

Michał BONISŁAWSKI

STEROWANE OBCIĄŻENIE ENERGOELEKTRONICZNE POMOCNE PRZY BADANIU NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH

STRESZCZENIE *W pracy przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne układu obciążenia energoelektronicznego. Głównym przeznaczeniem zaprojektowanego urządzenia jest kontrolowany pobór prądu/mocy z prądnicy prądu stałego, która z kolei często wykorzystywana jest jako sterowane obciążenie mechaniczne dla różnego rodzaju silników elektrycznych. Przedstawione rozwiązanie ułatwia procedurę badawczą napędu elektrycznego m.in. poprzez symulowanie różnego rodzaju charakterystyk obciążenia mechanicznego (charakter dźwignicowy, prądnicowy, wentylatorowy). W pracy zaprezentowano budowę obwodu mocy, sposób jego sterowania oraz wyniki badań układu prototypowego.*

Słowa kluczowe: *modulator rezystancji, obciążenie energoelektroniczne, obciążenie programowalne, hamowania prądu stałego*

1. WPROWADZENIE

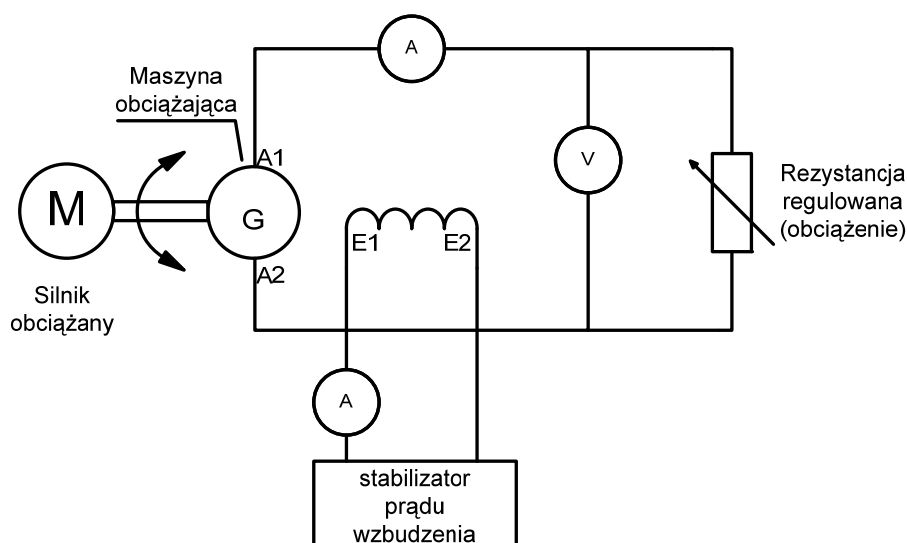
Podstawowa procedura badawcza danego napędu elektrycznego polega na jego kontrolowanym obciążeniu mechanicznym oraz, w zależności od celu testów pomiarze prędkości kątowej wału, momentu obrotowego i wartości

mgr inż. Michał BONISŁAWSKI
e-mail: michal.bonislawski@zut.edu.pl

Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 246, 2010

pobieranego prądu i napięcia na zaciskach maszyny (rys. 1.). Uzyskane parametry przedstawia się w formie odpowiednich charakterystyk [1, 3]. Jednym ze sposobów obciążenia mechanicznego maszyny jest sprzęgnięcie z nią obciążającej maszyny prądu stałego, pracującej w trybie generatorowym (praca prądnicowa). W większości przypadków jako obciążenie elektryczne prądnicy stosuje się rezystory mocy lub tzw. oporniki wodne. Urządzenia te, mimo swojej prostoty, posiadają liczne niedogodności, związane głównie z koniecznością nadzoru i ręcznej bądź programowej korekty wartości rezystancji. Wad tych pozbawiony jest opisany układ programowalnego obciążenia energoelektronicznego. Jego głównym zadaniem jest uproszczenie procedury badawczej m. in. poprzez odciążenie prowadzącego badanie od ciągłego nadzoru wartości pobieranego prądu. Dodatkowym atutem jest symulowanie różnego rodzaju charakterystyk obciążenia (dźwignicowa, prądnicowa, wentylatorowa). Praca w trybie impulsowym powoduje, że większość mocy wydzielona zostaje na zewnętrznym rezystorze mocy o stałej wartości rezystancji. Opracowany układ stanowić może część stanowiska badawczo-dydaktycznego, prezentowany wariant pozwala współpracować z silnikiem o maksymalnej mocy ok. 4 kW.

