

MIKOŁAJ ZIAJA

Katedra Automatyki Procesów Przemysłowych

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI SILNIKÓW OBCOWZBUDNYCH PRĄDU STAŁEGO
WSPÓŁPRACUJĄCYCH Z TYRYSTOROWYMI PRZETWORNICAMI NAPIĘCIA

Streszczenie. Po omówieniu sposobu regulacji prędkości silnika obcowzbudnego prądu stałego za pomocą przetwornicy prostownikowej o regulowanym kącie zapłonu, przedstawiono wyniki otrzymane z badań współpracy silników z przetwornicami prostownikowymi przy czym szczególną uwagę zwrócono na wpływ charakteru prądu, ciągły - przerywany na właściwości statyczne silnika.

W oparciu o otrzymane charakterystyki wytłumaczono przyczyny zmian charakteru prądu oraz podano sposoby wpływania na wartości prądów granicznych dla których zaczyna się zjawisko prądu przerywanego. W zakończeniu porównano wielkości prądów granicznych otrzymanych z pomiarów i z obliczeń.

Wiele procesów przemysłowych wymaga stosowania napędów o regulowanej prędkości obrotowej. Wśród różnych rozwiązań napędów z regulowaną prędkością o średnich i dużych mocach - najszersze zastosowanie znalazł silnik obcowzbudny prądu stałego, którego zmianę prędkości obrotowej można uzyskać przez zmianę napięcia zasilającego twornik. Przetwornice służące do zmiany napięcia twornika przeszły swoistą ewolucję i dzisiaj można spotkać układy napędowe z różnego typu przetwornicami, przy czym do najbardziej rozpowszechnionych należą:

- a) przetwornica maszynowa - układ Leonarda
- b) przetwornica transduktorowa
- c) przetwornica prostownikowa.

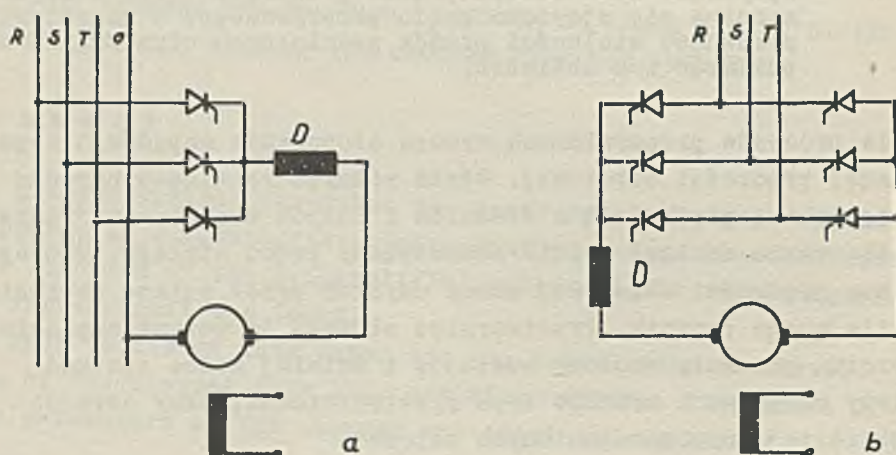
Szybki rozwój produkcji półprzewodnikowych diod sterowanych tyrystorów na stosunkowo wysokie napięcia i duże prądy stworzył możliwości budowania prostownikowych przetwornic napięcia średnich i dużych mocy.

Zasilanie silnika prądu stałego z prostownikowej przetwornicy napięcia stwarza problemy nie występujące przy zasilaniu silnika prądu stałego z przetwornicy maszynowej.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono właściwości układu silnik-przetwornica prostownikowa oraz pokazano wyniki otrzymane z badań współpracy silnika z przetwornicami prostownikowymi. Badaniu poddano współpracę tego samego silnika z przetwornicami:

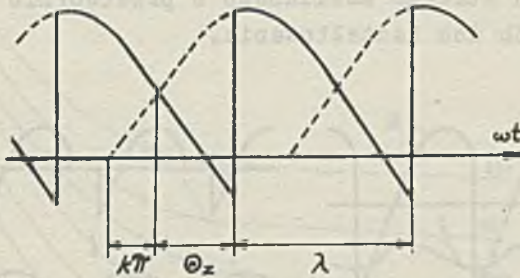
- a) trójfazową jednopółkową - trójimpulsową,
- b) trójfazową mostkową - sześciimpulsową,

przy czym stworzono jednakowe warunki pracy, tak aby otrzymane wyniki były porównywalne. Na rys. 1 przedstawiono budowę obydwu badanych przetwornic.



