

Mariusz BARAŃSKI\*

## **STANOWISKO DO BADANIA I ANALIZY WPLYWU TEMPERATURY NA PRZEBIEG ZJAWISK ELEKTROMAGNETYCZNYCH W SILNIKU INDUKCYJNYM**

W artykule zaprezentowano stanowisko do badania wpływu temperatury na przebieg niestabilnych stanów elektromagnetycznych silnika indukcyjnego klatkowego. Omówiono opracowaną w środowisku LabVIEW aplikację do pomiaru i analizy wielkości elektromagnetycznych i cieplnych. Aplikacja współpracuje z analogowo-cyfrową kartą pomiarową PCI do pomiaru, akwizycji i wizualizacji napięć, prądów, momentu elektromagnetycznego, prędkości obrotowej oraz temperatury wybranych podzespołów badanego silnika indukcyjnego klatkowego. Przedstawiono rezultaty badań laboratoryjnych wybranych stanów pracy trójfazowego silnika klatkowego.

### **1. WPROWADZENIE**

Silniki indukcyjne z wirnikiem klatkowym mają bardzo szerokie zastosowania w technice. Produkuje się je masowo. Najczęściej są one stosowane w napędach przemysłowych o nieregulowanej oraz regulowanej prędkości obrotowej. Wynika to między innymi z niskiej ich ceny, stosunkowo dużej niezawodności, wysokiej sprawności czy dużej przeciążalności. Obserwuje się ciągłe dążenie konstruktorów i producentów tych silników do poprawy ich właściwości ruchowych. Polepszane są parametry funkcjonalne charakteryzujące zarówno ustalone jak i niestabilne stany pracy [1, 2]. Do parametrów tych należą m.in. wysoka sprawność, współczynnik mocy, małe stałe czasowe, duża przeciążalność, moment rozruchowy. Wadą silników indukcyjnych jest stosunkowo mały współczynnik mocy. W celu poprawy tych parametrów wykorzystuje się programy komputerowe. Programy te służą nie tylko do analizy przetworników elektromagnetycznych, komputerowego wspomaganie projektowania czy obsługi systemów grafiki komputerowej, ale również do tworzenia systemów pomiarowych, sterowania nimi, akwizycji danych czy analizy wyników. Do pierwszej grupy możemy zaliczyć między innymi: Matlab, Maxwell SV czy systemy CAD [3]. Natomiast grupę programów do pomiarów, obliczeń i analizy otrzymywanych wyników stanowi coraz szerzej wykorzystywane środowisko LabVIEW [4, 5, 6, 7].

---

\* Politechnika Poznańska.

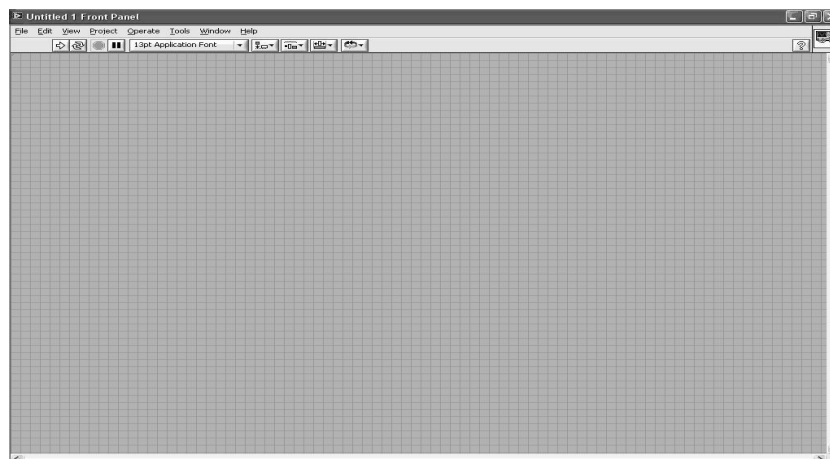
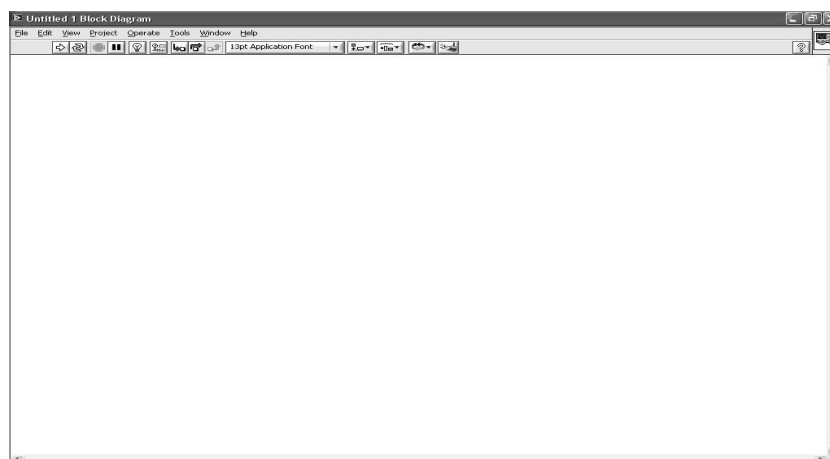
## 2. ZINTEGROWANE ŚRODOWISKO PROGRAMISTYCZNE LABVIEW