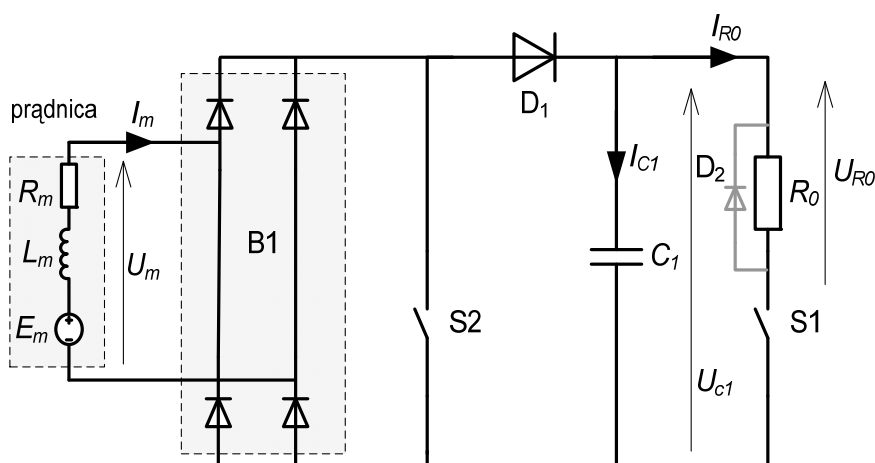


Rys. 1. Podstawowy układ do badania napędu elektrycznego

2. ENERGOELEKTRONICZNY OBWÓD MOCY

Wymagany, szeroki zakres regulacji prądu obciążenia o stosunku 1:200 (0,1–20 A), przy szerokim zakresie zmian napięcia zasilania (20–220 V) spo-

wodował konieczność zastosowania impulsowego przekształtnika DC/DC o konstrukcji podwyższająco-obniżającej, którego odbiornikiem jest stale dołączony rezystor R_0 , umożliwiający pracę z dużym prądem, także przy niskiej wartości napięcia zasilania (mała prędkość obrotowa prądnicy). Koncepcję struktury układu ilustruje rysunek 2.



Rys. 2. Struktura obwodu mocy

Prądnicę DC przedstawić można jako źródło prądu I_m złożone ze źródła napięcia indukowanego E_m oraz szeregowo połączonej indukcyjności L_m i rezystancji R_m . W celu uniezależnienia działania obciążenia od kierunku przepływu prądu (kierunku wirowania prądnicy) zastosowano mostek prostowniczy B1. W zależności od żądanej wartości prądu obciążenia i aktualnego napięcia prądnicy uaktywniony zostaje jeden z dwóch trybów działania (obniżający/podwyższający). Pierwszy występuje, gdy modulacja rezystancji odbywa się poprzez cykliczne załączanie i wyłączenie łącznika S1. W tym czasie łącznik S2 jest otwarty. Prądnica DC, wraz z kondensatorem C_1 zasilanym przez diodę D_1 , tworzy źródło napięcia. W przypadku braku kondensatora, przerwanie prądu twornika prądnicy łącznikiem S1 skutkowałoby powstaniem dużego przepięcia, potencjalnie uszkadzającego łącznik S1. Jako rezystor R_0 wykorzystany jest opornik mocy zdolny rozproszyć moc ok. 4 kW. Elementy takie cechują się stosunkową dużą indukcyjnością pasożytniczą, co również powodowałoby powstanie przepięcia w chwili wyłączenia S1. Aby temu zapobiec, dołączona została dioda D_2 . Średni prąd przepływający przez rezystor mocy R_0 równy jest średniemu prądowi twornika prądnicy I_m . Pomijając nieliniowość elementów oraz spadki napięć na półprzewodnikach wyznacza go zależność:

$$I_m = \frac{U_m \frac{t_p}{T_i}}{R_0} \quad (1)$$

gdzie:

- U_m – jest średnią wartością napięcia wejściowego,
- R_0 – rezystancja obciążenia,
- t_p – czas załączenia łącznika,
- T_i – okres modulacji.

