

Mirosław MROZEK*

SPECJALIZOWANY STEROWNIK DO OBSŁUGI ZESTAWU SILNIKÓW PRĄDU STAŁEGO DC MASZYN TRIBOLOGICZNYCH

SPECIALIZED CONTROLLER TO DC MOTORS SET FOR TRIBOTESTERS

Słowa kluczowe:

sterownik silnika prądu stałego DC, silnik DC, pętla sprzężenia zwrotnego, maszyny tribologiczne

Key words:

motor controller DC, DC motor, closed loop feedback, tribotester

Streszczenie

W artykule przedstawiono sterownik silnika prądu stałego DC do obsługi zestawu silników DC. Silniki elektryczne prądu stałego są elementami wykonawczymi bardzo często stosowanymi w układach regulacji. Podstawowymi zaletami tych silników są: duży moment obrotowy, dobra sprawność oraz małe wymiary [L. 1, 2]. Dzięki temu mogą być stosowane do regulacji siły, momentu, przemieszczenia w różnego typu testach tribologicznych [L. 3].

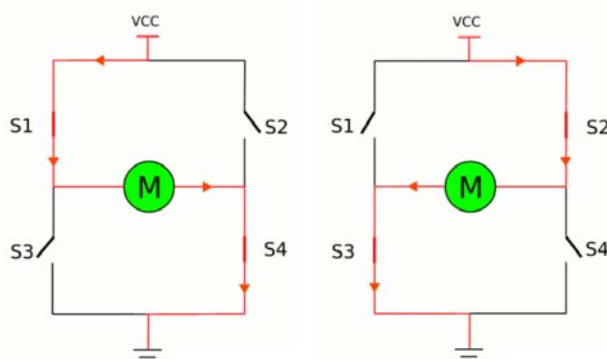
* Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Zakład Tribologii, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, Polska.

Opisywany sterownik charakteryzuje się pracą w podwójnej pętli sprzężenia zwrotnego. Umożliwia on stabilizację prędkości obrotowej silnika i/lub zachowanie stałej, zadanej odległości od obiektu badanego lub przeszkody. Pozwala on na współbieżną pracę wielu silników elektrycznych. Może sterować silnikiem ze zintegrowaną przekładnią mechaniczną, wbudowanym enkoderem, tachoprądnicą lub hamulcem. Posiada izolowane galwanicznie wejścia i wyjścia cyfrowe oraz wejścia analogowe do współpracy z optycznymi czujnikami odległości.

Przedstawiono przykład zastosowania sterownika w repozytorium z regałami przesuwными o napędzie elektrycznym. Sterownik ten może być również wykorzystany do budowy aparatury do badań tribologicznych, która jest projektowana i produkowana w ITeE – PIB. W testerach T-17 i T20 stosowane są silniki DC, lecz zdecydowana większość wytwarzanych urządzeń tribologicznych (T-01, T-05, T-10, T-11, T-15, T-20) posiada asynchroniczne silniki prądu zmiennego.

WPROWADZENIE

Silniki elektryczne prądu stałego są bardzo często stosowanymi elementami wykonawczymi w układach regulacji. Podstawowymi zaletami tych silników są: duży moment obrotowy, dobra sprawność oraz małe wymiary. Klasycznym rodzajem silników prądu stałego są napędy szczotkowe wyposażone w mechaniczny komutator. Obecnie produkowane silniki charakteryzuje wysoka jakość wykonania i kultury pracy. Pomimo zużywających się szczotek, które zmuszają do okresowej konserwacji tych napędów, są one niedrogim i funkcjonalnym rozwiązaniem. Dodatkową zaletą jest ich prostsze sterowanie w porównaniu z silnikami bezszczotkowymi.



