

Michał Bonisławski, Marcin Hołub
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

PROGRAMOWALNY UKŁAD OBCIĄŻENIA DLA MASZYN PRĄDU STAŁEGO

PROGRAMMABLE LOAD FOR DC MACHINES

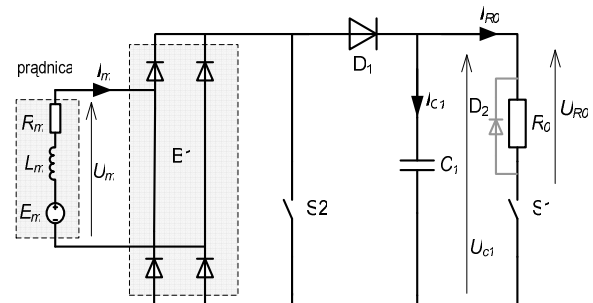
Abstract: Presented paper gives an overview of the design process of a programmable power electronic load system. The main aim of the proposed structure is a controllable current/power consumption of a direct current machine, which is a common load simulator in case of electrical machine test stand construction. 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.

1. Wstęp

Badanie właściwości napędów elektrycznych polega często na ich kontrolowanym obciążeniu mechanicznym oraz, w zależności od celu testów, pomiarze prędkości obrotowej, momentu obrotowego i/lub parametrów pobieranego prądu bądź wartości napięć [1,2]. Na podstawie uzyskanych wyników sporządzić można odpowiednie charakterystyki danego napędu. 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 przedstawiony programowalny, energoelektroniczny układ obciążający, kontrolujący pobór prądu/mocy z silnika prądu stałego. Urządzenie takie ułatwia procedurę badawczą napędu elektrycznego oraz umożliwia symulowanie różnego rodzaju charakterystyk obciążeń mechanicznych (dźwigniowa, prądnicowa, wentylatorowa). W znacznym stopniu odciąża to prowadzącego czynności pomiarowe od konieczności ciągłej kontroli nastaw. Rozwiązanie oparte o przyrządy impulsowe pozwala na wydzielanie mocy głównie na przeznaczonym do tego celu, zewnętrznym rezystorze mocy o stałej wartości rezystancji. Opracowany układ stanowić może część stanowiska badawczo – dydaktycznego, prezentowany wariant pozwala współpracować z silnikiem asynchronicznym o maksymalnej mocy ok. 4kW.

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) spowodował 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 rys.1.



Rys. 1. 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 klucza S1. W tym czasie klucz S2 jest otwarty. Prądnicą

DC, wraz z kondensatorem C_1 zasilanym poprzez diodę D_1 , tworzy źródło napięcia. W przypadku braku kondensatora, przerwanie prądu twornika prądnicy kluczem S1 skutkowało by powstaniem dużego przepięcia, potencjalnie uszkadzającego klucz S1. Jako rezystor R_0 wykorzystany jest opornik mocy zdolny rozprzyszczyć 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 klucza, T_i – okres modulacji.

W drugim trybie pracy klucz S1 jest stale załączony. Zmianę natężenia prądu I_m dokonuje się poprzez modulację współczynnika wypełnienia klucza 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 kluczem 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 $\tau = L_m/R_m$ jest znacznie większa od okresu modulacji T_i oraz że pobierany prąd I_m ma stałą wartość.

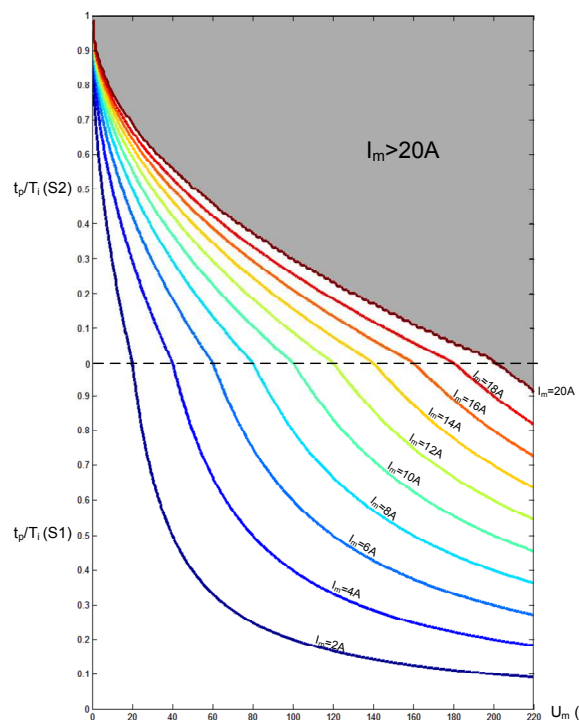
Wartość kondensatora C_1 wyznacza zależność:

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

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

2.2 Algorytm modulacji

Wartość pobieranego prądu (przy danym napięciu i rezystancji R_0) zależy od współczynników wypełnienia pracy kluczy S1 i S2. Praca przy względnie wyższym napięciu U_m odbywa się przy stale wyłączonym kluczu S2 i regulowanym współczynnikiem wypełnienia S1. W miarę zmniejszania się wartości napięcia zasilającego U_m (zakładając stały prąd obciążenia I_m), względny czas załączenia zaworu S1 będzie rósł. Gdy osiągnie on wartość maksymalną ($t_p/T_i = 1$ - klucz jest stale załączony), zmieniany będzie względny czas załączania klucza 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 kluczy (dla obydwu trybów modulacji), na podstawie wzorów (1) i (2) przedstawia rys. 2 (nie uwzględniono nieliniowości elementów, wartości pasożytniczych i spadków napięć na półprzewodnikach).

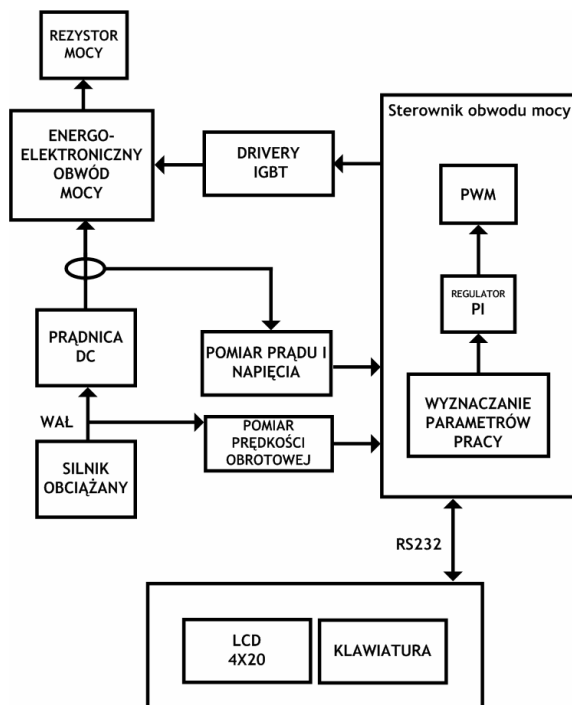


Rys. 2. Zależność pobieranego prądu od napięcia i współczynników wypełnienia kluczy

3. Układ pomiarowy oraz obwód sterowania

W zależności od wybranego trybu pracy wartość prądu pobieranego przez projektowane urządzenie może być stała lub może być funkcją prędkości obrotowej maszyny. W konsekwencji wyboru trybu zachodzi po-

trzeba ciągłej kontroli tych parametrów i ich prawidłowa interpretacja. Na jej podstawie, według ustalonego algorytmu działania, układ sterowania wypracowuje sygnały sterujące elementami wykonawczymi w energoelektronicznym obwodzie mocy. Mierzone parametry pracy są elementem sprzężenia zwrotnego układu sterowania tak, aby wartości rzeczywiste odpowiadały jak najbardziej wartościom zadany – wiąże się to z koniecznością implementacji programowej odpowiedniego regulatora. Zmianę nastaw oraz odczyt mierzonych wartości umożliwia zewnętrzny panel sterowania. Jako centralną jednostkę sterującą obwodem mocy oraz obsługującą panel sterowania wykorzystano mikrokontrolery rodziny AVR, która jest wyposażona 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. 3).



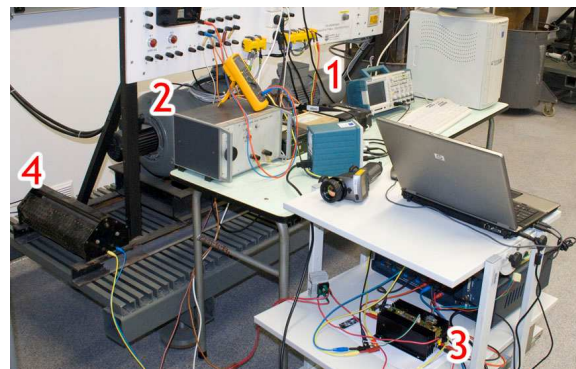
Rys. 3. Schemat blokowy układu obciążającego

Wyznaczanie aktualnej wartości prędkości obrotowej maszyny obciążanej zrealizowane jest w oparciu o pomiar okresu obrotu wału (czujnikiem hallotronowym) lub pomiar napięcia na

zaciskach sprzężonej mechanicznie prądnicy tachometrycznej.