W drugim trybie pracy łącznik S1 jest stale załączony. Zmianę natężenia prądu I_m dokonuje się poprzez modulację współczynnika wypełnienia łącznika S2. Ważną rolę spełnia tutaj dioda D_1 , uniemożliwiająca zwarcie kondensatora C_1 . Układ w takiej konfiguracji jest przekształtnikiem podwyższającym napięcie. Zależność prądu I_m od współczynnika wypełnienia t_p/T_i (w trybie modulacji łącznikiem S2):

$$I_m = \frac{U_m}{R_0} \frac{1}{\left(1 - \frac{t_p}{T_i}\right)^2} \quad (2)$$

Powyższe zależności są prawdziwe przy założeniach, że stała czasowa L_m/R_m jest znacznie większa od okresu modulacji T_i oraz że pobierany prąd I_m ma stałą wartość.

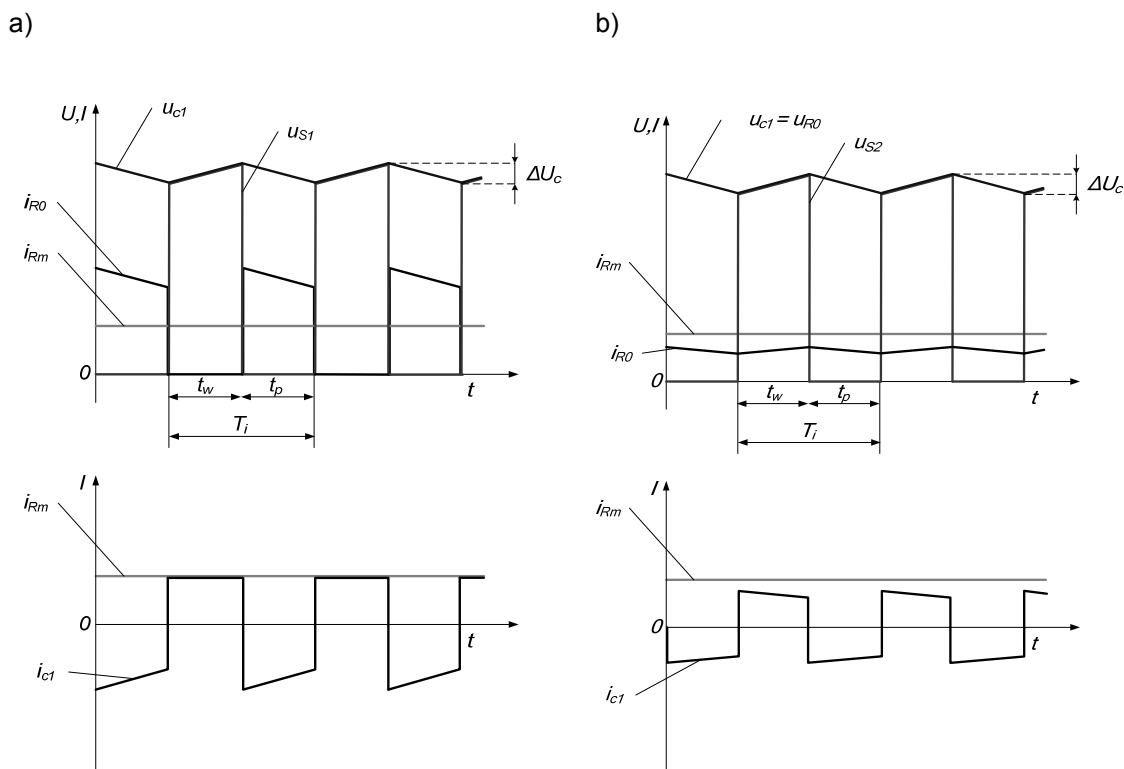
Wartość kondensatora C_1 wyznacza zależność:

$$C_1 = \frac{I_{m,\max}}{4f\Delta U_{C1,\max}} \quad (3)$$

gdzie:

- $I_{m,\max}$ – wartość maksymalna prądu wejściowego,
- f – częstotliwość modulacji,
- $\Delta U_{C1,\max}$ – pulsacja napięcia.