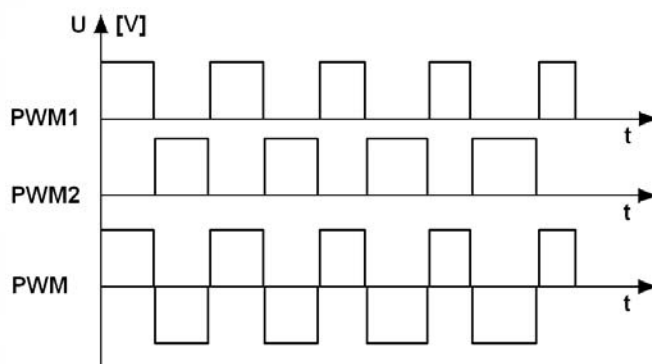
Rys. 1. Ilustracja działania mostka H

Fig. 1. Illustration action of the H-bridge

Do sterowania silnikami wykorzystuje się specjalizowane sterowniki [L. 4–6]. W nowoczesnych sterownikach stosuje się modulację szerokości

impulsów PWM (ang. *Pulse-Width Modulation*) [L. 7–9] w układzie mostkowym typu H (Rys. 1). Dzięki modulacji następuje zamiana stałego napięcia wejściowego na dwie fale prostokątne o określonej częstotliwości i zmiennym współczynniku wypełnienia, które sterują przepływem prądu w gałęziach mostka S1-S4 i S2-S3.

W wyniku tego napięcie impulsowe PWM w gałęzi z silnikiem pozwala na zmianę i regulację obrotów silnika w całym zakresie prędkości (Rys. 2). Elementami przełączającymi S1, S2, S3, S4 są zazwyczaj tranzystory MOSFET [L. 10]. Długości impulsów przełączających obliczane są przez mikroprocesor na podstawie sygnałów pomiarowych lub/i parametrów zadanych [L. 11–12]. Sprawność układu sterowania PWM zawiera się w przedziale 80...95%. Straty w obwodzie powstają głównie podczas przełączania tranzystorów (straty dynamiczne) oraz w dużo mniejszym stopniu na rezystancji przewodzenia tranzystorów i diod zwrotnych (straty statyczne). Modulacja PWM oprócz zwiększenia sprawności pozwala ograniczyć prąd rozruchu oraz ułatwia kontrolowanie prędkości silnika.



Rys. 2. Modulacja PWM w układzie mostkowym H

Fig. 2. Modulation PWM-bridged H

Optymalna szybkość przełączania tranzystorów zależy w największym stopniu od indukcyjności uzwojeń silnika. Zwiększanie częstotliwości PWM zwiększa straty, natomiast jej obniżanie ogranicza pasmo systemu i zwiększa impulsy tętnień prądu. W opisywanym w artykule sterowniku częstotliwość modulacji wyznaczono na 40 kHz.

STEROWNIK MIKROPROCESOROWY DO OBSŁUGI ZESTAWU SILNIKÓW PRĄDU STAŁEGO

Silniki prądu stałego stosowane są od wielu lat i istnieją różne bardziej lub mniej funkcjonalne układy sterowania nimi. Cechą wyróżniającą opisywany

w artykule sterownik jest jego zdolność do współpracy z innymi sterownikami w celu zapewnienia współbieżnej pracy zestawu kilku, kilkunastu lub nawet kilkudziesięciu silników [L. 13–17].

Jednostkę centralną sterownika stanowi mikrokontroler jednoukładowy SH7084. Jest on 32-bitowym mikroprocesorem typu RISC (o zredukowanej liczbie instrukcji). Większość instrukcji jest wykonywana w jednym cyklu zegarowym. SH7084 posiada wewnętrzną pamięć programu typu Flash, którą można programować po umieszczeniu układu w systemie. Mikrokontroler jest wyposażony w liczne układy peryferyjne, między innymi w rozbudowany, wielokanałowy układ czasowo-licznikowy (MTU). Układ ten umożliwia generowanie sygnałów o zadanej częstotliwości i wypełnieniu do sterowania tranzystorów w trybie modulacji szerokością impulsu PWM.

Zaawansowane algorytmy kontroli i sterowania zaimplementowane w pamięci mikroprocesora pozwalają na pracę sterownika w podwójnej pętli sprzężenia zwrotnego. Dzięki temu możliwa jest stabilizacja prędkości obrotowej silnika i/lub zachowanie stałej, zadanej odległości od obiektu badanego lub przeszkody. Sterownik zapewnia łagodny rozruch i łagodne zatrzymanie, niezależnie od obciążenia. Posiada kontrolę prądu silnika, pozycji wału silnika oraz pozycji obiektu napędzanego, względnej lub bezwzględnej (przy zastosowaniu liniału magnetycznego). Istnieje również możliwość podłączenia ogranicznika mechanicznego lub czujnika krańcowego. Wyposażony jest w funkcję hamowania dynamicznego (z możliwością podłączenia zewnętrznej rezystancji) oraz funkcję hamowania odzyskowego z konfigurowanym ograniczeniem napięcia.

