

Tadeusz Rodacki  
Janusz Nowak

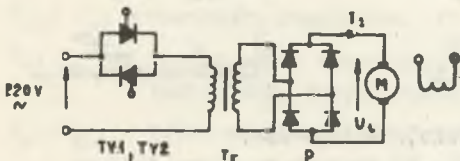
Instytut Podstawowych Problemów  
Elektrotechniki i Energoelektroniki

### ZAMKNIĘTY UKŁAD REGULACJI PRĘDKOŚCI SILNIKA PRĄDU STAŁEGO Z REGULACJĄ PO STRONIE PRĄDU PRZEMIENNEGO

**Streszczenie.** W artykule przeanalizowano możliwości regulacji prędkości obrotowej silnika obcowzbudnego małej mocy zasilanego z prostego, a zarazem taniego układu przekształtnika tyrystorowego. Podano koncepcję zamkniętego układu regulacji, który pomimo że silnik pracuje w strefie prądów ciągłych i nieciągłych zapewnia dużą dokładność i szybkość regulacji.

#### 1. Opis układu

W niektórych urządzeniach przemysłowych, szczególnie w ostatnim czasie, stosuje się napędy tyrystorowe małej mocy z silnikiem prądu stałego. Jednym z możliwych rozwiązań jest układ przedstawiony na rys. 1.



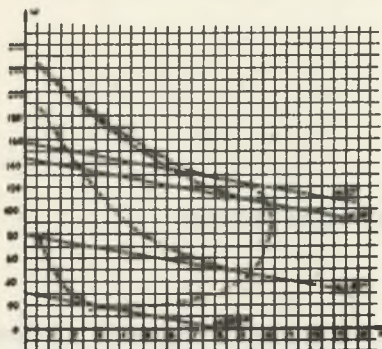
Rys. 1. TY1, TY2 - tyrystory, Tr - transformator, P - prostownik niesterowany

Zasadniczym elementem regulacyjnym jest tu wsteczno-równoległy układ tyrystorów sterowanych symetrycznie. Regulacja napięcia twornika odbywa się po stronie prądu przemiennego i do tego celu z powodzeniem zastosować można element regulacyjny jakim jest tyrystor symetryczny (triak). Triaki stały się powszechne i fakt ten dodatkowo skłonił autorów do podjęcia prób z ukła-

dem zasilania tego typu. Omawiany układ napędowy, nie wnikając w szczegółową analizę ekonomiczną należałoby polecać tam, gdzie zależy na płynnej regulacji prędkości w szerokich granicach przy zasilaniu jednofazowym i mocach do 5 kW.

Silnik obcowzbudny zasilany z przedstawionego przekształtnika posiada jednak nie najlepszą własności regulacyjne z racji tego, że pracuje w strefie prądów ciągłych i nieciągłych. W najgorszym przypadku przejście ze strefy prądów ciągłych do strefy prądów nieciągłych pojawia się przy momencie elektromagnetycznym wynoszącym około 0,8 momentu znamionowego.

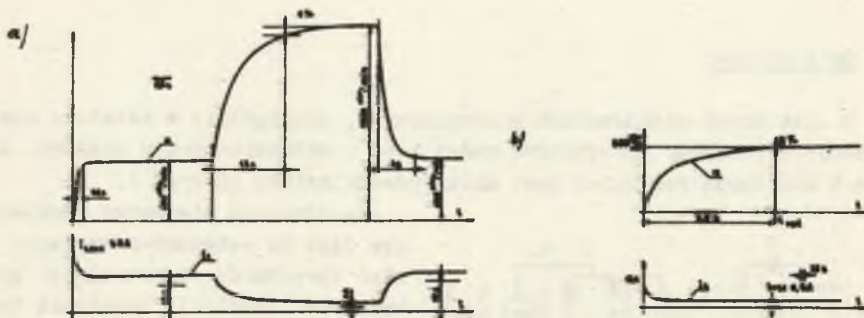
Charakterystyki mechaniczne badanego silnika są bardzo ustępliwe, co w połączeniu z dużym czasem narastania prędkości obrotowej na zadany skok



