

Marian HYLA

Andrzej LATKO

## WYBRANE PROBLEMY UKŁADU REGULACJI NAPĘDU Z SILNIKIEM TARCZOWYM PRĄDU STAŁEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono problemy związane z układami regulacji silników tarczowych. Zostały ogólnie omówione sposoby realizacji tego typu układów regulacji. Skupiono się przede wszystkim na regulatorach cyfrowych realizowanych z wykorzystaniem programowalnych sterowników logicznych oraz mikrokomputerów jednokładowych. Artykuł zawiera także opis i wyniki realizacji praktycznej cyfrowego regulatora położenia na mikrokomputerze jednokładowym INTEL 80C51GB. Napęd z silnikiem tarczowym prądu stałego z magnesami trwałymi zasilany z mostkowego tranzystorowego przekształtnika typu DC/DC został przebadany w układzie regulacji prędkości oraz w układzie regulacji położenia.

### DRIVE CONTROL SYSTEM OF DC DISK MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS - SELECTED PROBLEMS

**Summary.** In this paper problems connected with drive control system based on DC disk motors are concerned. Ways of this control system realisation and its construction based on programmable logic controllers or singlechip microcomputers are described in general. Also description and results of practical realisation of digital position control system with singlechip microcontroller INTEL 80C51GB applied are included in the paper. The research was carried out with DC disk motor supplied with DC/DC converter in speed and position control system.

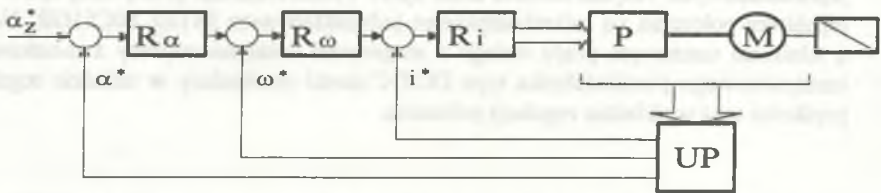
#### 1. WPROWADZENIE

W Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej prowadzone są prace związane ze sterowaniem i regulacją układów energoelektronicznych i napędowych. Jednym z kierunków badań są układy z silnikami tarczowymi prądu stałego z magnesami trwałymi. Ważnym problemem jest w tym przypadku pełne wykorzystanie możliwości, jakie daje silnik tarczowy w zakresie właściwości dynamicznych. Małe stałe czasowe (elektromagnetyczna i elektromechaniczna) wynikają bezpośrednio z jego konstrukcji. Wirnik w tego typu silniku

stanowi cienka tarcza (grubości około 1mm) o małej masie i uzwojeniach wytrawianych lub naklejanych bezpośrednio na tarczy z materiału dielektrycznego. W związku z tym, aby w pełni wykorzystać dynamikę silników tarczowych, należy stosować zarówno szybkie układy regulacji, jak i odpowiednie układy zasilania o szybkiej reakcji na zmianę sterowania. Ze względu na dobrą dynamikę, silniki te znalazły szczególnie zastosowanie w napędach pozycjonujących, na przykład w napędach robotów, gdzie dodatkowo istotne są małe rozmiary tych silników.

## 2. STRUKTURA UKŁADU REGULACJI POŁOŻENIA

Schemat blokowy układu regulacji położenia przedstawia rys. 1



Rys. 1. Struktura układu regulacji położenia.  $R_{\alpha}$ - regulator położenia,  $R_{\omega}$ - regulator prędkości,  $R_i$ - regulator prądu, P- przekształtnik DC/DC lub AC/DC, UP- układy pomiarowe, M- silnik tarczowy

Fig. 1. Position control structure.  $R_{\alpha}$ - position controller,  $R_{\omega}$ - speed controller,  $R_i$ - current controller, P- DC/DC or AC/DC converter, UP- measuring circuits, M- disk motor

W celu pełnego wykorzystania dynamiki silnika tarczowego przekształtnik zasilający nie powinien wprowadzać do układu dodatkowych znaczących stałych czasowych. Z tego względu klasyczne układy prostownikowe tyrystorowe niezbyt nadają się do zasilania tego typu silników. Zasilacze realizuje się opierając się na w pełni sterowalnych zaworach energoelektronicznych. W praktyce są to przekształtniki DC/DC, najczęściej tranzystorowe.