Współczesne systemy pomiarowe wyposażone w komputery PC oraz w specjalistyczne oprogramowanie, umożliwiają przeprowadzanie pomiaru, sterowania, akwizycji, wizualizacji oraz archiwizacji danych, przy wykorzystaniu wirtualnych obiektów. Jednym z takich oprogramowań jest zintegrowane środowisko programistyczne LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), produkt firmy National Instruments Corporation (NI). Firma NI oferuje nie tylko programy komputerowe, ale również oprzyrządowanie jak na przykład karty pomiarowe, urządzenia i czujniki potrzebne do wykonywania pomiarów. Pierwsza wersja środowiska LabVIEW została wprowadzona w 1986 roku i pracowała jedynie na komputerach Apple Macintosh. Spowodowane było to faktem, że tylko te komputery dysponowały graficznym interfejsem użytkownika systemu operacyjnego. Obecnie w środowisku LabVIEW można pracować praktycznie na każdym popularnym systemie operacyjnym [4].

Środowisko LabVIEW oparte jest na graficznym języku *G*. Programowanie w języku *G* nie wymaga od użytkownika tworzenia kodu jak to ma miejsce w konwencjonalnych językach programowania (np. C#, C++, Java) [5]. Cały kod tworzonej aplikacji opiera się na komponentach prezentowanych w postaci symboli graficznych połączonych ze sobą przewodami, podobnie jak w środowisku Matlab. Pod pojęciem przewodów rozumie się drogę oraz kierunek przepływu danych pomiędzy poszczególnymi komponentami. Środowisko LabVIEW zawiera bogatą bibliotekę komponentów. Korzystając z jej zasobów można zrealizować praktycznie każdą żadaną konfigurację. Jeżeli użytkownik potrzebuje użyć komponentu, który nie znajduje się w bibliotece środowiska, może przy wykorzystaniu języka wysokiego poziomu, na przykład języka C++, utworzyć potrzebny element.

Aplikacja utworzona w środowisku LabVIEW składa się z dwóch głównych elementów składowych. Pierwszym z nich jest *Front Panel*, stanowiący interfejs danych wejściowych i wyjściowych (rys. 1). Okno *Front Panel* umożliwia w głównej mierze wizualizację otrzymanyh wyników np. z pomiarów oraz kontrolowanie przebiegu procesu pomiaru. Natomiast drugim elementem stanowiącym całość aplikacji jest okno *Block Diagram* (rys. 2.2), które odpowiada przede wszystkim za sposób działania aplikacji.

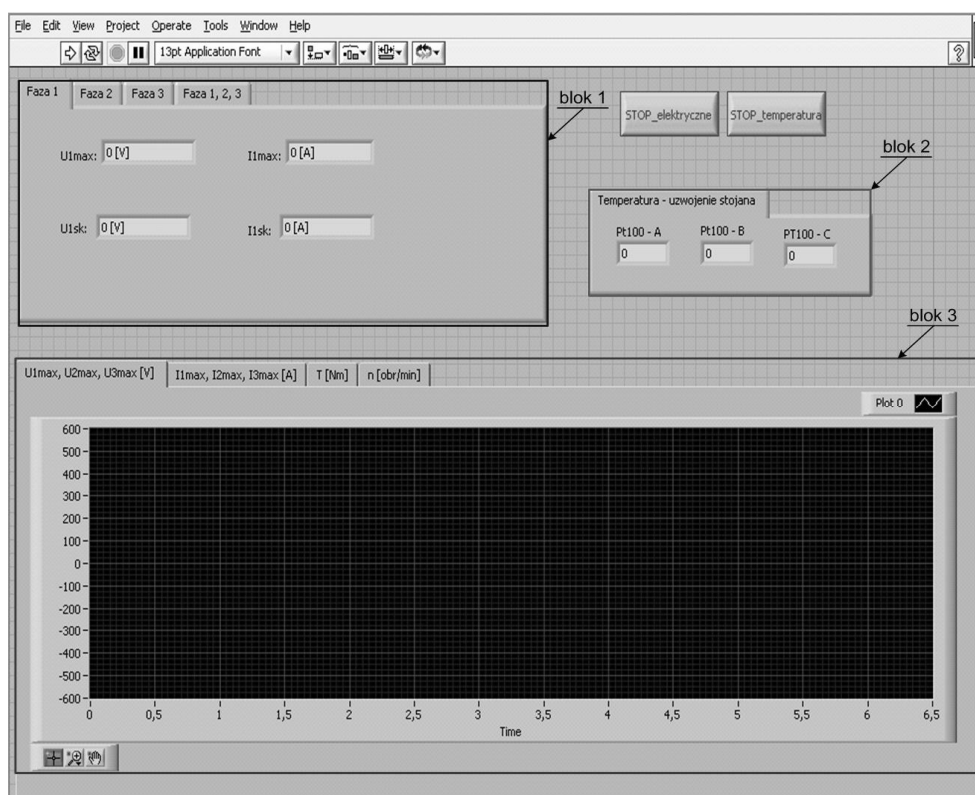
W oknie *Block Diagram* (rys. 2) zawarty jest graficzny kod programu realizującego funkcje przyrządu wirtualnego (*VI*). Graficzny kod programu stanowi odzwierciedlenie poszczególnych obiektów wejścia i wyjścia umieszczonych w panelu frontowym. Programowanie w tym oknie jest najważniejszą częścią dla projektanta, wykonawcy aplikacji. Dostęp do niej jest możliwy jedynie wówczas, gdy program nie jest uruchomiony. Podczas działania aplikacji, dokonanie jakichkolwiek zmian jest niemożliwe.

