ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1990

Seria: GÓRNICTWO z. 184 Nr kol. 1065

Marian FABIAN
Marek GELNER

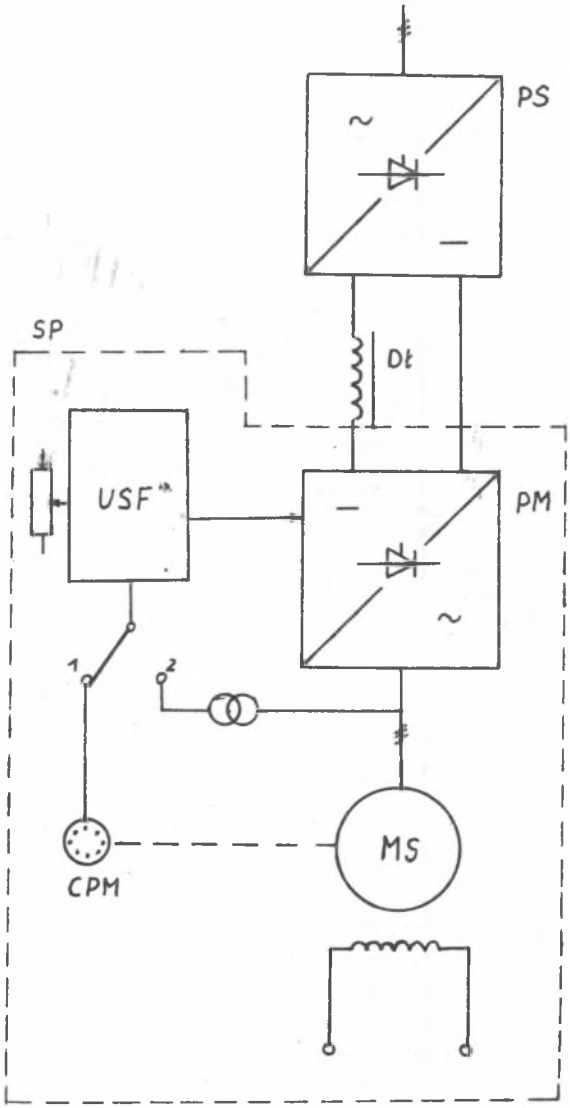
ROZRUCH ZE STEROWANIEM ZEWNĘTRZNYM SILNIKA PRZEKSZTAŁTNIKOWEGO NAPEDZAJĄCEGO GÓRNICZE MASZYNY PRZEPŁYWOWE

Streszczenie. W silnikach przekształtnikowych, w których układ sterowania wewnętrznego nie wymaga sygnałów z czujnika położenia magneśnicy kosztowne jest instalowanie tego czujnika tylko dla potrzeb rozruchu. Z drugiej strony brak sterowania wewnętrznego w czasie rozruchu powoduje silne kołysanie maszyny synchronicznej, a w warunkach szczególnego niedopasowania parametrów układu sterowania rozruchem do parametrów elektromechanicznych całego układu napędowego rozruch może okazać się niemożliwy. W referacie przedstawiono metodę rozruchu silnika przekształtnikowego przez impulsowanie prądu w obwodzie pośredniczącym prądu stałego, w którym powszechnie stosowane sterowanie wewnętrzne realizowane z wykorzystaniem czujnika położenia magneśnicy zastąpiono sterowaniem zewnętrznym. Wybrano istotne z punktu widzenia skuteczności rozruchu parametry układu rozruchowego. Przedstawiono rezultaty i wnioski ze wstępnych badań laboratoryjnych zaproponowanego układu.

1. WSTĘP

Większość spośród aktualnie pracujących w górnictwie wentylatorów i turbosprężarek jest napędzana silnikami synchronicznymi. Są to układy zasilane bezpośrednio z sieci, wskutek czego pracują ze stałą prędkością obrotową. Zmiana wydajności wentylatorów dokonywana jest poprzez zmianę kąta ustawienia łopatek wentylatora lub przydławienie klapami. Zmiana wydajności turbosprężarek dokonywana jest natomiast poprzez upuszczanie nadmiaru sprężonego powietrza do atmosfery. Biorąc pod uwagę ilość zainstalowanych i pracujących w kopalniach wentylatorów i turbosprężarek oraz ich moce jednostkowe (najczęściej powyżej 1 MW) można z całą odpowiedzialnością mówić o marnotrawstwie energii elektrycznej. Energooszczędna jest regulacja wydajności tych maszyn poprzez zmianę prędkości obrotowej. Wobec tego celowe jest przeprowadzenie modernizacji tych napędów w oparciu o tyrystorowe układy napędowe z maszyną synchroniczną.
Do napędzania maszyn o przepływowej charakterystyce obciążenia najlepsze spośród tych układów są silniki przekształtnikowe.

