07.82 r.
4. Szczepaniak Cz.: „Stetige Messung des Wickungswiderstandes von Asynchronmotoren und Transformatoren während des Betriebes“, SEV Bulletin nr 23, 1984r.
5. Szczepaniak Cz.: „Przetwornik rezystancji uzwojeń silników asynchronicznych podczas pracy – teoria działania”, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 182, str. 71-110, 1994.
6. Zapaśnik R.: „Pomiar przyrostu temperatury uzwojeń maszyn elektrycznych prądu zmiennego metodą oporową w czasie pracy maszyny”, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 22, str. 100-114, 1959 r.
7. Zapaśnik R.: „Pomiary przyrostu temperatury uzwojeń maszyn prądu zmiennego”, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 2, str. 40-42, 1960 r.
8. Zapaśnik R.: „Bestimmung der Ubertemperatur der Ständerwicklungen von Induktionsmotoren nach dem Widerstands-Superpositionsverfahren“, XIII. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Heft 6 Elektrische Maschinen 1968r.

9. Zapaśnik R.: „Wyznaczanie przyrostów temperatury uzwojeń stojanów silników indukcyjnych superpozycyjną metodą oporową”, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 61, str. 65-94, 1970 r.
10. Zapaśnik R.: „Bestimmung der Ubertemperatur der Ständerwicklungen von Asynchronmotoren während des Betriebes“, EMA. Elektrische Maschinen z.12 1981r.

Rękopis dostarczono, dnia 05.03.2007 r.

Opiniował: dr hab. inż. Ryszard Zapaśnik, prof. IEL

THE MEASUREMENT OF MACHINES WINDING RESISTANCE IN RUN

Czesław SZCZEPANIAK
Antoni KRAHEL
Elżbieta OGONOWSKA-SZWEITZER

ABSTRACT *This article present the measurement method of the temperature rise of an induction motor winding and description measurement instrument model designed for this purpose. The comparison of laboratory tests mode using presented instrument model and reference instrument MTME – 101 is included in this paper.*