Rys. 1. Okno panelu frontowego – *Front Panel*Rys. 2. Okno diagramu blokowego – *Block Diagram*

Środowisko LabVIEW pozwala nie tylko na wykonywanie aplikacji do przeprowadzania pomiarów. Umożliwia on również między innymi tworzenie systemów SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), które pozwalają sterować procesem technologicznym, bądź pojedynczym urządzeniem. Mając stworzony panel kontrolny w środowisku LabVIEW można sterować rzeczywistym urządzeniem, pod warunkiem, że jest wyposażone w interfejs RS-232C. Możliwe jest również sterowanie urządzeniem przy wykorzystaniu łącz bezprzewodowych, na przykład Bluetooth czy IRDA.

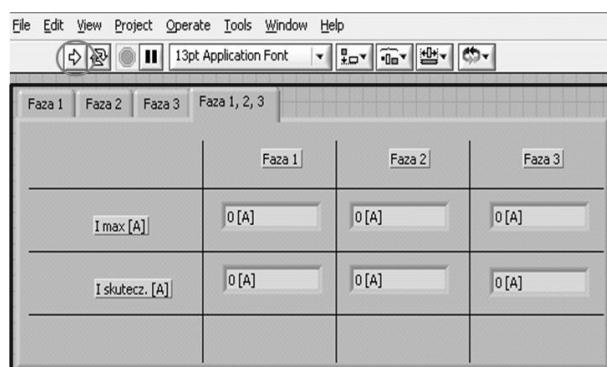
### 3. APLIKACJA DO POMIARU I ANALIZY WIELKOŚCI ELEKTROMAGNETYCZNYCH I CIEPLNYCH

Na rysunku 3 przedstawiono interfejs użytkownika aplikacji (*Front Panel*) do pomiaru, analizy i archiwizacji wielkości elektromagnetycznych i cieplnych napisanej w środowisku LabVIEW 8.6. Warstwę logiczną aplikacji (*Block Diagram*) zamieszczono na rysunku 4.