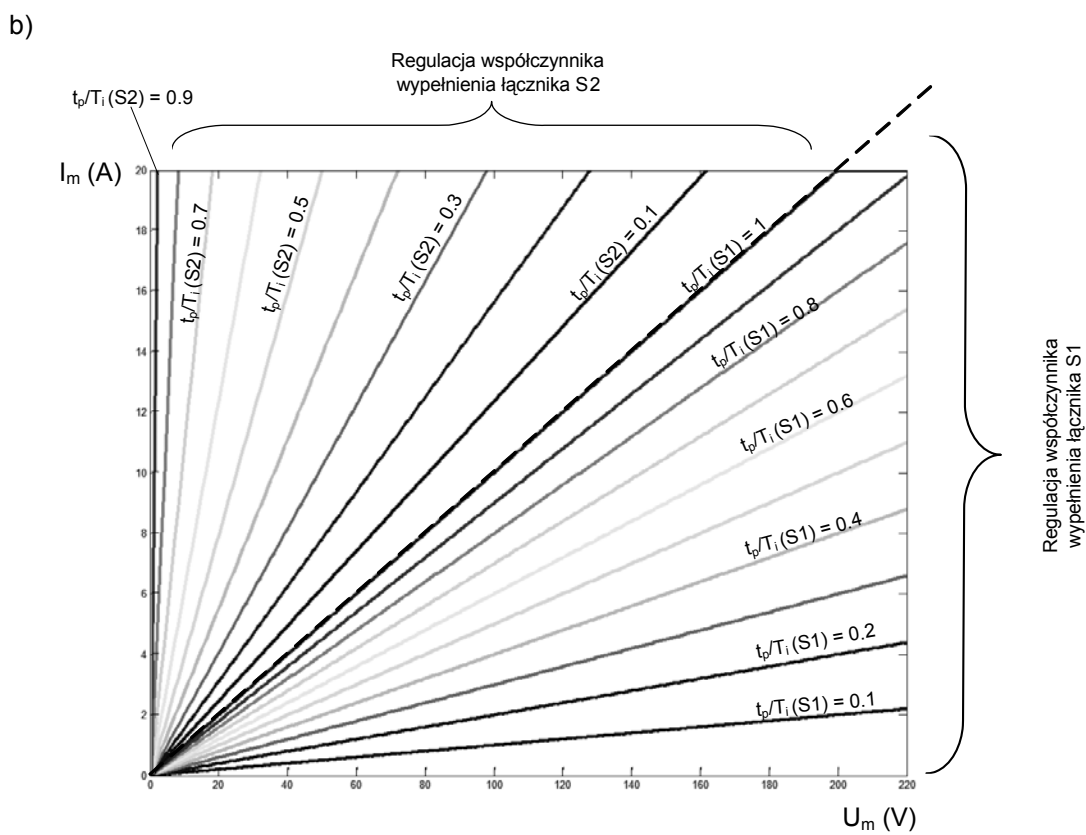
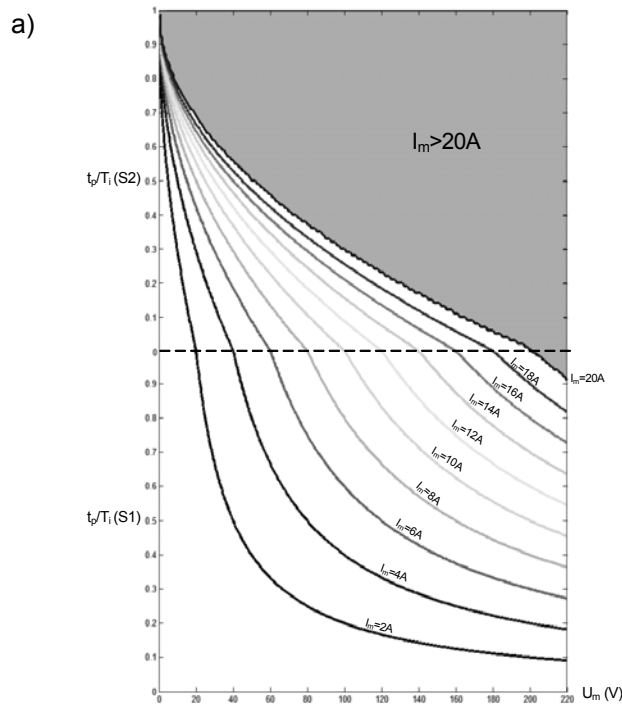
Teoretyczne przebiegi napięć i prądów w trybie obniżającym i podwyższającym przedstawiają kolejno rysunki 3a i 3b.