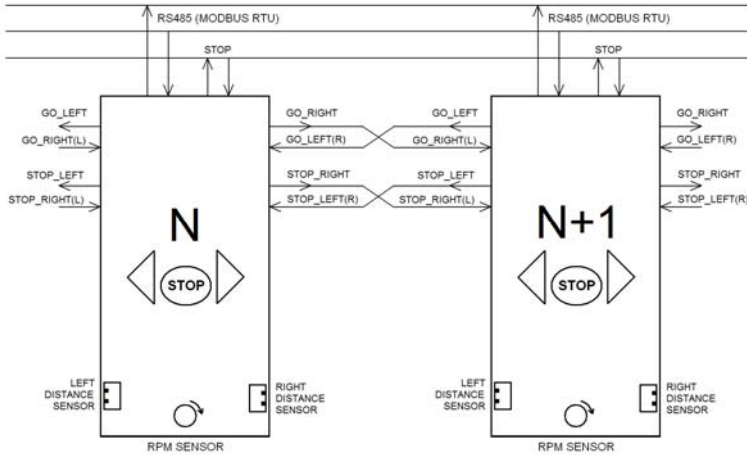
Obsługa sterownika przez użytkownika możliwa jest za pomocą wyświetlacza graficznego TFT z panelem dotykowym i zdalnie, poprzez aplikację zainstalowaną na komputerze. Optoizolowane wejścia i wyjścia cyfrowe pozwalają na bezpieczną i bezawaryjną synchroniczną współpracę sterowników. Komunikacja między sterownikami może odbywać się także poprzez interfejs szeregowy z protokołem komunikacyjnym Modbus RTU (**Rys. 3**). Każdy sterownik (1...N...N+1) ma możliwość komunikacji ze wszystkimi sterownikami za pomocą linii STOP i RS484(MODBUS RTU). Sygnał STOP powoduje jednoczesne zatrzymanie wszystkich obiektów w pozycji, w jakiej aktualnie się znajdują.

Poza tymi sygnałami poszczególne sterowniki komunikują się z sąsiednimi sterownikami za pomocą linii:

- z lewej strony:
 - GO_LEFT – sygnał wyjściowy
 - GO_RIGHT(L) – sygnał wejściowy
 - STOP_LEFT – sygnał wyjściowy
 - STOP_RIGHT(L) – sygnał wejściowy
- z prawej strony:
 - GO_RIGHT – sygnał wyjściowy
 - GO_LEFT T(R) – sygnał wejściowy

- STOP_RIGHT – sygnał wyjściowy
- STOP_LEFT (R) – sygnał wejściowy

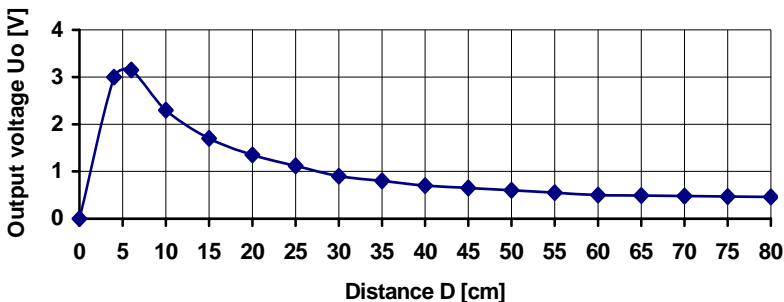
Sygnały te pozwalają określić stan, w jakim znajdują się sąsiednie obiekty sterowania, tj. czy została osiągnięta przez obiekt docelowa pozycja (sygnały STOP_LEFT i STOP_RIGHT) lub wydają polecenie na wykonanie ruchu w lewo (sygnał GO_LEFT) lub w prawo (sygnał GO_RIGHT).