Rys. 2. Charakterystyki mechaniczne silnika obcowzbudnego  
 $P_N = 2,2 \text{ kW}$ ,  $U = 220 \text{ V}$ ,  $n_N = 1450 \text{ obr/min}$ ,  $I_N = 12,3 \text{ A}$

jednostkowy, sygnału prędkości ogranicza możliwości zastosowania tego napędu w przemyśle (patrz rys. 2 i 3). Podobne własności posiadają zresztą wszystkie układy jednofazowych napędów tyrystorowych małej mocy w przypadku wystąpienia prądów nieciągłych.

Własności statyczne i dynamiczne poprawia dławik wygładzający prąd twornika, lecz stosowanie go nie jest konieczne w przypadku wprowadzenia sprzężenia zwrotnego, co zostanie omówione w dalszej części artykułu.



Rys. 3. Charakterystyki dynamiczne

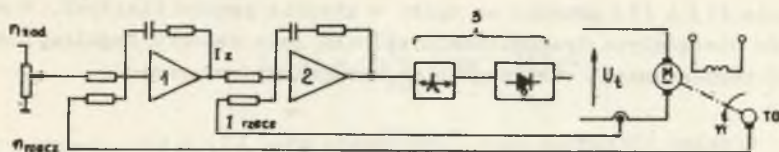
a) rozruch i odciążenia wału, b) rozruch na biegu jałowym

## 2. Wymagania stawiane układowi automatycznej regulacji prędkości obrotowej

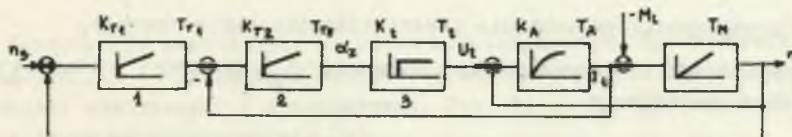
Zamknięty układ regulacji prędkości obrotowej silnika obcowzbudnego może być zrealizowany wg schematu podanego na rys. 4. Jest to układ szeregowego połączenia regulatora prędkości obrotowej i regulatora prądu twornika. Można go stosować, gdy napęd jest nierewersyjny i praca silnika odbywa się przy stałym strumieniu wzbudzenia.

Sygnał wyjściowy regulatora prędkości obrotowej jest sygnałem zadaniem dla regulatora prądu twornika.

Schemat blokowy odpowiadający takiej strukturze obwodów regulacji jest przedstawiony na rys. 5.



Rys. 4. Zasadniczy schemat szeregowej regulacji prędkości obrotowej i prądu twornika



Rys. 5. Schemat blokowy odpowiadający układowi połączeń przedstawionemu na rys. 4

Zajmijmy się bliżej pętlą regulacji prądu twornika. Przy założeniu, że  $T_M \gg T_A$  [3] transmitancja otwartego obwodu jest dana równaniem

$$K_o(p) = \frac{K_A}{1 + p T_A} \frac{K_t}{e^{-p T_t}} K_{R2} \frac{1 + p T_{R2}}{p T_{R2}}, \quad (1)$$

gdzie

$K_{R2}$ ;  $T_{R2}$  - parametry regulatora PI prądu twornika,

$K_t$ ;  $T_t$  - współczynnik wzmocnienia statycznego i czas martwy przekształtnika tyrystorowego,

$T_A$ ;  $T_M$  - elektromagnetyczna i elektromechaniczna stała czasowa silnika,

$K_A$  - współczynnik wzmocnienia członu reprezentującego obwód twornika silnika.