Rys. 3. Przebiegi czasowe napięć i prądów w trybie:
a) obniżającym, b) podwyższającym

3. ALGORYTM MODULACJI

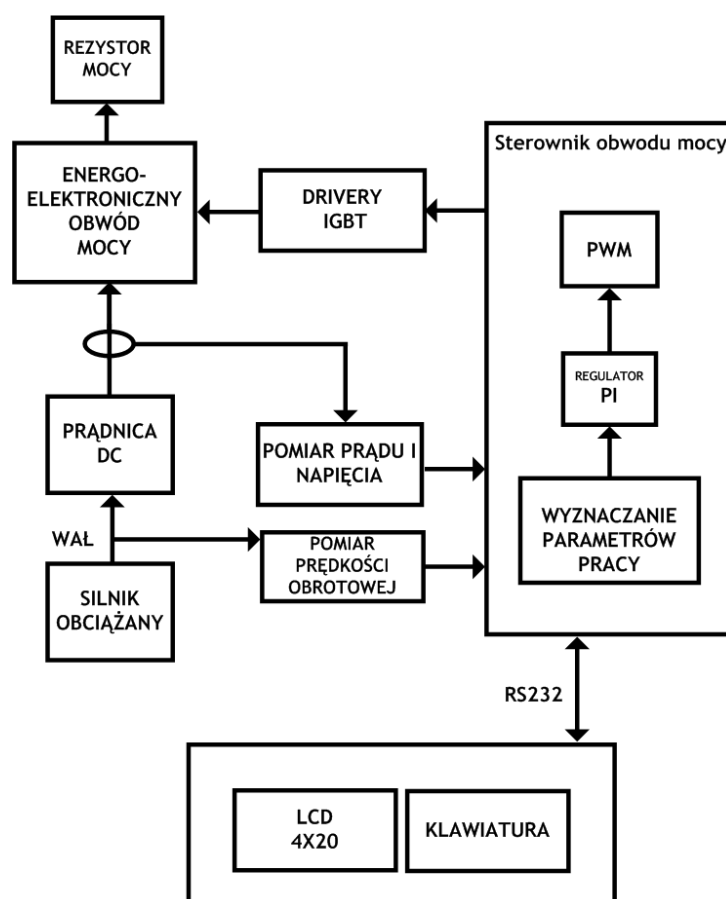
Wartość pobieranego prądu (przy danym napięciu i rezystancji R_0) zależy od współczynników wypełnienia pracy łączników S1 i S2. Praca przy względnie wyższym napięciu U_m odbywa się przy stałe wyłączonym łączniku S2 i regulowanym współczynniku wypełnienia S1. W miarę zmniejszania się wartości napięcia zasilającego U_m (zakładając stały prąd obciążenia I_m), względny czas załączenia S1 będzie rósł. Gdy osiągnie on wartość maksymalną ($t_p/T_i = 1$ – łącznik jest stałe załączony), zmieniany będzie względny czas załączania łącznika S2. Pozwoli to na pracę z dużym prądem I_m przy niskiej wartości napięcia U_m . Zależności między prądem I_m oraz napięciem U_m przy różnych współczynnikach wypełnienia (dla obydwu trybów modulacji), na podstawie wzorów (1) i (2) przedstawiają rysunki 4a i 4b (nie uwzględniono nieliniowości elementów, wartości pasożytniczych i spadków napięć na półprzewodnikach).



Rys. 4a i 4b. Zależność pobieranego prądu od napięcia i współczynników wypełnienia łączników

4. UKŁAD POMIAROWY ORAZ OBWÓD STEROWANIA

Wartość prądu pobieranego przez obciążenie jest stała (charakterystyka dźwignicowa) lub jest funkcją prędkości kątowej (charakterystyka prądnicowa i wentylatorowa). Prawidłowe działanie układu obciążającego wymaga więc ciągłej kontroli wartości pobieranego prądu oraz napięcia prądnicy i jej prędkości obrotowej. Na jej podstawie, układ sterowania wypracowuje sygnały sterujące tranzystorami wykonawczymi w energoelektronicznym obwodzie mocy. Dodatkowo aktualna informacja o napięciu i pobieranej mocy wyświetlona na panelu sterowania ułatwia prowadzenie badań nad obciążanym urządzeniem.