Silnikiem przekształtnikowym (rys. 1) nazwano zespół napędowy złożony z maszyny synchronicznej MS, przekształtnika tyrystorowego PM pracującego falowniczo przy wymuszeniu prądowym oraz z układu sterowania wewnętrznego USW. Moc bierną niezbędną do komutacji zaworów przekształtnika dostarcza



Rys. 1. Schemat blokowy silnika przekształtnikowego
Rys. 1. Block diagram of a self-controlled synchronous motor

przewzbudzona maszyna synchroniczna. Układ sterowania wewnętrznego utrzymuje stałą więź fazową pomiędzy kompleksorem prądu a kompleksorem jednego z napięć wewnętrznych maszyny synchronicznej i tym samym zapewnia dostateczne przewzbudzenie tejże maszyny. Położenie kompleksora jednego z napięć wewnętrznych maszyny określa się w dwojaki sposób. Pierwszy wykorzystuje czujnik położenia magneśnicy CPM do określenia położenia kompleksora $\underline{E}_q$. Natomiast drugi sposób określa położenie kompleksora $\underline{U}$, $\underline{U}_\delta$, E''_q na podstawie napięć twornika lub napięć twornika i prądów fazowych. W typowych rozwiązaniach silnik przekształtnikowy zasilany jest z prostownika sterowanego poprzez dławik. Taki układ napędowy ma (w zakresie od 0.1 do 1.2 prędkości znamionowej) własności obcowzbudnej maszyny prądu stałego zasilanej z przekształtnika tyrystorowego, tzn. prawie liniową zależność momentu elektromagnetycznego od prądu i możliwość regulacji prędkości obrotowej przez zmianę napięcia zasilającego. Silnik przekształtnikowy posiada natomiast wyższą sprawność, większą odporność na działanie środowiska i jest prostszy w eksploatacji. Dodatkowo charakteryzuje się brakiem ograniczeń wynikających z istnienia komutatora mechanicznego, a dotyczących maksymalnej prędkości obrotowej. Wadami silnika przekształtnikowego są pulsacje momentu elektromagnetycznego i brak możliwości rozruchu w swej postaci podstawowej. Przy małych prędkościach obrotowych, z przedziału od 0 do 7% prędkości znamionowej, napięcia indukowane w uzwojeniach twornika są zbyt małe, aby mogły spowodować komutację zaworów falownika. Dlatego konieczne jest stosowanie specjalnych układów rozruchowych. Układy te możemy podzielić na dwie grupy. Do pierwszej grupy zaliczymy takie rozwiązania, w których doprowadza się maszynę synchroniczną do prędkości komutacyjnej przy zablokowanych impulsach wyzwalających tyrystory przekształtnika lub całkowicie odłączonej części energoelektronicznej. W tej grupie wyróżnia się rozruch maszyną obcą i rozruch asynchroniczny. Do drugiej grupy układów rozruchowych zalicza się te, w których wymusza się komutację zaworów poprzez ingerencję od strony twornika lub od strony wzbudzenia. Wyróżnić tu można układy, w których napięcia komutacyjne uzyskuje się poprzez:

- transformację składowej zmiennej jednopołówkowo wyprostowanego prądu wzbudzenia,
- transformację okresowych zmian napięcia w obwodzie wzbudzenia,
- wprowadzanie w obwód komutacji dodatkowych napięć zmiennych indukowanych w uzwojeniach wtórnych specjalnego transformatora rozruchowego,
- zastosowanie kondensatorów komutacyjnych,
- rewersję napięcia zasilającego silnik przekształtnikowy (rozruch przez impulsowanie prądu w obwodzie pośredniczącym).