Jeżeli optymalizować pętlę regulacji prądu wg kryterium optimum modułu, to

$$T_{R2} = T_A,$$

wtedy

$$K_o(p) = K_{R2} K_t K_A \frac{1}{p T_A} \frac{1}{e^{-p T_t}}. \quad (2)$$

Równania (1) i (2) słuszne są tylko w strefie prądów ciągłych. W strefie prądów nieciągłych transmitancja silnika jako obiektu regulacji zmienia się i transmitancja otwartego obwodu regulacji ma postać

$$K_o(p) = K_{r2} \frac{1 + pT_{r2}}{pT_{r2}} \frac{1}{e^{pT_t}} K(i, \alpha), \quad (3)$$

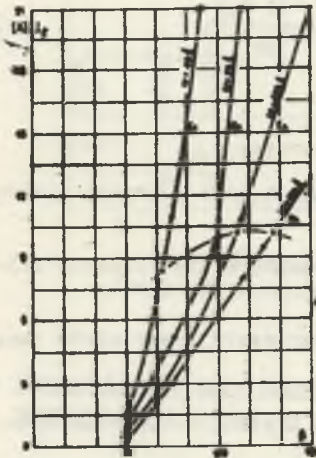
gdzie  $K(i, \alpha) = K_1 K_2$

$K_1$  - współczynnik wzmocnienia przekształtnika tyrystorowego,

$K_2$  - współczynnik reprezentujący parametr  $K_A$  zmienny w strefie prądów nieciągłych.

Równanie (2) różni się od równania (3) tym, że w równaniu (3) występujący człon  $(1 + pT_{r2})$  w liczniku upraszcza się z wyrażeniem  $\frac{1}{1 + pT_A}$  i znika.

Z równania (3) wynika, że człon  $(1 + pT_{r2})$  jest niepożądany i przy niezmiennych nastawach regulatora po przejściu ze strefy prądów ciągłych do strefy prądów nieciągłych może być przyczyną niestabilności [2].



Rys. 6. E - parametr - siła elektromotoryczna silnika  
 $\beta = 180 - \alpha$  - kąt zapłonu tyrystorów

Zmienność współczynnika  $K(i, \alpha) = \frac{\Delta I_t}{\Delta \alpha}$  z

przedstawiają charakterystyki podane na rys. 6. Kształt krzywych  $K(i, \alpha)$  jest zależny od struktury przekształtnika tyrystorowego i rodzina krzywych z rys. 6 odnosi się tylko do układu przedstawionego na rysunku 1.

Do granicy prądów nieciągłych zaznaczonej linią przerywaną na rys. 6 nachylenie charakterystyk jest stałe. Wyraża to stałość współczynnika  $K(i, \alpha)$ . Po przejściu do strefy prądów nieciągłych nachylenie to zmienia się i  $K(i, \alpha)$  maleje.

Transmitancja pętli regulacji prądu jest w strefie prądów nieciągłych określona przez wyrażenie

$$K(i, \alpha) \frac{1}{e^{pT_t}}$$

Aby uzyskać transmitancję o postaci podanej równaniem (2) po wprowadzeniu regulatora do pętli regulacji prądu regulator ten powinien posiadać transmitancję

$$G_r(p) = \frac{1}{p T_{rn}}$$

Uzyska się wtedy równanie

$$K_n(p) = \frac{1}{pT_{rn}} \frac{1}{e^{pT_t}} K(i, \alpha). \quad (4)$$

Aby równania (4) i (2) były identyczne, musi zachodzić związek

$$\frac{K(i, \alpha)}{T_{rn}} = \frac{K_{r2} K_t K_A}{T_A}. \quad (5)$$

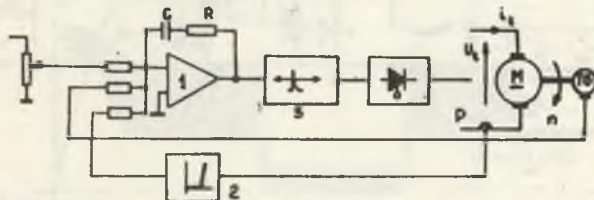
Warunek (5) gwarantuje, że pętla regulacji prądu tak w strefie prądów ciągłych jak i nieciągłych będzie się charakteryzować identycznymi własnościami statycznymi i dynamicznymi. Jest to możliwe do uzyskania jedynie w układach adaptujących się [2].