Rys. 5. Schemat blokowy układu obciążającego

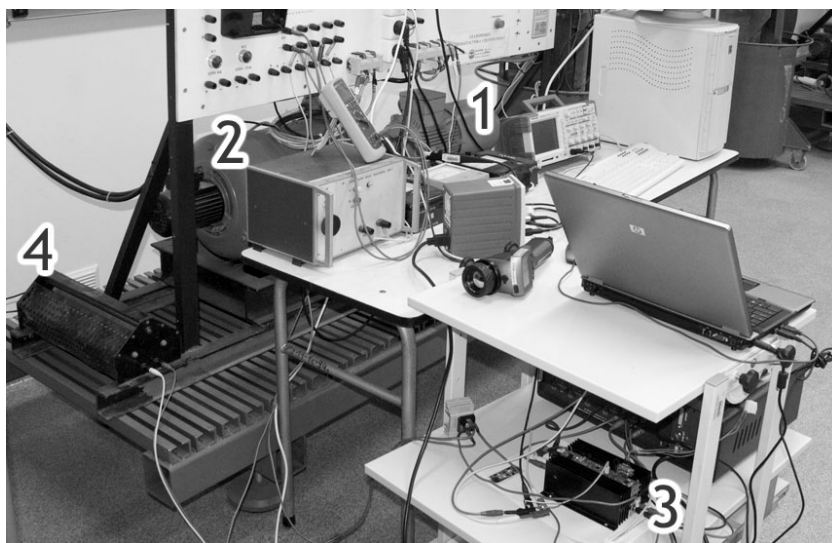
Mierzone parametry pracy są elementem sprzężenia zwrotnego układu sterowania. Aby wartości rzeczywiste odpowiadały jak najbardziej wartościom

zadaniem, w mikrokontrolerze głównym zaimplementowano cyfrowy regulator proporcjonalno-całkujący (PI). Zmianę nastaw (wartość zadana, tryb pracy, parametry regulatora) oraz odczyt mierzonych wartości umożliwia zewnętrzny panel sterowania składający się z wyświetlacza LCD i klawiatury cztero-przyciskowej. Jako centralną jednostkę sterującą obwodem mocy oraz obsługującą panel sterowania wykorzystano mikrokontrolery rodziny AVR, która wyposażona jest w wiele nowoczesnych rozwiązań pozwalających zmniejszyć ilość elementów zewnętrznych koniecznych do działania całego systemu mikroprocesorowego. W konsekwencji umożliwia to uproszczenie konstrukcji i redukcję kosztów. Komunikacja między mikrokontrolerami odbywa się za pomocą zintegrowanych interfejsów portu szeregowego RS232 (rys. 5).

Wyznaczanie aktualnej wartości prędkości kątownej wału maszyny obciążonej zrealizowane jest w oparciu o pomiar okresu obrotu wału (czujnikiem hallotronowym) lub pomiar napięcia na zaciskach sprzężonej mechanicznie prądnicy tachometrycznej.

5. KONSTRUKCJA PROTOTYPU I WYNIKI POMIARÓW

Sterownik wraz z elementami mocy umieszczony został w całości w wyprofilowanym radiatorze o wymiarach 15x10x6 cm. Widok stanowiska pomiarowego przedstawia rysunek 6.



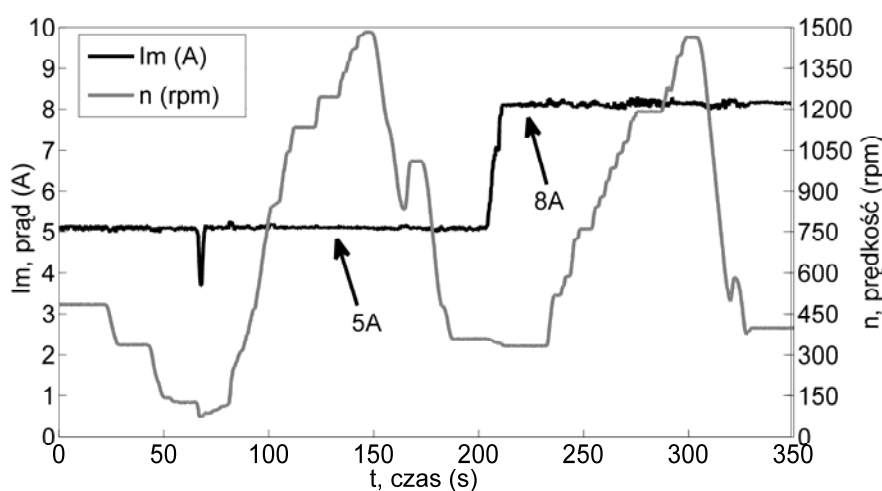
Rys. 6. Stanowisko testowe

1 – silnik asynchroniczny napędzający, 2 – maszyna DC obciążająca,
3 – przekształtnik, 4 – rezystor obciążający R_0

Napęd stanowił silnik asynchroniczny (Siemens LA5106-4AA10-Z), sprzężony mechanicznie z silnikiem prądu stałego (Komel DFO7c 160 SY). Wartość prędkości kątovej wyznaczana była na podstawie napięcia prądniczki tachometrycznej. Wartości prądów i napięć zarejestrowane zostały analizatorem mocy Norma 5000 z częstością ok. 10 zapisów na sekundę.