Rys. 3. Komunikacja między sterownikami silników prądu stałego
 Fig. 3. Communication between controllers DC motors

Pozycję obiektu określa czujnik odległości. Czujniki odległości wyznaczają pozycje obiektów względem siebie, a także mają wpływ na prędkość ruchu, stabilizację prędkości względem innych agentów, czas startu i czas hamowania.

Do pomiaru odległości zastosowano czujnik optyczny [L. 18]. Czujnik generuje napięcie odpowiadające odległości od obiektu (Rys. 4). Składa się z detektora PSD, diody emitującej podczerwień IRED oraz układu przetwarzania sygnału.



Rys. 4. Wykres napięcia w funkcji odległości czujnika optycznego
 Fig. 4. The graph of voltage versus the sensor's distance

Dzięki zastosowaniu metody triangulacji, różnorodność powierzchni obiektu, temperatura otoczenia oraz czas pracy nie wpływają znacząco na pomiar odległości.

Czujnik obrotów RPM SENSOR pozwala sterownikowi na stabilizację obrotów silnika, a tym samym prędkości liniowej obiektu na określonym, zadanym poziomie, niezależnie od obciążenia.

BADANIA WERYFIKACYJNE

Przeprowadzone badania weryfikacyjne miały na celu określenie poprawności założeń projektowych dla sterownika i opracowanych algorytmów sterowania dla zestawu silników elektrycznych prądu stałego.

Sterownik został wbudowany w system sterowania regałami jezdnyymi. Moduły sterowników zostały umieszczone w czterech regałach jezdnych (**Rys. 5**). W systemie tym poszczególne regały współpracują ze sobą, aby ustalić określoną pozycję względem siebie i umożliwić operatorowi dostęp dożądanego miejsca w repozytorium [**L. 19**]. Ruch odbywa się w jednej osi, w lewo lub prawo, z łagodnym rozruchem i łagodnym zatrzymaniem w odległości ustalonej przez użytkownika. Łagodny rozruch i łagodne zatrzymanie zapewnia bezpieczeństwo przechowywanych przedmiotów przed gwałtownymi wstrząsami. Zachowanie odpowiedniej, zaprogramowanej odległości między sąsiednimi regałami chroni duże przedmioty wystające poza obręb regału przed uszkodzeniem.

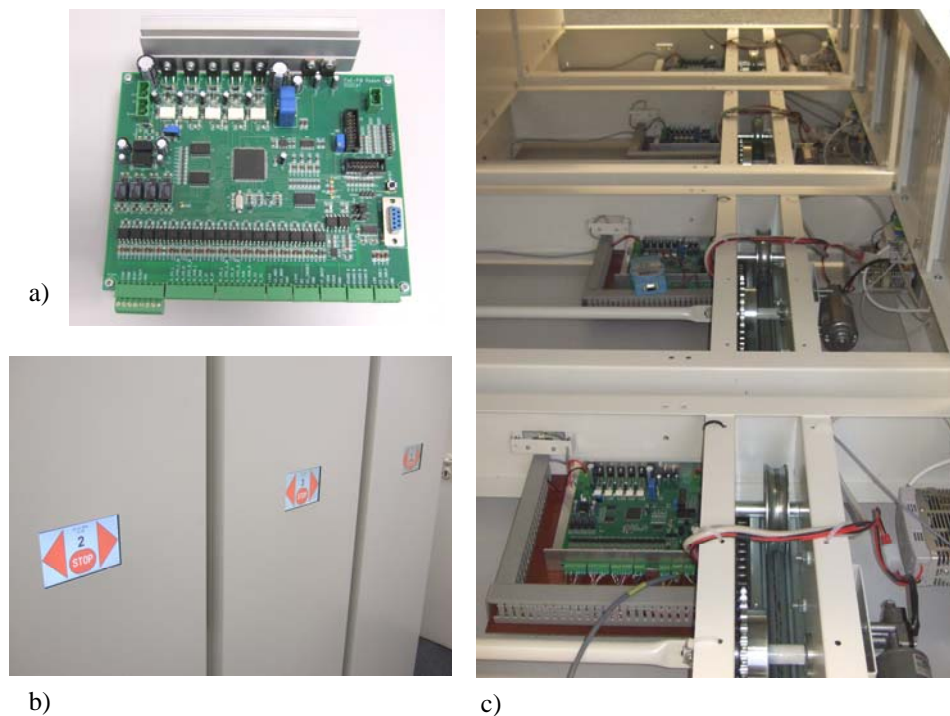
Każdy regał posiada własny sterownik i silnik elektryczny. Sterowanie odbywa się w zależności od sygnałów pochodzących z otoczenia:

- od operatora (lokalnie lub zdalnie);
- od innych sterowników;
- od czujników odległości;
- od czujników prędkości obrotowej;
- od czujników prądu;
- od czujników indukcyjnych (krańcowych).

Analiza sygnałów wyznacza zakres pracy sterownika i determinuje wykonywane przez niego akcje. Odpowiednie akcje, tj. ruch w lewo, ruch w prawo, zatrzymanie mogą być realizowane na żądanie operatora lub polecenie innych sterowników. Jednakże sterownik, wykonując odpowiednie akcje, może samodzielnie podjąć decyzję o zaprzestaniu wykonywania ruchu w przypadku osiągnięcia odpowiedniej pozycji lub wystąpienia przeszkody.

Opisane działanie systemu sterowania zestawem czterech silników elektrycznych w repozytorium z regałami przetestowano na stanowisku laboratoryjnym. Stwierdzono poprawność pracy i przyjętych założeń projektowych.

Dzięki pętli sprzężenia zwrotnego od czujnika prędkości sterownik zapewnia bezpieczny rozruch, pracę i hamowanie, niezależnie od obciążenia regału, które może wynosić nawet 3 tony.



Rys. 5. System sterowania regałami jezdnych: a) sterownik, b) widok paneli sterowniczych, c) widok zespołu napędowego

Fig. 5. The control system of movable racks: a) the motor controller, b) view of the control panels, c) view of the drive unit

W celu sprawdzenia zdalnej komunikacji w sieci Modbus RTU moduły sterowników podłączono poprzez konwerter Ethernet-Modbus do komputera PC z zainstalowanym dedykowanym oprogramowaniem.

Po przeprowadzeniu badań wpływu zastosowanego czujnika odległości na jakość sterowania stwierdzono, że lepsze efekty w tym systemie daje czujnik o większym zakresie pomiarowym, lecz mniejszej szybkości pomiaru. Czujnik o mniejszym zakresie ma lepszy wpływ na proces hamowania i dokładność zajmowania pozycji. Związane jest to z jego szybkością pomiaru. Przy stosowaniu wolniejszego czujnika należało zmodyfikować algorytm sterowania, tak aby prędkość przy zbliżaniu się do określonej pozycji była mniejsza.

PODSUMOWANIE

Opisany w artykule sterownik pozwala na współbieżną pracę wielu silników elektrycznych. Sterownik charakteryzuje się pracą w podwójnej pętli sprzężenia zwrotnego. Umożliwia on stabilizację prędkości obrotowej silnika i/lub zachowanie stałej, zadanej odległości od obiektu badanego lub przeszkody. Sterownik ten zapewnia wysoką jakość sterowania, gwarantującą długotrwałą, bezawaryjną eksploatację z zachowaniem bezpieczeństwa zarówno obsługi jak i sterowanych obiektów.

Dalsze prace będą prowadzone w kierunku optymalizacji algorytmów sterowania oraz w celu zmniejszenia liczby linii komunikacyjnych między sterownikami.

Przedstawiony sterownik może znaleźć zastosowanie także w napędach elektrycznych pojazdów akumulatorowych, urządzeniach sterowanych silnikami DC, maszynach i urządzeniach z silnikami DC o rozbudowanych wymaganiach odnośnie do zużycia energii zasilania i dynamiki ruchu. Sterownik ten może być również wykorzystany do budowy aparatury do badań tribologicznych, która jest projektowana i produkowana w ITeE – PIB. Jest alternatywnym rozwiązaniem w testerach tribologicznych, w których stosowane są obecnie asynchroniczne silniki prądu zmiennego i sterowanie falownikowe (T-01, T-05, T-10, T-11, T-15, T-20). Może także być wykorzystany do zautomatyzowania nastaw obciążeniowych na stanowiskach badawczych.