2. KRYTERIA DOBORU UKŁADU ROZRUCHOWEGO

Niniejsza praca dotyczy wąskiej podgrupy silników przekształtnikowych z układem sterowania wewnętrznego bez czujnika położenia magneśnicy CPM. W układach tych podczas rozruchu synchronizacja wyzwalania zaworów falownika nie powinna być oparta na sygnałach z czujnika CPM, gdyż nie przewiduje się jego stosowania podczas normalnej pracy. Czujnik położenia magneśnicy jest to element kosztowny, delikatny, wymagający stałej konserwacji, kalibracji, jest czuły na wstrząsy i uderzenia. Mając perspektywę uniknięcia stosowania czujnika położenia magneśnicy CPM zdecydowano się na analizę możliwości rozruchu przez impulsowanie prądu w obwodzie pośredniczącym bez czujnika CPM, tzn. na zastąpienie sterowania wewnętrznego zaworów przekształtnika PM sterowaniem zewnętrznym. Decyzję o wyborze układu rozruchowego silników przekształtnikowych napędzających wentylatory, pompy i turbosprężarki podjęto mając na uwadze następujące kryteria:

- minimalna rozbudowa części energetycznej i części sterowniczo-regulacyjnej,
- płynne doprowadzenie do prędkości komutacyjnej,
- po zakończeniu rozruchu osiągnięcie przez układ dowolnej zadanej prędkości.

Wykorzystując strukturę zaproponowanego układu można przeprowadzić rozruch na dwa sposoby:

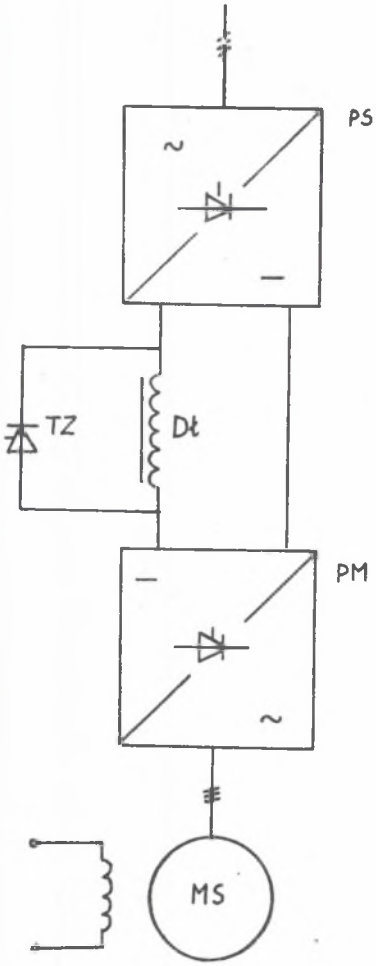
1) rozruch częstotliwościowy, przy zadanej szybkości narastania pulsacji prądów fazowych,

2) rozruch asynchroniczny przy obniżonej częstotliwości prądów fazowych.

Na zbudowanym w Instytucie Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa modelu silnika przekształtnikowego bez czujnika położenia magneśnicy przeprowadzono pierwsze badania rozruchu częstotliwościowego przez impulsowanie prądu w obwodzie pośredniczącym.

3. ROZRUCH PRZEZ IMPULSOWANIE PRĄDU W OBWODZIE POŚREDNICZĄCYM Z CZUJNIKIEM POŁOŻENIA MAGNEŚNICY CPM

W części energetycznej (rys. 2) zastosowano zawór zwrotny TZ, dołączony równolegle do dławika Dł. Podczas rozruchu, przy małych prędkościach, blokowanie zaworów przekształtnika strony maszyny PM odbywa się przez blokowanie przekształtnika strony sieci PS. Po odzyskaniu przez blokowane tyrystory własności zaworowych następuje ponowne wysterowanie prostownika PS oraz kolejnej pary zaworów przekształtnika PF. Jednocześnie z blokowaniem prostownika PS zostaje wyzwolony tyrystor TZ, który bocznikując



Rys. 2. Schemat części energetycznej układu rozruchowego przez impulsowanie prądu w obwodzie pośredniczącym prądu stałego