Weryfikację pracy trybu stabilizacji prądu przy różnych napięciach źródła (dźwignicowa charakterystyka obciążania) przedstawia rysunek 7.

W czasie $t = 0 \dots 200$ sekund zadano prąd o wartości 5 A, powyżej 200 s – 8 A. Widoczne jest skuteczne utrzymywanie żądanej wartości prądu w istotnym zakresie prędkości kątovej: $15,7 < \omega < 157$ rad/s ($150 < n < 1500$ rpm).



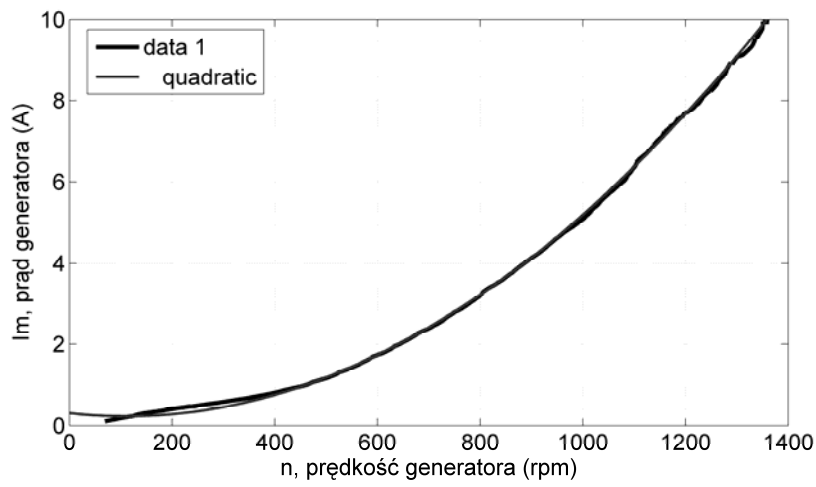
Rys. 7. Wyniki pomiarów trybu stabilizacji prądu

Symulacja obciążenia wentylatorem/pompą polega na zadawaniu wartości prądu pobieranego z prądniczki (w konsekwencji momentu obciążenia) proporcjonalnego do drugiej potęgi jej prędkości obrotowej:

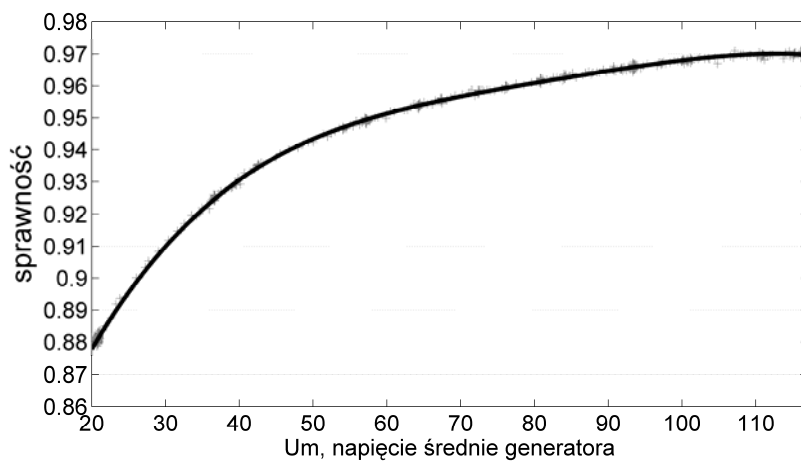
$$I_m = k \cdot n^2 \quad (3)$$

Zmierzoną wartość prądu w zależności od prędkości (dla współczynnika proporcjonalności $k = 5,5e-6$) przedstawia rysunek 8.