LITERATURA

1. Kalus M., Skoczkowski T.: Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego, Pracownia Komputerowa Jacka Skalmierskiego 2003.
2. Łastowiecki J., Duszczyk K., Przybylski J., Ruda A., Sidorowicz J., Szulc Z.: Laboratorium podstaw napędu elektrycznego w robotyce, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2001.
3. Piekoszowski W., Szczerek M.: Aparatura do badań tribologicznych – Metoda i urządzenie do badania tribologicznych właściwości środków smarowych, rozdział w monografii „Aparatura badawcza oraz unikatowe urządzenia techniczne dla zaawansowanych technologii zrównoważonego rozwoju”, wyd. ITeE – PIB Radom 2015.
4. Chiu Choi H., „Applications of embedded controllers in speed and position controls”, International Conference on Industrial Electronics and Control Applications, ICIECA 2005, pp. 6–7.
5. El Din A.S.Z., „PLC-Based Speed Control of DC Motor”, CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC 2006, Vol. 2, pp. 1–6.
6. Guo-Shing Shing Huan, „PC-based PID speed control in DC motor”, International Conference on Audio, Language and Image Processing, ICALIP 2008, pp. 400–407.

7. Weber H.F., Pulse-Width Modulation DC Motor Control, Industrial Electronics and Control Instrumentation, 2006.
8. Xueqin Lu, The Pulse Width Modulation and its Use in Induction Motor Speed Control. Computational Intelligence and Design (ISCID), 2011 Fourth International Symposium.
9. Zhijun Liu, „PWM speed control system of DC motor”, International Conference Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011, Vol. 3, pp. 1301–1303.
10. Abdollah Khoei R., „Microprocessor based closed-loop speed control system for DC motor using power MOSFET”, Proceedings of the Third IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems, ICECS 1996, Vol. 2, 1996, pp. 1247–1250.
11. Noor Ali Y.S.E., Samsal Bahari Mohd, Bashi Hassan S.M., „Microcontroller performance for DC motor speed control system”, Power Engineering Conference, PECon 2003, pp. 104–109.
12. Moor S.B.M., Senan.Bashi M., Hasan M.K., „Microcontroller based adjustable closed-loop dc motor speed control”, Proceedings of Student Conference on Research and Development, SCORED 2003, pp. 59–63.
13. Abu Zaharin, „A study on the DC motor speed control by using back-EMF voltage”, Asian Conference on Sensors, 2003, pp.359-364.
14. Zhu Haishui, „Design on a DC Motor Speed Control”, International Conference Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010, Vol. 2, pp. 59–63.
15. Munje R.K., Roda M.R., Kushare & Bansidhar E., „Speed control of DC motor using PI and SMC”, Conference Proceedings (IPEC), 2010, pp. 943–950.
16. Radu Duma, „Embedded control of electrical motors”, 16th International Conference System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2012, pp. 1–6.
17. Meshram P.M., „Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor”, International Conference on Advances in Engineering Science and Management ICAESM 2012, pp. 117–122.
18. SHARP application note: http://www.sharpsma.com/webfm_send/1489.
19. Mrozek M., Multi-agent control system for the movement of uniaxial objects. Solid State Phenomena 2015 (Volume 237, 183–188).

Summary

A motor controller that allows for concurrent operation of many electric motors is described in the article. The motor controller is characterized by working in a dual feedback loop. It allows one to stabilize the engine speed and/or maintain a constant, predetermined distance from the test object or obstacle. This controller provides high quality control, with long, trouble-free operation while maintaining the safety of both people and controlled objects. Further work will be carried out towards the optimization of the control algorithms in order to reduce the number of lines of communication between controllers. The presented controller can also be used in drives of

battery-powered electric vehicles, appliances controlled by DC motors, and machines and devices with DC motors with extended demands on energy supply and the dynamics of movement. The controller can also be used to build tribological test apparatus, which is designed and manufactured in ITeE – PIB. There is an alternative solution in tribological testers in which asynchronous AC motors and control inverter (T-01, T-05, T-10, T-11, T-15, and T-20) are currently used. It can also be used to automate the setup load on test rigs.