Rys. 1. Tyrystorowe przetwornice napięcia a) trójimpulsowa, b) sześciimpulsowa

Regulację napięcia twornika a zatem regulację prędkości obrotowej uzyskuje się przez zmianę kąta zapłonu prostowników. Sposób oznaczania kąta zapłonu α oraz kąta przewodzenia λ przyjęto jak na rysunku 2.



Rys. 2. Sposób oznaczania kąta zapłonu oraz kąta przewodzenia tyrystora

Kąt zapłonu prostownika (α_z) mierzony jest od momentu zrównania się napięć w dwu kolejnych fazach, natomiast kąt przy którym następuje to zrównanie można wyliczyć z zależności:

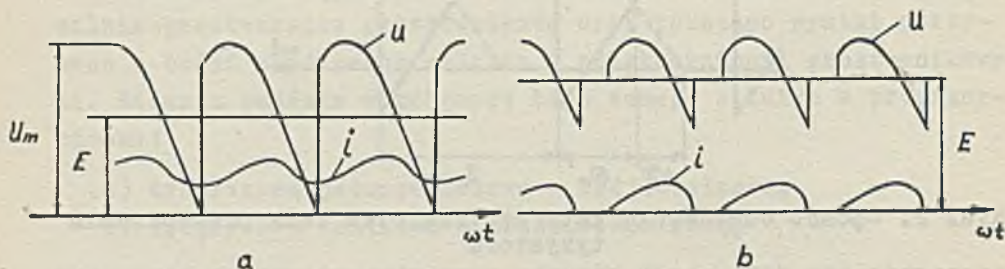
$$\alpha = k \cdot \pi = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{m} \right) \cdot \pi$$

gdzie:

m - ilość faz przetwornicy.

Współpraca silnika z przetwornicą prostownikową o regulowanym kącie zapłonu jest zagadnieniem prowadzącym się do współpracy prostownika sterowanego z obwodem zawierającym indukcyjność, oporność i S.E.M. Jeżeli założymy, że oporności i indukcyjności w obwodzie twornika są stałe, a zmienia się S.E.M. silnika na skutek zmian obrotów, to wraz ze zmianą S.E.M. zmieniać się będzie wartość prądu oraz jego charakter. Zmiana charakteru prądu $i(t)$ rys. 3, polega na tym, że dla pewnych wartości kąta zapłonu (α_z) oraz S.E.M. silnika E prąd będzie płynął nieprzerwanie rys. 3a, zaś dla pozostałych wartości (α_z) oraz E przebieg prądu składać się będzie z szeregu impulsów rys. 3b. Zmiana charakteru prądu z ciągłego na przerywany i odwrotnie ma swoje odzwierciedlenie we właściwościach statycznych i dynamicznych układu przetwornica prostownikowa - silnik.

Z kolei omówione zostaną charakterystyki statyczne silnika obcowzbudnego prądu stałego zasilanego z przetwornic prostownikowych oraz sposób ich kształtowania.



Rys. 3. Przebiegi napięć i prądów w układzie przetwornica silnika a) prąd ciągły, b) prąd przerywany

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono charakterystyki $n = f(I)$ silnika obcowzbudnego zasilanego z przetwornic tyrystorowych:

- a) trójimpulsowej
- b) sześciimpulsowej

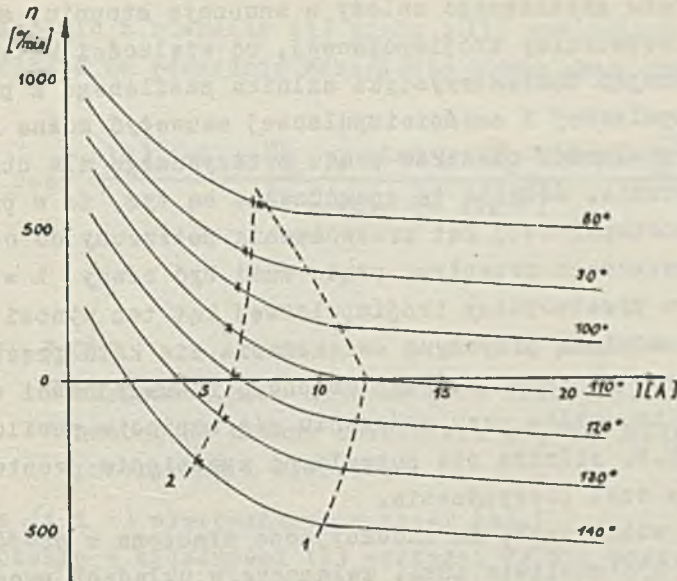
dla różnych kątów zapłonu α .

Podczas zdejmowania charakterystyk $n = f(I)$ obserwowano na oscyloskopie przebieg prądu $i(t)$ i wyznaczono wielkości prądów granicznych - to jest takich przy których następowała zmiana charakteru prądu z ciągłego na przerywany i odwrotnie.

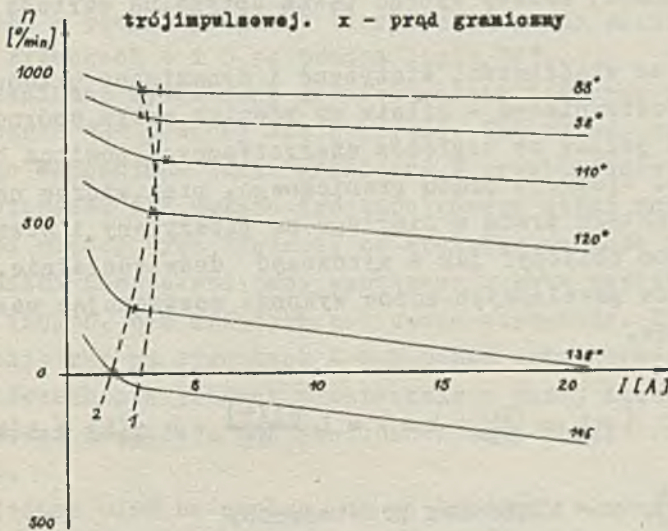
W ten sposób wyznaczone wielkości prądów przedstawiono na charakterystykach $n = f(I)$ za pomocą linii przerywanych "1".

W obszarze prądu ciągłego charakterystyki silnika są prostoliniowe i podobne do tych, jakie otrzymujemy przy zasilaniu silnika z przetwornicy maszynowej.

W obszarze prądu przerywanego charakterystyki są nieliniowe i obroty zmieniają się od obrotów idealnego biegu jałowego - podczas których S.E.M. silnika byłaby równa napięciu szczytowemu przetwornicy (nastąpi to przy kącie przewodzenia $\lambda = 0$) aż do obrotów przy których nastąpi przejście do obszaru prądu ciągłego (nastąpi to przy kącie przewodzenia $\lambda = \frac{2\pi}{m}$).



Rys. 4. Charakterystyki $n = f(I)$ silnika zasilanego z przetwornicy trójimpulsowej. x - prąd graniczny



Rys. 5. Charakterystyki $n = f(I)$ silnika zasilanego z przetwornicy sześciopulsowej. x - prąd graniczny

Wartość prądu granicznego zależy w znacznym stopniu, szczególnie dla przetwornicy trójimpulsowej, od wielkości kąta zapłonu \textcircled{H}_z . Porównując charakterystyki silnika zasilanego z przetwornic trójimpulsowej i sześciimpulsowej zauważyć można poważne różnice w wielkości obszarów prądu przerywanego dla obydwu typów przetwornic. Różnice te spowodowane są tym, że w przetwornicy sześciimpulsowej kąt przewodzenia potrzebny do osiągnięcia nieprzerwanego przepływu prądu musi być równy $\lambda = 60^\circ$, natomiast w przetwornicy trójimpulsowej kąt ten wynosi $\lambda = 120^\circ$. Zasadniczą przyczyną zwiększania się kąta przepływu przy wzroście obciążenia, jest obecność indukcyjności w obwodzie twornika, która przy zrównaniu się napięcia chwilowego sieci z S.E.M. silnika nie pozwala na zgaśnięcie prostownika i przedłuża czas przewodzenia.