W układzie regulacji przedstawionym na rys. 1 występuje konieczność pomiaru wartości prądu twornika, prędkości i kąta obrotu wału silnika. Pomiaru prądu twornika oraz prędkości wirnika silnika wykonuje się zazwyczaj tradycyjnymi metodami.

Pomiar prądu w układach małej mocy jest realizowany za pomocą bocznika rezystancyjnego, a przy większych mocach stosuje się przekładniki prądowe prądu stałego w obwodzie twornika.

Pomiaru prędkości dokonuje się najczęściej za pomocą tachoprądnic lub przetworników obrotowo-impulsowych zliczając ilość impulsów w określonym przedziale czasu.

Przetworniki obrotowo-impulsowe można wykorzystać do określenia kąta obrotu wału silnika poprzez ciągłe zliczanie impulsów z przetwornika. Inną metodą pomiaru kąta obrotu jest zastosowanie transformatora położenia kąтового (tzw. resolwera). Urządzenie to posiada w wirniku dwa uzwojenia przesunięte względem siebie o  $90^\circ$ , oraz jedno uzwojenie w stojanie. Zasilając uzwojenia wirnika napięciami sinusoidalnymi o jednakowej częstotliwości i amplitudzie, przesuniętymi w fazie względem siebie o  $90^\circ$ , uzyskuje się w resolwerze wirujące, kołowe pole elektromagnetyczne. Pole to indukuje w uzwojeniu stojana napięcie sinusoidalne. Przesunięcie fazowe między napięciem indukowanym w stojanie a jednym z napięć zasilających wirnik jest proporcjonalne do położenia wirnika względem stojana resolwera. W praktyce to przesunięcie fazowe wyznacza się wykorzystując miejsca przejścia przez zero poszczególnych sygnałów napięciowych. Aby pomiar był poprawny, częstotliwość ( $\omega$ ) napięć zasilających resolwer musi być o wiele większa od prędkości obrotowej ( $\omega_s$ ) wirnika oraz stabilna w czasie. Stabilność częstotliwości uzyskuje się stosując generatory z syntezą cyfrową lub analogowe opierając się na mostku Wiena.

W przypadku cyfrowych układów regulacji należy mieć na uwadze dodatkowe opóźnienia wprowadzane przez przetworniki analogowo-cyfrowe A/C w pętlach sprzężeń zwrotnych.

Regulatory wykonywane są w postaci analogowej, cyfrowej (układy mikroprocesorowe, programowalne sterowniki logiczne) lub hybrydowej z analogowym regulatorem prądu lub prądu i prędkości. Cyfrowy algorytm regulacji realizuje się najczęściej opierając się na mikrokomputerach jednoukładowych lub programowalnych sterownikach logicznych. W praktyce cyfrowym algorytmem całkowania jest metoda prostokątów ze względu na wystarczającą dokładność i krótki czas obliczeń, który przy silnikach tarczowych ma istotne znaczenie.

Współczesne programowalne sterowniki logiczne są wystarczająco szybkie, aby je można stosować w układach regulacji silników tarczowych. Ich niewątpliwą zaletą jest ich uniwersalność, dostosowanie do warunków przemysłowych oraz bogate oprogramowanie. Użytkownik zazwyczaj ma możliwość pisania i edytowania programu jednym z trzech sposobów:

- w postaci schematu stykowego,
- w postaci bloków funkcjonalnych,
- w postaci listy kolejnych instrukcji.