W strefie prądów ciągłych regulator winien mieć strukturę PI, a w strefie prądów nieciągłych strukturę I o zmiennej stałej czasowej całkowania zgodnie z równaniem (5).

Przytoczona analiza dowodzi, że spełnienie wszystkich wymagań stawianych przez omawiany układ regulacji, wymagałoby zaangażowania dużych środków finansowych i w wielu konkretnych przypadkach jego praktyczna realizacja może być zbyt kosztowna.

### 3. Struktura obwodów regulacji w układzie modelowym

Mając na uwadze mały koszt układu regulacji, prostotę budowy i niezawodność działania, zdecydowano się zastosować w układzie modelowym tylko jeden regulator prędkości obrotowej, a w pętli regulacji prądu tylko nieliniowe ujemne sprzężenie działające z progiem, chroniące tyrystory, diody i komutator maszyny od przeciążeń prądowych. Schemat blokowy uproszczonego układu pokazano na rys. 7.



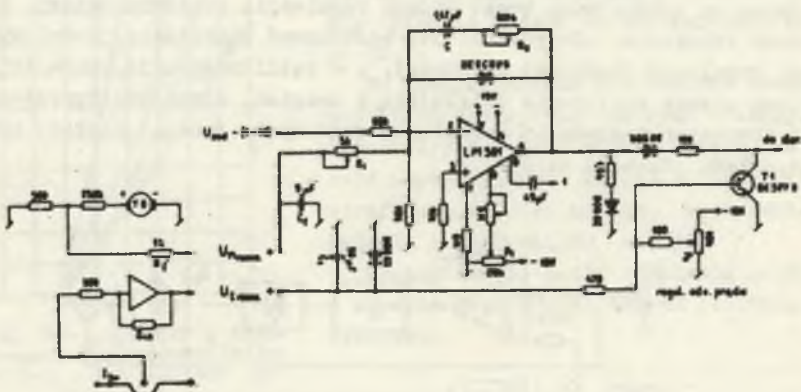
Rys. 7. 1 - regulator prędkości typu PI, 2 - blok nastawianego odcięcia prądowego, S - układ sterowania kątem zapłonu, P - przekładnik halotronowy prądu stałego

Celem ustalenia optymalnych nastaw regulatora i oceny współpracy sprzężenia prądowego z pętlą regulacji prędkości zamodelowano uproszczony układ na maszynie analogowej, gdyż obliczenia na drodze analitycznej są bardzo skomplikowane. Układ pracuje w strefie prądów ciągłych i nieciągłych, a tym samym jest nieliniowy [1].

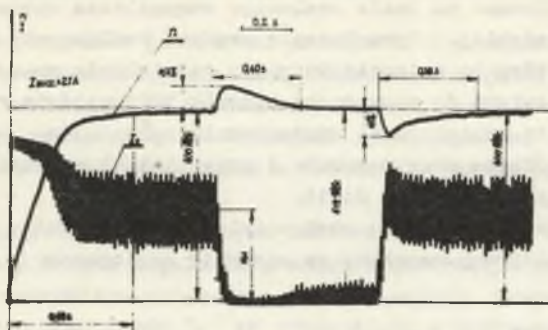
- Nie wnikając w szczegóły analizy na maszynie analogowej stwierdzono, że
- Stosowanie dławika wygładzającego pulsacje prądu jest niekonieczne (przy dużych indukcyjnościach stwierdzono niestabilność).
  - Regulator prędkości obrotowej powinien mieć transmitancję typu PI. Gwarantuje to sztywność charakterystyk mechanicznych ok. 1,5%. Regulator proporcjonalny pozwalał na uzyskanie sztywności w najlepszym przypadku ok. 10%.
  - Czasy trwania stanów przejściowych w układzie zamkniętym zmniejszają się około 25 razy w porównaniu z czasami w układzie otwartym.
  - Zakres regulacji prędkości obrotowej wynosi 1:50.
  - Zwiększenie momentu bezwładności na wale silnika 5-krotnie nie powoduje utraty stabilności, tylko wydłuża czasy trwania stanów przejściowych.
  - Zwiększenie indukcyjności w obwodzie twornika dwukrotnie przy niezmiennych nastawach regulatora powoduje utratę stabilności.