Rys. 3. Interfejs użytkownika w LabVIEW 8.6

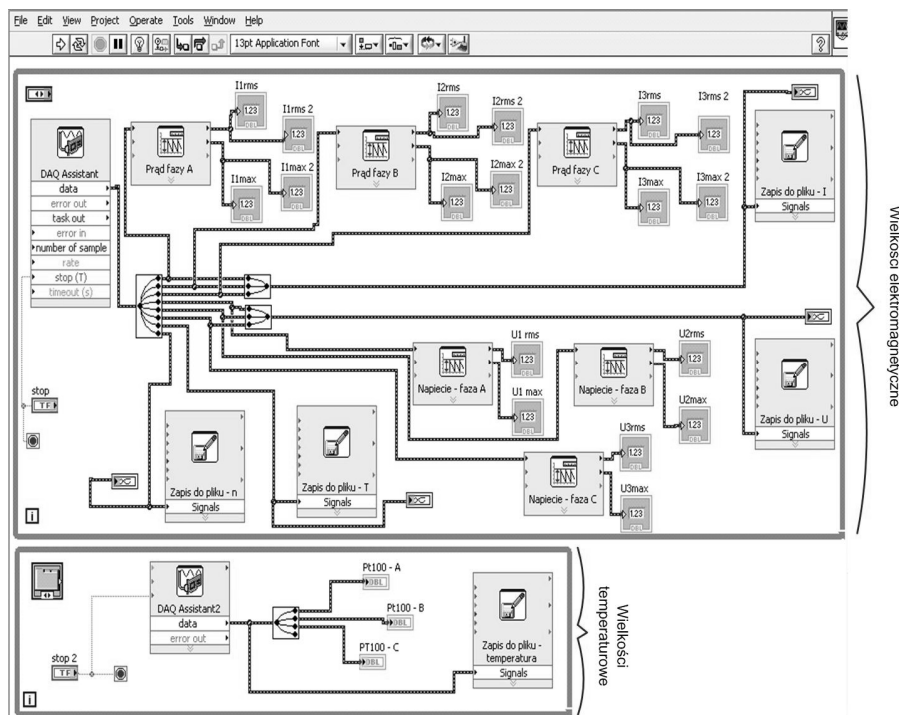
Interfejs użytkownika zawiera trzy główne pola, umownie nazwane przez autora blokami 1, 2 i 3. Pierwszy z nich, oznaczony na rysunku 3 kolorem niebieskim (blok 1), to blok, w którym znajdują się zakładki umożliwiające wyświetlanie mierzonych wartości maksymalnych i skutecznych prądów oraz napięć poszczególnych uzwojeń badanego silnika. Ostatnia zakładka w tym bloku, prezentuje zestawienie wartości maksymalnych i skutecznych wszystkich prądów badanego silnika (rys. 4)



Rys. 4. Okno reprezentujące zestawienie wartości mierzonego prądu

Blok 2, oznaczony kolorem zielonym na rysunku 3, wyświetla wartości mierzonej temperatury w wybranych punktach uzwojenia stojana. Sposób i miejsce pomiaru temperatury w silniku klatkowym, przedstawiono w rozdziale 4 artykułu. Ostatni blok, przedstawiony na rysunku 3 i oznaczony kolorem czerwonym, umożliwia wizualizację rejestrowanych przebiegów.

Przedstawiony i omówiony powyżej interfejs użytkownika jest jedną z dwóch głównych struktur aplikacji środowiska LabVIEW. Drugą strukturą jest warstwa logiczna (rys. 5). Obie struktury stanowią całość. Na rysunku 5 przedstawiono graficzny kod programu aplikacji do pomiaru i analizy wielkości elektromagnetycznych i cieplnych. Stanowi on odzwierciedlenie poszczególnych obiektów wejścia i wyjścia umieszczonych w panelu frontowym (interfejs użytkownika). Wykorzystane w nim komponenty zamieszczono w pętli *while* – komponent *WhileLoop*. W przedstawionej przez autora aplikacji, zastosowanie komponentu *WhileLoop* umożliwia rejestrację oraz zapis mierzonych wielkości do pliku, do momentu zatrzymania całego procesu. Uruchomienie aplikacji odbywa się za pomocą przycisku *Run*, zaznaczonego kółkiem na rysunku 4. Zatrzymanie procesu umożliwiają przyciski *STOP* znajdujące się w oknie *Front Panel* (rys.3.1). W celu zintegrowania części fizycznej stanowiska pomiarowego z jego częścią wirtualną, wykorzystuje się komponent *DAQ Assistant* (rys. 5). Umożliwia on m.in. wybór karty pomiarowej, rodzaju sygnału, nastawę częstotliwości i liczbę zapisywanych próbek. Zapisywanie rejestrowanych wyników, w celu dalszej ich edycji, umożliwia komponent *Write To Measurement Files* (komponenty Zapis do pliku – I, ..., na rys. 5). Komponent *Amplitude and Level Measurements* (komponenty: Prąd faza A, ..., Napięcie – faza A, ..., na rys. 5), pozwalają na pomiar wartości maksymalnej i skutecznej rejestrowanych wielkości.