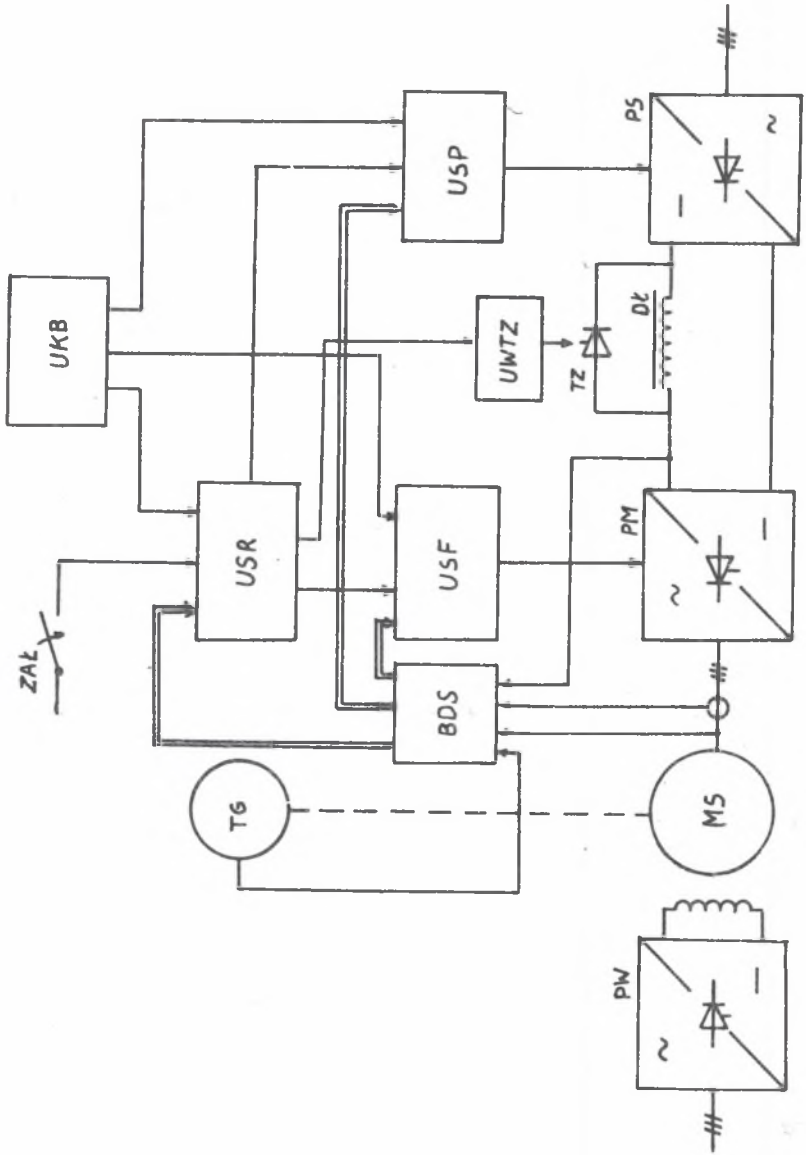
Fig. 2. Power aparatus scheme of a starting device by chopping a current in the intermediate DC circuit

dławik przyspiesza zanikanie prądu pośredniczącego. Ponowne wysterowanie prostownika PS z jednoczesnym wyzwoleniem dwóch kolejnych zaworów falownika PM powoduje blokowanie zaworu TZ i skierowanie prądu dławika do uzwojeń maszyny synchronicznej. Dzięki czujnikowi CPM każdorazowe odblokowanie prostownika następuje przy kącie wysterowania wirnikowego $\vartheta = \vartheta_{opt}$. Uzyskuje się dzięki temu maksymalny moment rozruchowy. Moment ten maleje wraz ze wzrostem prędkości. Sterowanie wewnętrzne eliminuje możliwość nieskuteczności rozruchu z powodu nadmiernych kołysań maszyny synchronicznej.

4. ROZRUCH SILNIKA PRZEKSZTAŁTNIKOWEGO PRZEZ IMPULSOWANIE PRĄDU W OBWODZIE POŚREDNICZĄCYM BEZ CZUJNIKA POŁOŻENIA MAGNEŚNICY