Układ rzeczywisty zachował się podobnie jak układ zamodelowany na maszynie analogowej. Ograniczenie prądowe działało poprawnie i umożliwiało regulację progu odcięcia od 1 do  $1,7 I_N$ .

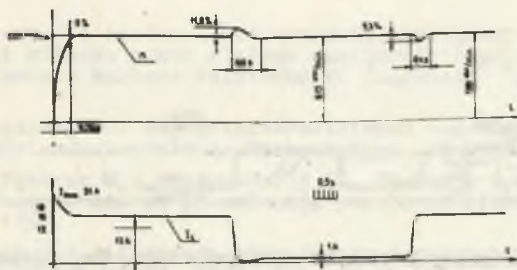
Schemat ideowy regulatora bez obwodów zasilania pokazano na rys. 8.



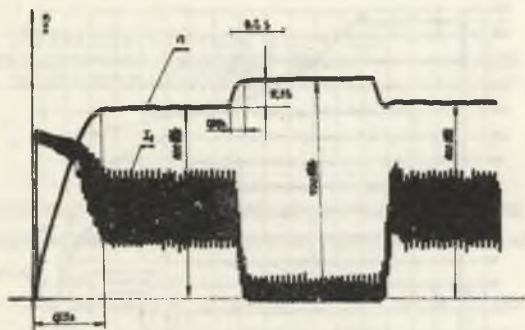
Rys. 8. Schemat ideowy regulatora prędkości obrotowej i odcięcia prądowego



Rys. 9. Oscylogramy obliczone na maszynie analogowej. Rozruch + skoki obciążenia na wale silnika, regulator typu PI



Rys. 10. Oscylogramy prądu twornika i prędkości obrotowej w układzie rzeczywistym. Regulator typu PI

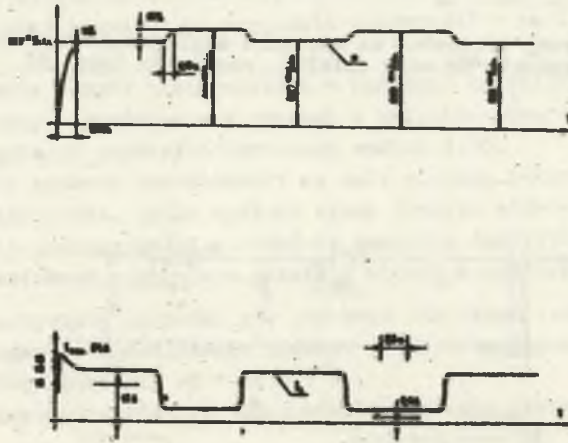


Rys. 11. Oscylogramy obliczone przez maszynę analogową. Regulator typu P

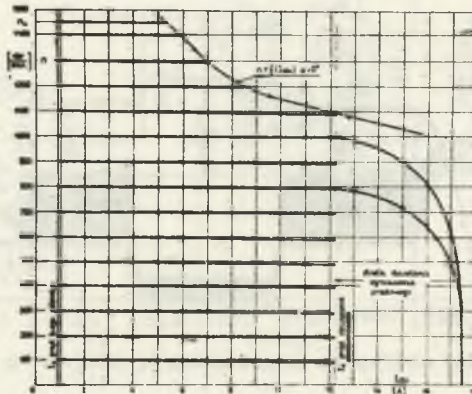
Regulator zbudowano na bazie scalonego wzmacniacza operacyjnego LM 301 produkcji amerykańskiej. Ograniczenie prądowe realizowane jest za pomocą tranzystora T1, który po osiągnięciu progu zadziałania przez sygnał z przekładnika prądu, zwiera do masy przez opornik  $100\Omega$  wyjście regulatora prędkości. Powoduje to zmniejszenie wysterowania tyrystorów.