Istnieją sterowniki, które mają procedury regulacyjne (PID) jako składnik języka programowania. W przypadku sterowników o budowie modułowej można wykorzystać moduły niezależnych regulatorów przeznaczone do wykorzystania w układach regulacji napędów. Moduły te w dużym stopniu działają niezależnie od jednostki centralnej programowalnego sterownika logicznego. Dodatkowe oprogramowanie umożliwia wizualizację procesu regulacji. Ponadto programowalne sterowniki logiczne są konstruowane do pracy w sieci, co umożliwia ich współpracę i wymianę danych między sobą i środowiskiem zewnętrznym.

Dobór nastaw regulatorów cyfrowych przeprowadza się korzystając z transmitancji dyskretnej obiektu regulacji lub na podstawie kryteriów Kesslera. W praktyce wstępnie stosuje się kryteria Kesslera z późniejszą weryfikacją nastaw na rzeczywistym obiekcie regulacji.

### 3. REALIZACJA PRAKTYCZNA UKŁADU REGULACJI NAPĘDU Z SILNIKIEM TARCZOWYM

W Zakładzie Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki zbudowano stanowisko laboratoryjne oraz przeprowadzono badania układu regulacji przedstawionego na rys. 2.

Obiektem regulacji był silnik tarczowy typu:

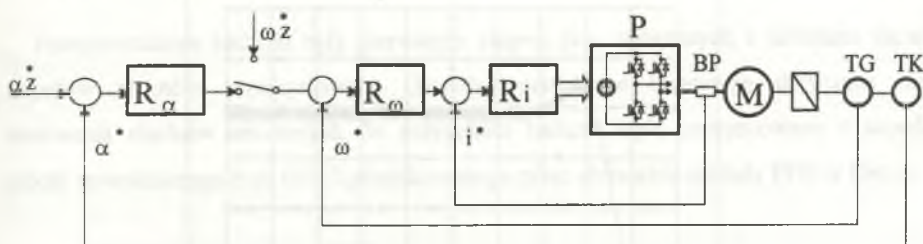
- PTM-200/R o następujących danych znamionowych:
- $P_n=1000$  W,  $I_n=14.5$  A,  $U_n=90$  V,  $n_n=3000$  obr/min,  $T_m=11$  ms,  $T_g=100$   $\mu$ s.

Był on sprzęgnięty mechanicznie z:

- tachoprądnicą typu PATO-79-i4,
- transformatorem położenia kąтового typu LTSa11c.

Pomiar prądu w obwodzie twornika silnika tarczowego został zrealizowany za pomocą bocznika rezystancyjnego.

Położenie wirnika silnika tarczowego było mierzone za pomocą transformatora położenia kąтового. Uzwojenia wirnika resolwera były zasilane napięciami sinusoidalnymi, przesuniętymi w fazie względem siebie o kąt  $90^\circ$ , o częstotliwości 2.5 kHz. Sinusoidalne napięcie zasilające było dostarczane z generatora z mostkiem Wiena, charakteryzującego się dużą stabilnością pracy, poprzez wtórnik emiterowy, który zapewniał, że generator nie będzie nadmiernie obciążany. Czas mierzony, z wykorzystaniem liczników PCA mikrokontrolera INTEL 80C51GB, pomiędzy przejściem przez zero jednego z napięć wirnika resolwera



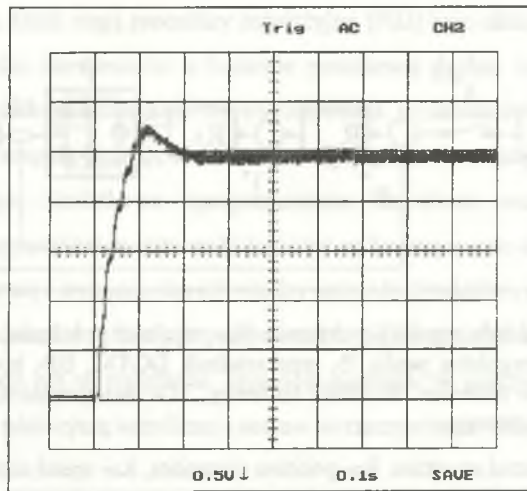
Rys. 2. Struktura układu regulacji położenia.  $R_\alpha$ - regulator położenia,  $R_\omega$ - regulator prędkości,  $R_i$ - regulator prądu,  $P$ - przekształtnik DC/DC,  $BP$ - bocznik rezystancyjny w obwodzie twornika,  $M$ - silnik tarczowy,  $TG$ - tachoprądnica,  $TK$ - transformator położenia kąтового