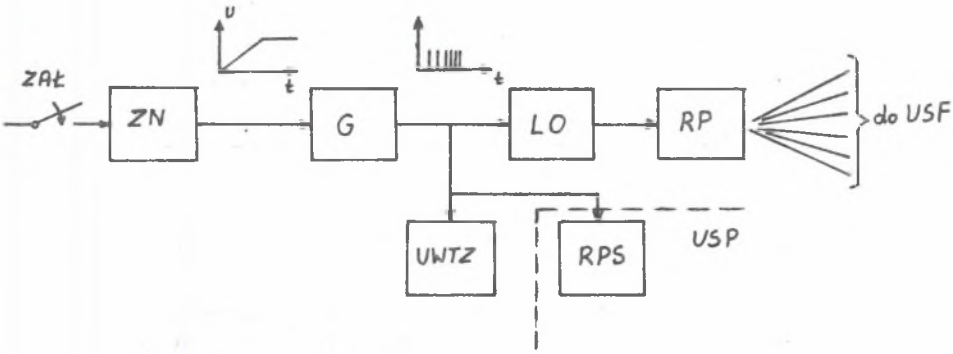
Zasada działania tego układu jest podobna do zasady działania układu rozruchowego z czujnikiem CPM. Jedynie sterowanie wewnętrzne, jakie zapewniał ten czujnik, zastąpiono sterowaniem zewnętrznym.

Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy układu z silnikiem przekształtnikowym z rozruchem realizowanym przez omawiany układ. Działanie układu rozruchowego rozpoczyna się z chwilą naciśnięcia przycisku ZAŁ. Wówczas to zaczyna działać zadajnik napięcia ZN sterujący pracą generatora impulsów prostokątnych G. Napięcie na wyjściu ZN narasta liniowo do pewnej wartości ustalonej. Wartość tego napięcia decyduje o częstotliwości sygnału z generatora, a jego szybkość narastania o czasie trwania rozruchu. Szybkość tę można regulować, uzyskując w ten sposób różne czasy rozruchu. Z generatora G impulsy prostokątne przesyłane są do: Układu wyzwalającego tyrystor zwrotny dławika UWTZ.



Rys. 3. Ogólna struktura obwodu głównego i układu sterowania rozruchem przez impulsowanie prądu

Fig. 3. General structure of both the driving system and the starting controller



Rys. 4. Schemat blokowy układu sterowania rozruchem
Fig. 4. Block diagram of a starting controller

Po doprowadzeniu układu napędowego do prędkości komutacyjnej układ przechodzi na sterowanie wewnętrzne. Jednocześnie blokowane są impulsy sterujące zaworem zwrotnym i blokujące przekształtnik PS.

5. WYNIKI WSTĘPNYCH PRÓB

Opisany w poprzednim rozdziale układ rozruchowy został wykonany i wykorzystany do rozruchu silnika przekształtnikowego z maszyną synchroniczną o danych znamionowych:

typ: GAa 18a, moc 15 kW
n_N 1000 obr./min,
stojan 380 V/26,5 A,
wirnik 20 V/21 A.

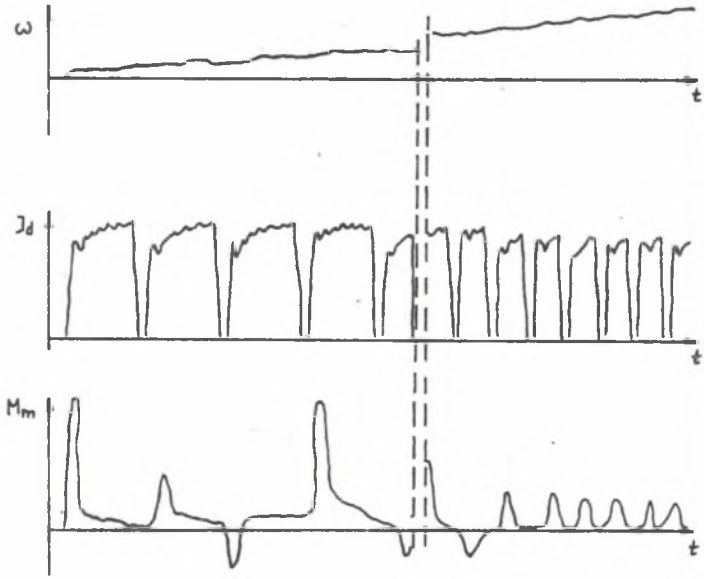
Obciążenie silnika stanowi prądnica synchroniczna obciążona symetrycznie stałą rezystancją i wzbudzana w taki sposób, że moment obciążenia jest proporcjonalny do kwadratu prędkości obrotowej. Symulowano w ten sposób obciążanie maszyną roboczą o charakterystyce wentylatorowej. Konkretny układ pozwala na uzyskanie trzech programowanych statycznych charakterystyk obciążenia:

(1) $Mo = M_N$ dla $\omega = \omega_N$,
(2) $Mo = 0{,}75\ M_N$ dla $\omega = \omega_N$,
(3) $Mo = 0{,}5\ M_N$ dla $\omega = \omega_N$.