Można stąd wnioskować, że indukcyjność włączona w obwód twornika powinna być możliwie duża, zwłaszcza w układach prostownikowych o małej liczbie impulsów. Biorąc jednak pod uwagę, że zwiększenie indukcyjności wpływa na wzrost stałej czasowej obwodu twornika co z kolei ma ujemny wpływ na właściwości dynamiczne układu, należy wybrać pewną optymalną wartość indukcyjności.

Oczywiście na właściwości statyczne i dynamiczne układu, przetwornica prostownikowa - silnik ma również wpływ oporność twornika, która jednak ze względów energetycznych powinna być jak najmniejsza. Wielkość prądu granicznego, przy którym następuje zmiana charakteru prądu z ciągłego na przerywany i odwrotnie, można zarówno obliczyć jak i wyznaczyć doświadczalnie. Obliczenie prądów granicznych można wykonać rozwiązując następujące równanie.

$$U_m \sin(\omega t + \textcircled{H}_z + k\pi) = L \frac{di(t)}{dt} + R i(t) + E(t) \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{2} - \frac{1}{m}, \quad m - \text{ilość faz przetwornicy}$$

L - całkowita indukcyjność obwodu twornika

R - całkowita oporność obwodu twornika

E(t) - S.E.M. silnika.

Po wyznaczeniu z równania (1) prądu $i(t)$ znaleziono wyrażenia, które pozwala na pośrednie określenie prądu granicznego.

$$E_g = U_m \cos \psi \frac{\sin \left[(1-k)\omega t + \frac{H_z}{\omega} - \psi \right] - \sin \left(\omega k t + \frac{H_z}{\omega} - \psi \right) \exp \left(-\frac{2\pi}{m} \text{otg} \psi \right)}{1 - \exp \left(-\frac{2\pi}{m} \text{otg} \psi \right)} \quad (2)$$

gdzie:

$$\text{otg} \psi = \frac{R}{\omega L}$$

E_g - wartość S.E.M. silnika przy której dla $\frac{H_z}{\omega} = \text{const}$ następuje zmiana charakteru prądu - ciągły na przerywany i odwrotnie.

Równania (1 i 2) wprowadzono w pracy [4].

Po wyliczeniu z zależności (2) wartości E_g dla poszczególnych kątów zapłonu i podzieleniu ich przez iloczyn $\sigma_g \cdot \phi$ wyznaczony z danych znamionowych silnika ($E_N = \sigma_g \phi n_N$), obliczono obroty za pomocą których znaleziono na charakterystykach $n = f(I)$ rys. 4 i 5 wartości teoretyczne prądów granicznych.

Wyznaczone w powyższy sposób teoretyczne prądy graniczne pokazano na rysunkach 4 i 5 za pomocą linii "2".

Linie graniczne wyznaczono doświadczalnie "1" oraz obliczone teoretycznie "2" powinny się pokrywać. Dla układu sześciopulsowego wspomniane linie graniczne w przybliżeniu się nakładają, natomiast dla układu trójimpulsowego widać znaczne rozbieżności między tymi liniami, co spowodowane może być niedokładnościami powstałymi przy wyznaczaniu kąta zapłonu $\frac{H_z}{\omega}$ oraz wpływem innych, nie wziętych pod uwagę czynników. Porównując charakterystyki na rysunkach 4 i 5 można wnioskować o lepszych właściwościach statycznych przetwornic o dużej ilości impulsów ponieważ posiadają one stosunkowo mały obszar prądów przerywanych.