Rys. 5. Warstwa logiczna aplikacji w LabVIEW 8.6

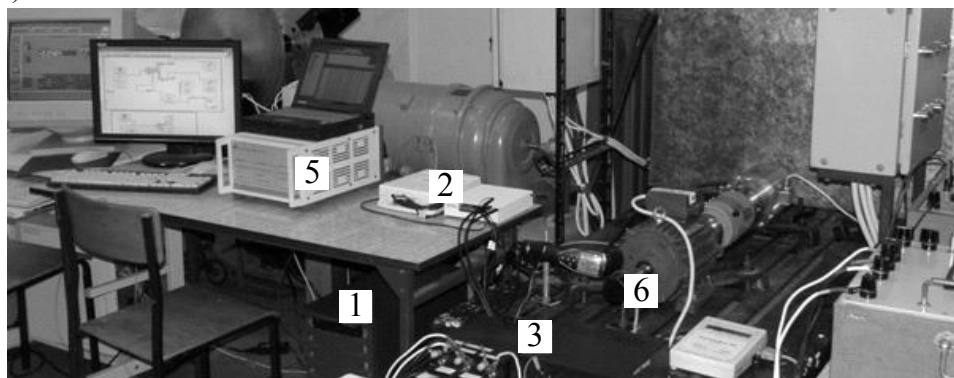
Pomierzone wielkości elektromagnetyczne i ciepne wyświetlane są w dwóch postaciach: wartości liczbowe przy wykorzystaniu komponentu *Numeric Indicator* (komponenty:  $U_{max1}$ , ...,  $I_{rms1}$ , ..., Pt100 – A, na rys. 5) oraz jako przebiegi za pomocą komponentu *Waveform Graph*.

#### 4. STANOWISKO POMIAROWE

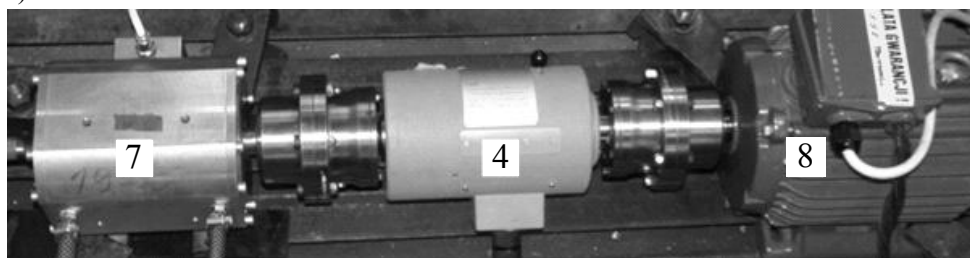
Na rysunku 6 pokazano stanowisko pomiarowe zbudowane w laboratorium Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej. Umożliwia ono pomiar, archiwizację i wizualizację przebiegów: prądów, napięć, momentu obrotowego na wale, prędkości obrotowej wirnika, temperatury wybranych podzespołów silnika, rezystancji uzwojeń pod obciążeniem. Składa się ono m.in. z zestawu komputerowego (1) wyposażonego w dwie analogowo-cyfrowe karty pomiarowe PCI firmy National Instruments wraz z modułami (2), zestawu przetworników (3) napięć i prądów typu LEM, głowicy (4) do pomiaru momentu typu TK F.N.r.G67308 współpracującej ze wzmacniaczem pomiarowym (5) DMCplus firmy Hottinger Baldwin Messtechnik, enkodera (6) do pomiaru prędkości, hamulca z cieczą magnetoreologiczną (7),

badanego silnika indukcyjnego klatkowego typu Sg 100L-4B o mocy 3 kW firmy Tamel S.A. (8). Silnik zasilany jest z trójfazowego regulatora indukcyjnego.

a)



b)

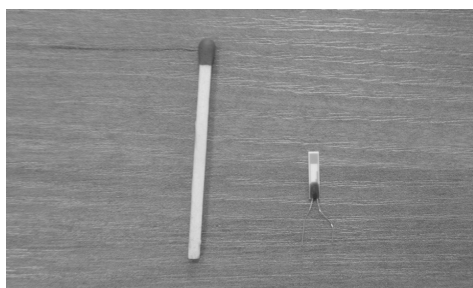


Rys. 6. Stanowisko pomiarowe: a) widok ogólny, b) silnik (8) z głowicą pomiarową momentu (4) i hamulcem magnetoreologicznym (7)

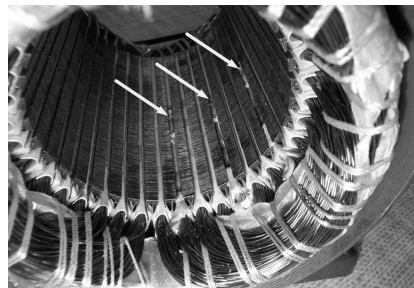
Stanowisko umożliwia również pomiar temperatury uzwojenia stojana oraz pierścienia uzwojenia klatkowego. Temperaturę uzwojenia stojana wyznaczano na podstawie pomiaru jego rezystancji pod obciążeniem. Do pomiaru rezystancji pod obciążeniem wykorzystano mostek typu MTME (rys. 7). Natomiast do pomiaru temperatury trzech cewek należących do różnych uzwojeń fazowych wykorzystano czujniki temperatury PT100 (rys. 8). Czujniki te umieszczono w połowie długości żłobków i rozmieszczono wzdłuż obwodu pakietu stojana jak wskazano strzałkami na rys. 9. Czujniki temperatury połączone przez moduł SCC-RTD01 firmy National Instruments ze stanowiskiem komputerowym. Temperaturę powierzchni pierścienia uzwojenia klatkowego wirnika mierzono za pomocą bezdotykowego pirometru firmy Testo połączonego przez port USB z komputerem sterującym stanowiskiem pomiarowym. Wiązka pomiarowa pirometru wnikała do wnętrza silnika przez niewielki otwór wykonany w tarczy łożyskowej silnika (rys. 10).