Fig. 2. Position control structure.  $R_\alpha$ - position controller,  $R_\omega$ - speed controller,  $R_i$ - current controller,  $P$ - DC-DC converter,  $BP$ - resistant shunt in armature circuit,  $M$ - disk motor,  $TG$ - rate generator,  $TK$ - resolver

a napięciem stojana jest proporcjonalny do kąta położenia wału silnika i stanowił on sygnał rzeczywisty położenia dla regulatora  $R_\alpha$ . Przekształtnik DC/DC zasilający silnik wykonano w postaci pełnego mostka tranzystorowego opierając się na modułach tranzystorów IGBT. Sterowanie prędkością obrotową silnika odbywało się poprzez zmianę wartości średniej napięcia wyjściowego przekształtnika, co było uzyskiwane metodą modulacji szerokości impulsów.

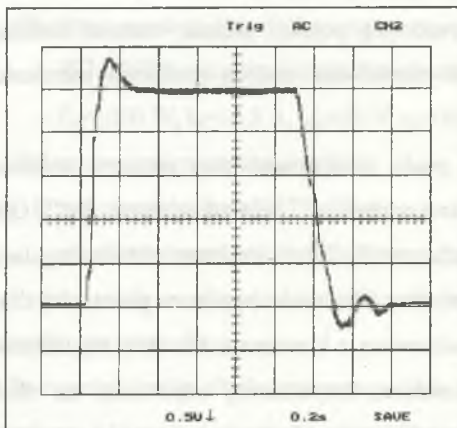
Cyfrowe regulatory położenia, prędkości i prądu zrealizowano przy pomocy systemu mikroprocesorowego zbudowanego na mikrokomputerze jednoukładowym 80C51GB. Układ posiada możliwość wyboru typu regulatora (P, PI) i struktury układu regulacji (regulacja położenia lub regulacja prędkości poprzez odłączenie regulatora położenia) oraz zmiany nastaw poszczególnych regulatorów realizowaną z klawiatury. Nastawy regulatorów zostały dobrane na podstawie kryteriów Kesslera. Przykładową odpowiedź na skok jednostkowy prędkości zadanej w układzie regulacji prędkości przedstawia rys. 3. Przebieg ma kształt charakterystyczny dla napędu z silnikiem obcowzbudnym z układem regulacji, którego nastawy zostały dobrane według kryteriów Kesslera. Natomiast przebieg prędkości w układzie regulacji położenia przedstawia rys. 4.

Przy nastawach regulatorów dobranych według kryteriów Kesslera wystąpiły oscylacje prędkości przy osiągnięciu pozycji zbliżonej do zadanego końcowego położenia (rys. 4.). Po skorygowaniu nastaw wyeliminowano to zjawisko, co przedstawia rys. 5.



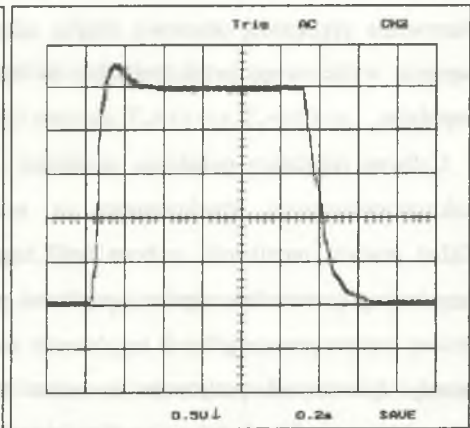
Rys. 3. Przebieg prędkości obrotowej silnika w odpowiedzi na skok jednostkowy prędkości zadanej w układzie regulacji prędkości