Należy jednak mieć na uwadze, że za lepszymi właściwościami przetwornic o większej ilości impulsów kryje się znaczny wzrost kosztów i znaczna komplikacja układów sterujących.

Wady przetwornic o małej ilości impulsów można skompensować za pomocą układu regulacyjnego, w jaki powinien być wyposażony każdy napęd tyrystorowy.

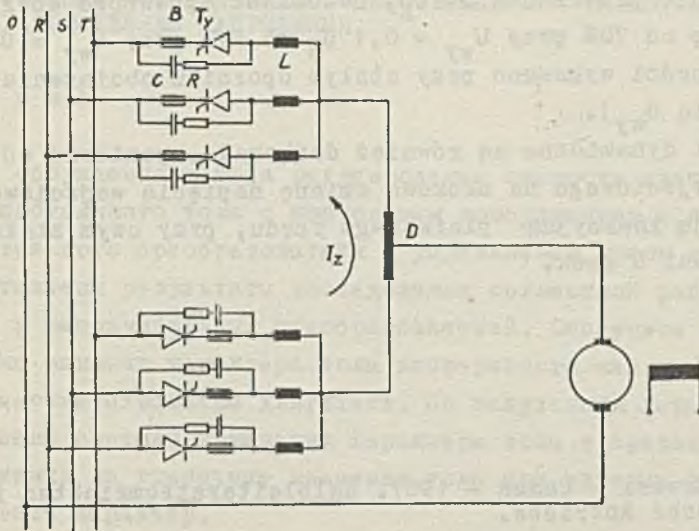
Czynnikiem decydującym w poważnym stopniu o wyborze typu przetwornicy jest moc napędu. Dla mniejszych mocy i przy napędach o niezbyt wysokich wymaganiach dokładności, można z powodzeniem stosować przetwornice trójimpulsowe, natomiast dla napędów o większych mocach powyżej 10 kW należy zwiększyć ilość impulsów przetwornicy do wartości od 6 do 12 na okres.

Opisane wyżej badania przeprowadzone zostały na przetwornicach tyrystorowych zbudowanych w Katedrze Automatyki Procesów Przemysłowych. Do budowy przetwornic użyto tyrystorów dostarczonych przez firmę Westinghouse typu 42-T-10, natomiast układy sterujące zapłonami tyrystorów zaprojektowano i wykonano w Katedrze. Tyrystory w porównaniu z stosowanymi dotychczas tyratronami lub prostownikami rtęciowymi są znacznie mniej odporne na przeciążenia w związku z czym konieczne jest stosowanie szeregu dodatkowych elementów, które mają za zadanie ograniczenie możliwości zniszczenia tyrystorów, Zniszczenie tyrystora może nastąpić przez: przeciążenie prądowe, przepięcie lub przekroczenie dopuszczalnego $\frac{di}{dt}$. W zbudowanych przetwornicach zastosowano szereg dodatkowych elementów ochronnych eliminujących powyższe możliwości uszkodzenia tyrystora.

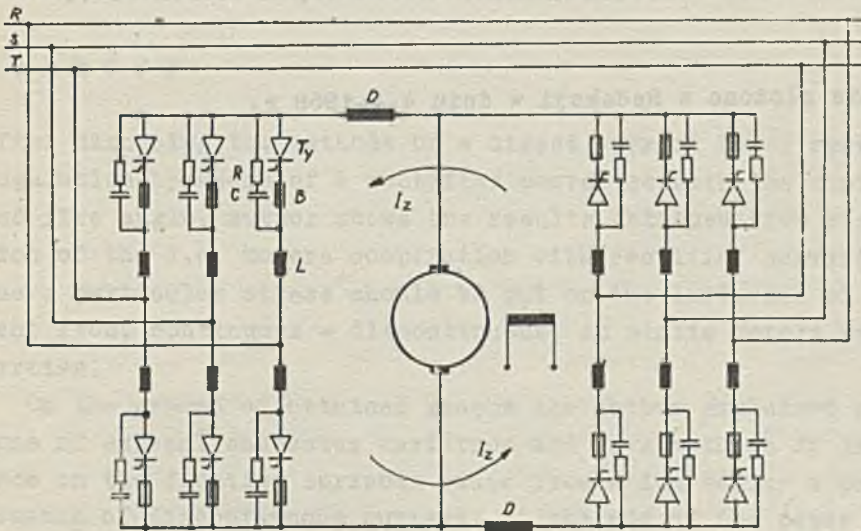
Zabezpieczenie przed przeciążeniem prądowym stanowi specjalny bezpiecznik o odpowiednio dobranej charakterystyce, zmniejszenie przepięć na tyrystorach spowodowanych głównie komutacją tyrystorów uzyskano przez dołączenie do tyrystora obwodu RC, natomiast ograniczenie przyrostu prądu $\frac{di}{dt}$ uzyskano przez włączenie w szereg z każdym tyrystorem indukcyjności L. W przypadku budowy przetwornic rewersyjnych wskazanym jest stosowanie dodatkowych dławików D, które mają również za zadanie ograniczenie prądów zwarciovych I_z .