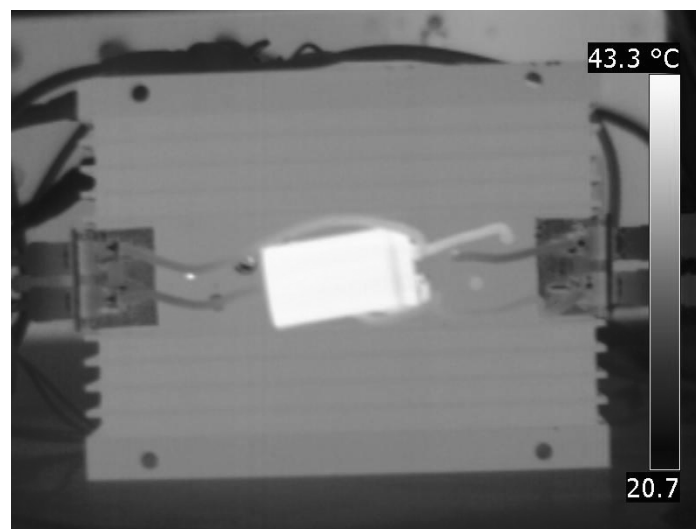
O ile ogólna sprawność przetwarzania energii generator-przekształtnik-rezystor jest nieistotna (z założenia całość mocy zamieniona jest na ciepło), o tyle sprawność samego przekształtnika jest ważna. Determinuje ona bowiem intensywność chłodzenia urządzenia, a przez to jego wielkość i wagę. Zastosowanie nowoczesnych tranzystorów IGBT firmy IXYS (częstotliwość przełączania 7,8 kHz) oraz szybkiej diody epitaksjalnej zaowocowało sprawnym procesem przekształcania napięć/prądów (rys. 9).



Rys. 8. Wyniki pomiarów trybu symulacji obciążenia wentylatorem



Rys. 9. Sprawność przekształtnika w funkcji napięcia generatora ($I_m = 8$ A)



Rys. 10. Zdjęcie termowizyjne przekształtnika

Niewielką ilość wydzielanego ciepła potwierdza fotografia termowizyjna przekształtnika (rys. 10). Po godzinnym wygrzaniu (prąd $I_m = 10$ A) temperatura radiatora wzrosła o 15°C . Ze względu na gorsze warunki odprowadzenia ciepła, kondensator elektrolityczny (C_1) ma podwyższoną temperaturę.

6. PODSUMOWANIE

Prezentowana praca przedstawia koncepcję oraz prototypowe wykonanie programowalnego układu energoelektronicznego obciążenia. Dwa tryby pracy przekształtnika (podwyższający i obniżający) pozwalają na pracę w szerokim zakresie prądów i napięć. Przeznaczenie układu, czyli stosunkowo krótkie czynniki pomiarowe silnika obciążanego (szczególnie podczas zajęć dydaktycznych) usprawiedliwiają wydzielanie pobranej mocy z generatora do otoczenia. W przypadku większego przedziału mocy rozważyć należy możliwość oddania jej z powrotem do sieci. Zastosowanie nowoczesnych rozwiązań (w części energoelektronicznej i sterującej) pozwoliło na budowę urządzenia kompaktowego. Układy tego typu mogą z powodzeniem zastąpić wymienione we wstępie typowe, kłopotliwe w eksploatacji elementy obciążające.

LITERATURA

1. Ciurys M., Dudzikowski I.: Badania bezszczotkowego silnika prądu stałego. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 83/2009, wyd. BOBRME Komel, s. 183-188.
2. Dąbala K.: Hamownice prądu stałego i przemiennego ze zwrotem energii do sieci. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 80/2008, wyd. BOBRME Komel, s. 131-135.
3. Foo G., Sayeef S., Rahman M.F.: Sensorless Direct Torque and Flux Control of an IPM Synchronous Motor at Low Speed and Standstill, 13th International Power Electronic and motion Control Conference s. 2303.
4. Holub M., Palka R., Canders W.R.: Control of switched reluctance machines for flywheel energy storage applications, Electromotion, Number 2-3, April – September 2005, p. 185.

Rękopis dostarczono dnia 11.05.2010 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Marian P. Kaźmierkowski

CONTROLLED ELECTRONIC LOAD USED IN TESTING ELECTRIC DRIVES

Michał BONISŁAWSKI

ABSTRACT *Presented paper gives an overview of the design process of a programmable power electronic load system. The main aim of the proposed structure is a controllable current/power consumption of a direct current machine, which is a common load simulator in case of electrical machine test stand construction. The main task of designed system is the usage convenience and programmability in case of typical load profiles (fan, pump, lift). The design phase is described shortly after a brief overview of existing concepts and their main characteristics. Main digital control system is depicted with a stand-alone user's interface.*



Mgr inż. Michał BONISŁAWSKI w roku 2009 ukończył Wydział Elektryczny Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie (była Politechnika Szczecińska) oraz rozpoczął studia doktoranckie w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie w dyscyplinie Elektrotechnika.