Fig. 3. Disk motor speed step function transient response with speed controller applied



Rys. 4. Przebieg prędkości obrotowej silnika tarczowego w układzie regulacji położenia

Fig. 4. Waveform of motor speed with position controller applied



Rys. 5. Przebieg prędkości obrotowej silnika tarczowego w układzie regulacji położenia po skorygowaniu nastaw regulatorów

Fig. 5. Waveform of motor speed with position controller applied after correction of controllers' settings

#### 4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania były pierwszym etapem prac związanych z układami regulacji napędów robotów przemysłowych. Zostały sprawdzone koncepcje dotyczące metod sterowania silników tarczowych. W przyszłości badania będą kontynuowane z napędami robota spawalniczego typu OJ-10 produkowanego przez słowackie zakłady PDS w Detvie.

#### LITERATURA

1. Warszawskie Zakłady Maszyn Elektrycznych WAMEL - Katalog wyrobów. Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego WEMA, Warszawa 1982.
2. Senderski A.: Struktury napędów pozycyjnych - wybrane problemy. Materiały konferencyjne Nowoczesne metody sterowania w energoelektronice i napędzie elektrycznym, Łódź-Dobieszków 8-12 grudnia 1993, s. 571-580.
3. GTR Module - Data book. Toshiba Corporation 1989.
4. GTR Module - Applications Notes. Toshiba Corporation 1989.
5. SIMATIC S5. S5-115U Programmable Controller. Catalogue ST 52.3 1990, Siemens AG 1990
6. Embedded Controller Applications Handbook. INTEL 1991.
7. 8-bit Embedded Controller Handbook. INTEL 1991.
8. Rydzewski A.: Mikrokomputery jednoukładowe rodziny MCS-51. WNT, Warszawa 1992.
9. Wójciak A.: Mikroprocesory w układach przekształtnikowych. WNT, Warszawa 1992.
10. Schönfeld R.: Digitale Regelung elektrischer Antriebe. Hüting Buch Verlag, Heidelberg 1990.
11. Čermák T.: Elektrické regulační pohony. Vysoká škola Baňská v Ostravě, Ostrava 1986.
12. Сервисная документация операционного модульного роботизированного участка ОЙ-10. PDS Detva 1989.

Recenzent: Dr hab. inż. Herbert Widlok

Wpłynęło do Redakcji dnia 29 czerwca 1995 r.



## Abstract

Disk motors belong to drives with very good dynamic especially due to their rotor construction. They are very often applied to drives with position controlled, for example robot drives.

In the first part of this paper a position control structure as usually used in DC disk motor control structure is presented in fig. 1. There are concerned following blocks:

- supplier P, which should not put too high additional inertia,
- measuring circuits - current, speed and position,
- controllers - ways of their construction, mainly digital controllers and their settings selection.

In the second part of the paper results of practical realisation of drive control system with DC disk motor. Digital controllers (position, speed, current) are built based on singlechip microcontroller INTEL 80C51GB. The system which is shown in fig. 2 has following abilities:

- possibility to choose control structure (position or speed control structure),
- possibility to select controller's type (P, PI),
- possibility to set controllers' settings.

The motor armature current was measured using resistant shunt, speed was measured by rate generator and rotor position was measured by resolver.

The DC disk motor was supplied with transistorised DC/DC bridge type converter made of IGBT modules.

This drive control system was examined in speed control structure. Fig. 3. presents motor speed step function transient response. Also the control system was researched in position control structure. At first when controllers settings were selected under the rules of Kessler criterion there was oscillation in speed transient response near the set position (fig. 4). After controllers settings correction there was no oscillation previously observed (fig. 5).

This work allows to verify the disk motor control conceptions. In the future farther researches with welding robot OJ-10 drives are planned.