Szczególne schematy zbudowanych przetwornic napięcia przedstawia rys. 6 i 7.

Właściwości statyczne zbudowanych przetwornic są bardzo dobre i charakteryzują się one następującymi parametrami: zmiana na-



Rys. 6. Trójimpulsowa rewersyjna przetwornica napięcia; Ty - tyrystor, B - bezpiecznik, C - kondensator, R - opór, L - indukcyjność, D - dławik



Rys. 7. Sześciopulsowa przetwornica napięcia; Ty - tyrystor, B - bezpiecznik, C - kondensator, R - opór, L - indukcyjność, D - dławik

pięcia wyjściowego przetwornic przy zmianie obciążenia od 0 - I max nie przekracza 5% U_N , natomiast sprawność energetyczna waha się od 70% przy $U_{wy} = 0,1 U_N$ do 97% przy $U_{wy} = U_N$ (pomiar sprawności wykonano przy stałym oporniku obciążenia i zmieniającym się U_{wy}).

Właściwości dynamiczne są również doskonałe, ponieważ odpowiedź napięcia wyjściowego na skokową zmianę napięcia wejściowego jest funkcją inercyjną pierwszego rzędu, przy czym stała czasowa T wynosi 6 msek.

LITERATURA

- [1] Brown Boveri - Baden - 1967. Halbleiterstromrichter für elektrische Antriebe.
- [2] The English Electric Company Limited Stafford - 1967. Thyristor Converter Equipments For D.C. Loads.
- [3] Banaszkiwicz A. - Tyristory. Nowa Technika - Zeszyt 62.
- [4] Bartosiński E. - Analiza obwodów prostownikowych sterowanych fazowo. Przegląd elektrotechniczny nr 8 rok 1967.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 4.4.1968 r.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА
И ПОСТОЯННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СОДЕЙСТВУЮЩЕГО С ТИРИСТОРНЫМИ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НАПРЯЖЕНИЯ

Р е з ю м е

После обсуждения метода регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока с постоянным возбуждением с помощью выпрямительного преобразователя с управляемым углом зажигания, представлены результаты исследования совместной работы двигателей и выпрямительных преобразователей. Особенное внимание уделено влиянию характера тока непрерывного или прерывного, на статические параметры двигателя. По полученным характеристикам объяснено причины изменения характера тока и предложены способы влияния на граничные значения тока при которых приобретает прерывный характер.

В конце статьи сравнено граничные значения тока полученные по расчётам и экспериментам.

INVESTIGATIONS OF PROPRIETIES OF DIRECT-CURRENT MOTOR THAT
COWORK WITH THYRISTORS VOLTAGE CONVERTERS

S u m m a r y

After discussing the methods of a direct current motor speed regulation by means of a rectifier convertes with the controlled fire angle, author shows the results obtained from research of the d.c. motors cooperation with rectifier converters, where partioular stress should be put on the influence of ourrent from, continuous - discontinuous, on static motors properties.

On the ground of obtained graphs the author explained reasons of current character variation and gave methods of influence on the frontier currents value from which begins a phenomenon of discontinuous current. At the end of the paper the author compares values of frontier currents obtained from measurements and from the calculation.