4. Konstrukcja prototypu i wyniki pomiarów

Sterownik wraz z elementami mocy umieszczony został w całości w wyprofilowanym radiatorze o wymiarach 15x10x6 cm. Panel sterowania składa się z wyświetlacza alfanumerycznego 4x20 znaków i klawiatury czteroprzykiskowej, umożliwiającej modyfikację wartości zadanej, parametrów regulatora PI oraz trybu stabilizacji. Widok stanowiska pomiarowego przedstawia rys. 4.

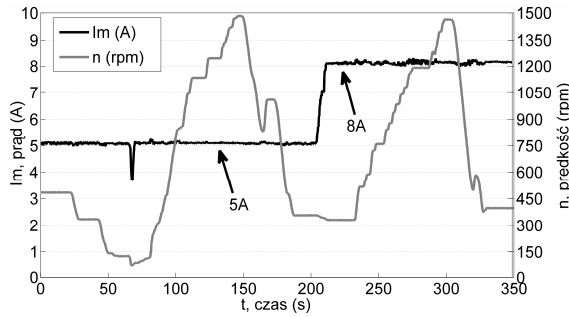


Rys. 4. Stanowisko testowe (1-Silnik asynchroniczny napędzający, 2-maszyna DC obciążająca, 3-przetwornik, 4-rezystor obciążający R_0)

Napęd stanowił silnik asynchroniczny (Siemens LA5106-4AA10-Z), sprzężony mechanicznie z silnikiem prądu stałego (Komel DFO7c 160 SY). Wartość prędkości obrotowej wyznaczana była na podstawie napięcia prądnicy 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 rys. 5.

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 obrotowej ($150 < n < 1500$ rpm).

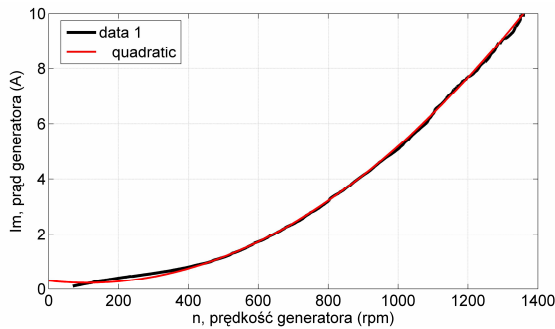


Rys. 5. Wyniki pomiarów trybu stabilizacji prądu.

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

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

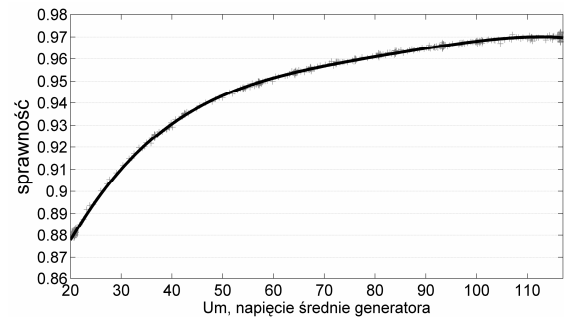
Zmierzoną wartość prądu w zależności od prędkości (dla współczynnika proporcjonalności $k=5,5e-6$) przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Wyniki pomiarów trybu symulacji obciążenia wentylatorem

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 7).

Niewielką ilość wydzielanego ciepła potwierdza fotografia termowizyjna przekształtnika (rys. 8). Po godzinnym wygrzaniu (prąd $I_m = 10$ A) temperatura radiatora wzrosła o 15°C. Najcieplejszym elementem układu jest kondensator elektrolityczny (C_I): ok. 43°C.



Rys. 7. Sprawność przekształtnika w funkcji napięcia generatora ($I_m = 8$ A)



Rys. 8. Zdjęcie termowizyjne przekształtnika

5. 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 czynności 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] 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.
- [3] Dąbała K.: *Hamownice prądu stałego i przemiennego ze zwrotem energii do sieci*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 80/2008, wyd. BOBRME Komel, s. 131-135.
- [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.

Autorzy

mgr inż. Michał Bonisławski, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel.: +48 91 449 48 05, e-mail: michal.bonislawski@zut.edu.pl

dr inż. Marcin Hołub, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel.: +48 91 449 48 05, e-mail: mholub@zut.edu.pl

Praca zrealizowana w ramach projektu współfinansowanego przez Unię Europejską (Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego) w ramach programu Region Morza Bałtyckiego 2007 - 2013, projekt „Plasma based Technologies for environment protection in BSR - PlasSTEP”, kontrakt #033.

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Maria Dems