Zjawiska zachodzące przy rozruchu i przy skokach momentu na wale silnika ilustrują oscylogramy od 9 do 12.

Dla porównania zamieszczono obok oscylogramów z układu rzeczywistego odpowiednie oscylogramy uzyskane na maszynie analogowej.



Rys. 12. Oscylogramy z układu rzeczywistego. Regulator typu P



Rys. 13. Rodzina charakterystyk mechanicznych badanego silnika pracującego w zamkniętym układzie regulacji



Podobieństwo oscylogramów potwierdza prawidłowość zamodelowania. Jak wynika z przebiegów prędkości i prądu przy rozruchu i skokach momentu obciążenia na wale, zakłócenia są szybko likwidowane, przy czym przebiegi aperiodyczne stanów nieustalonych w układzie zamkniętym są zdecydowanie krótsze i jakościowo zupełnie inne niż w układzie otwartym (porównaj z rysunkiem 3a, b).

Rodzinnę charakterystyk mechanicznych zamieszczono na rys. 13. Duża sztywność ok. 1,5% i duży zakres regulacji prędkości obrotowej preferuje ten układ napędowy do szerokiego stosowania w urządzeniach przemysłowych wymagających niedużych mocy rzędu 3-5 kW pracujących w systemach zautomatyzowanych i zdalnie sterowanych. Układ został poddany gruntownym badaniom laboratoryjnym, a uzyskane wyniki dowodzą, że jest on pełnosprawnym napędem małej mocy.

#### 4. Literatura

1. Rodacki T., Nowak J.: Zastosowanie techniki analogowej do badania statyki i dynamiki silnika prądu stałego zasilanego z przekształtnika tyrystorowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, "Elektryka" nr 38, 1973.
2. Buxbaum A.: Regelung von Stromrichterantrieben bei lückendem und nicht lückendem Ankerstrom. Technische Mitteilungen AEG Telefunken 6, 1969.
3. Nejmark B.E., Pistrak M., Slezanowski S., Fiszbejn B.G.: Sintez bystrodejstwijszczich sistem uprawlenija wentilnym elektropriwodom. Elektrichestwo 4, 1967.
4. Ustrojstwo i princip diejstwija adaptiwnogo regulatora toka jakorja. Ekspres - Informacja nr 23, 1972, str. 11-19.

ЗАМКНУТАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА ПИТАЕМОГО ОТ ДИОДОВОГО МОСТА  
С ИМПУЛЬСИРОВАНИЕМ СО СТОРОНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### Резюме

В статье рассмотрены возможности регулирования скорости двигателя постоянного тока малой мощности питаемого от простого и дешёвого тиристорного преобразователя.

В статье предложена замкнутая система управления скоростью вращения, которая даёт малую ошибку и большое быстродействие, хотя двигатель работает с прерывистыми и непроводными токами.

**THE ISOLATED SYSTEM OF CONTROLLING VELOCITY  
OF THE DC MOTOR FED BY A DIODE BRIDGE WITH  
IMPULSING ON THE SIDE OF THE ALTERNATING CURRENT**

**S u m m a r y**

In our article we have considered the possibilities of rotational velocity control of the separately excited motor of low power fed by a simple and not expensive system of silicon controlled rectifier. We have given here the conception of an isolated system of control which, in spite of the fact that the motor works in the zone of continuous and discontinuous currents, secures high accuracy and speed of control.