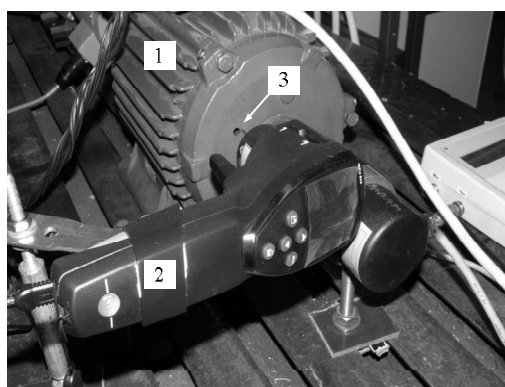
Rys. 7. Mostek MTME do pomiaru rezystancji uzwojenia pod obciążeniem



Rys. 8. Czujnik temperatury PT100



Rys. 9. Stożan z czujnikami PT100



Rys. 10. Pomiar temperatury pierścienia za pomocą pirometru bezdotykowego: 1 – silnik, 2 – pirometr, 3 – otwór w tarczy łożyskowej



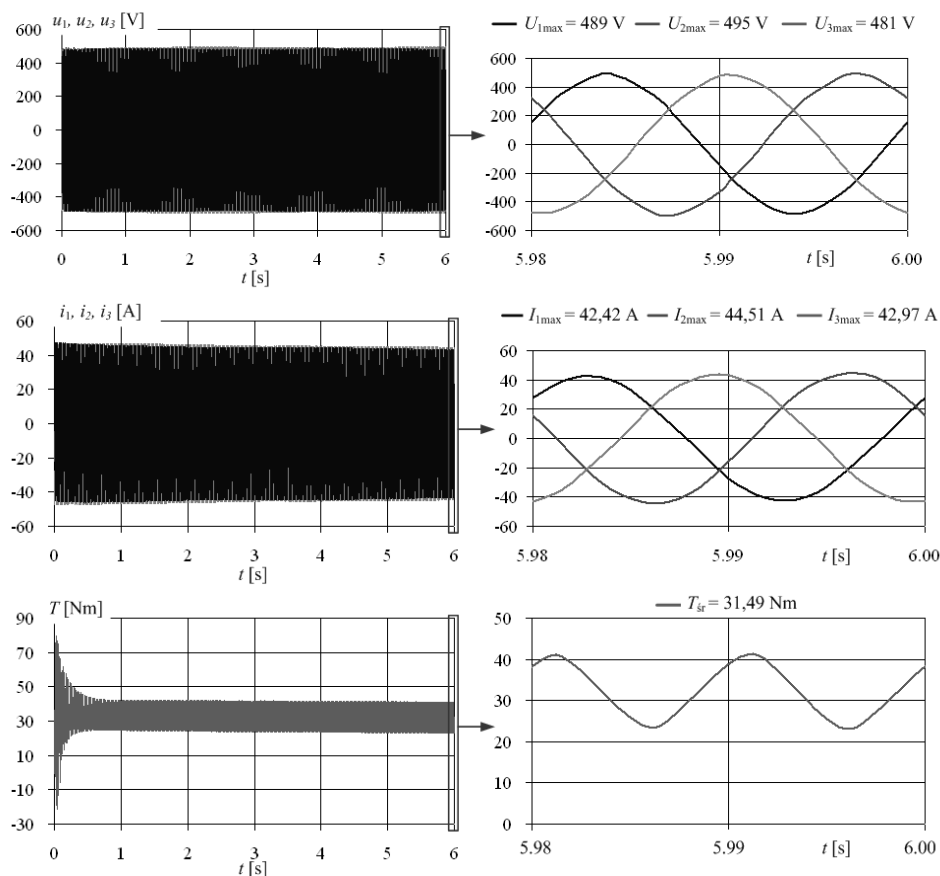
## 5. REZULTATY BADAŃ LABORATORYJNYCH

W celu oceny przydatności opisanego w rozdziale 4 artykułu stanowisk do badania wpływu temperatury na przebieg nieustalonych stanów elektromagnetycznych silnika indukcyjnego klatkowego, wykonano testy. Badano rozruch bezpośredni trójfazowego silnika klatkowego przy obciążeniu wału momentem pasywnym  $T_o = 12 \text{ Nm}$  oraz stan zwarcia, tj. pracę silnika z zahamowanym wirnikiem oraz zdemontowanym wentylatorze [8]. Z uwagi na dużo większą dynamikę zjawisk cieplnych zachodzącą w stanie zwarcia niż podczas rozruchu, autor w pracy przedstawił wybrane wyniki z pomiarów w tym stanie pracy silnika. Czas pomiarów wynosił  $t_p = 6 \text{ s}$ . Ze względu na przyjętą na wykresach skalę czasu przebiegi napięć, prądów i momentu na wale silnika są mało czytelne. Dlatego, w celu lepszej wizualizacji przebiegów napięć, prądów i momentu na wale silnika zamieszczono dodatkowe wykresy z odpowiednio dobraną skalą czasu. Przedstawiają one przebiegi w ostatnim rozpatrywanym okresie napięcia zasilającego.

Podczas pomiarów rejestrowano przebiegi napięć zasilających  $u_1, u_2, u_3$ , prądów  $i_1, i_2, i_3$  w uzwojeniach, momentu elektromagnetyczny  $T$  na wale, rezystancji uzwojenia fazowego stojana, przyrostu temperatury uzwojenia, średniego przyrostu temperatury pręta klatki wirnika oraz średniego przyrostu temperatury w obszarze szczyrbinki żłobka stojana dla napięcia zasilania o amplitudzie  $U_{1m} = 495 \text{ V}$  i  $n = 0 \text{ obr/min}$ . Na rysunku 11 przedstawiono zarejestrowane przebiegi napięć zasilających badany silnik, prądy w uzwojeniach silnika oraz moment elektromagnetyczny. Ze względu na rejestrację przebiegów napięć i prądów przy ich opisie podawane są amplitudy przebiegów, a nie ich wartości skuteczne. Przebiegi napięcia zasilającego charakteryzują się pewną asymetrią. Największa różnica między wartościami maksymalnymi napięć międzyfazowych wynosi ok. 14 V. Natomiast asymetria fazowa przebiegów nie przekracza  $8^\circ$ .

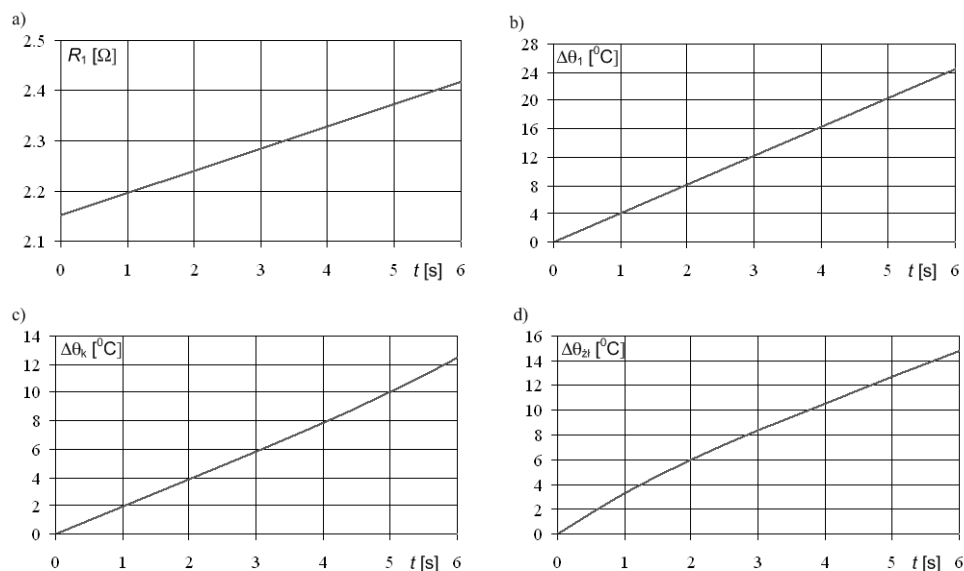
Na rysunkach 12 zamieszczono przebiegi rezystancji  $R_1$  uzwojenia i przyrostu temperatury  $\Delta\theta_1$  wybranego uzwojenia fazowego stojana, średniego przyrostu temperatury uzwojenia klatkowego  $\Delta\theta_k$ , oraz średniego przyrostu temperatury  $\Delta\theta_{z1}$ , pomierzonego w obszarze szczyrbinek żłobków stojana, w których umieszczono czujniki temperatury.

Rezystancję uzwojenia fazowego mierzono pod obciążeniem za pomocą mostka MTME. Stwierdzono, że po 6 sekundach trwania stanu zwarcia przy napięciu zasilania 495 V względny przyrost rezystancji wynosił ok. 12 % (rys. 12a). Na podstawie zmierzonej rezystancji wyznaczono przyrost temperatury  $\Delta\theta_1$  uzwojenia. Przebieg tego przyrostu przedstawiono na rysunku 12b. Zależy one od czasu trwania zwarcia i napięcia zasilania. Na podstawie pomiarów uzyskano, że dla napięcia zasilania 495 V po 6 sekundach zwarcia temperatura uzwojenia fazowego stojana wzrosła o  $24^\circ\text{C}$ .



Rys. 11. Przebiegi: a) napięć międzyfazowych b) prądów fazowych stojana oraz c) momentu na wale silnika dla  $U_{lm} = 495$  V,  $n = 0$  obr/min

W silniku klatkowym nie ma możliwości bezpośredniego pomiaru temperatury prętów uzwojenia klatkowego. Dlatego na stanowisku za pomocą pirometru mierzono jedynie przyrost temperatury  $\Delta\theta_k$  powierzchni pierścienia zawierającego pręty (rys.5.2c). Czujniki PT100 mierzące temperaturę w żłobkach stojana umieszczono w obszarze szczybinek tuż przy powierzchni uzwojenia (rys. 4.4). Za pomocą trzech takich czujników mierzono temperaturę w żłobkach zawierających cewki należące do różnych uzwojeń fazowych. Na podstawie tych pomiarów wyznaczono przebiegi średniego przyrostu temperatury  $\Delta\theta_{zl}$  w obszarze szczybinki żłobkowej dla zadanych napięć zasilających silnik (rys.5.2d). Z porównania przebiegów  $\Delta\theta_{zl}$  z przebiegami przyrostu  $\Delta\theta_1$  temperatury uzwojenia wynika, że zgodnie z przewidywaniami w obszarze szczybinki przyrost temperatury jest mniejszy niż w uzwojeniu.



Rys. 12. Przebiegi: a) rezystancji uzwojenia fazowego stojana, b) przyrostu temperatury uzwojenia, c) średniego przyrostu temperatury pręta klatki wirnika oraz d) średniego przyrostu temperatury w obszarze szczyrbinki żłobka stojana dla  $U_{1m} = 495$  V,  $n = 0$  obr/min

## 6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono i przetestowano stanowisko pomiarowe do badania wpływu temperatury na przebieg nieustalonych stanów elektromagnetycznych silnika indukcyjnego klatkowego. Omówiono aplikację napisaną przez autora w środowisku LabVIEW 8.6, współpracującą z analogowo-cyfrowymi kartami pomiarowymi. Zaprezentowaną w artykule aplikację jak i stanowisko pomiarowe można rozbudować. Aplikację np. o analizę wyższych harmonicznych w przebiegach napięć i prądów w uzwojeniach stojana. Z kolei na stanowisko pomiarowe o aparaturę do badania rozszerzalności cieplnej wybranych podzespołów maszyny. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że mimo niewielkiego średniego przyrostu temperatury w całym obszarze maszyny, jej lokalny przyrost może być znaczny.

## LITERATURA

- [1] Takorabet N., Laporte B., Mezani S.: An approach to compute saturated induction motors in steady state, Proc of IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf. (IEMDC'03), San Antonio, USA, Vol. 2, pp 1646-1650, 1-3 June, 2003.

- [2] Repo A.-K.; Hinkkanen M.; Arkkio A.: Parameter estimation for induction motors to study the effects of voltage, frequency and slip, Proc of Eropean Conf. Power Electr. and Appl., Aalborg, Denmark, , pp 1-10, 2007.
- [3] Jaskulski A.: AutoCAD 2007/LT2007+, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2008.
- [4] <http://www.ni.com>, accessed 30.01.2012r.
- [5] Blume P. A.: The LabVIEW Style Book, RR Donnelly, Indiana, 2007.
- [6] Chruściel M.: LabVIEW in practice, Wydawnictwo BTC, Legionowo, 2008 (in Polish).
- [7] Tłaczała W.: Environment LabVIEW™ w eksperymencie wspomaganym komputerowo, WNT, Warszawa, 2002 (in Polish).
- [8] Barański M., Demenko A., Łyskawiński W., Szelaż W.: Finite element analysis of transient electromagnetic-thermal phenomena in a squirrel cage motor, COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 30, No. 3, pp 832 - 840, 2011.

**LABORATORY STAND TO INVESTIGATION OF  
INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE ELECTROMAGNETIC  
TRANSIENT IN A SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR**

The paper presents a laboratory stand to investigation of the influence of temperature on the electromagnetic transients in a squirrel cage induction motor. The application developed in LabVIEW to the measurement and analysis of electromagnetic and thermal quantities was described. The application works with analog-digital PCI card for measurement, acquisition and visualization of voltages, currents, electromagnetic torque, speed and temperature in selected subassembly of the tested motor. The results of laboratory tests of selected operating states of three phase induction motor are presented.