Zadawanymi parametrami układu sterującego rozruchem są:

- położenie początkowe magneśnicy ϑ_0,
- stromość narastania częstotliwości prądów fazowych (od 0 do 9 Hz),

- częstotliwość początkowa prądów fazowych,
- czas blokowania przekształtnika PS,
- wartość ograniczenia prądowego w obwodzie pośredniczącym.



Rys. 5. Rejestrogram przebiegu prędkości obrotowej, prądu w obwodzie pośredniczącym i momentu na wale w czasie rozruchu

Fig. 5. Record of rotation, torque and current in DC intermediate circuit taken at the test stand

Sygnałami wyjściowymi są przebiegi momentu mechanicznego na wale maszyny synchronicznej oraz prędkości obrotowej. Rejestrowano przebiegi prądu i napięcia w obwodzie pośredniczącym prądu fazowego, napięcia fazowego, prędkości obrotowej, momentu na wale, a także obserwowano hodografy prądu twornika $\underline{I}$, napięcia twornika $\underline{U}$, strumienia skojarzonego $\underline{\Psi}$. Układ rozruchowy z impulsowaniem prądu w obwodzie pośredniczącym prądu stałego bez czujnika położenia magneśnicy realizował pewnie rozruch dla każdej z zaprogramowanych charakterystyk obciążenia. Rozruch trwał od 5 do 10 s w zależności od nastawionej prędkości przełączania z fazy rozruchu do fazy normalnej pracy (150, 200, 250 obr./min). Podczas rozruchu wystąpiły niekorzystne dla układu udary momentu oraz kołysania. W przypadku impulsowania prądu w obwodzie pośredniczącym przy zasilonym uzwojeniu wzbudzenia moment elektromagnetyczny ma charakter impulsowy. Jest on superpozycją momentu synchronizującego i asynchronicznego. Dla małych prędkości obrotowych silnik pracuje w sposób krokowy. W układzie tym, pracującym z dużymi przyspieszeniami i zrywami, zachodzi konieczność uwzględnienia sprę-

żystości elementów łączących silnik z maszyną roboczą oraz zdolność magazynowania energii ruchu obrotowego mas zamachowych wirnika i maszyny roboczej. W przypadku impulsowania prądu w obwodzie pośredniczącym przy niezasilonym uzwojeniu wzbudzenia moment elektromagnetyczny jest momentem asynchronicznym i ma również charakter impulsowy. Moment średni jest mniejszy niż w poprzednim przypadku i czas rozruchu jest dłuższy. Nie występuje jednak możliwość zerwania synchronizacji pomiędzy kompleksorem prądu a kompleksorem strumienia skojarzonego i tym samym uniemożliwienie skutecznego rozruchu. Zdecydowanie mniejsze są oscylacje prędkości obrotowej. Na podstawie badań skuteczności rozruchu ustalono, że parametrami krytycznymi decydującymi o skuteczności rozruchu są:

- zadana wartość prądu w obwodzie pośredniczącym,
- zadana stromość narastania częstotliwości generatora zewnętrznego,
- częstotliwość początkowa generatora zewnętrznego,
- czas blokowania przekształtnika PS.

6. WNIOSKI

Wyniki badań rozruchu częstotliwościowego opartego na układzie rozruchowym z impulsowaniem prądu w obwodzie pośredniczącym bez czujnika położenia magneśnicy potwierdziły jego skuteczność do rozruchu niskonapięciowych silników przekształtnikowych. Konieczne staje się jednak poszukanie rozwiązań mających na celu zmniejszenie występujących podczas rozruchu silnych kołysań. Dla maszyn o dużych elektromechanicznych stałych czasowych takim rozwiązaniem może być dwuetapowy rozruch częstotliwościowy. Pierwszy etap (do $f = 3$ Hz) realizowany byłby zgodnie z opisanym układem. W drugim etapie rozruchu synchronizację zewnętrzną przekształtnika strony maszyny zastąpiłaby synchronizacja napięciami twornika maszyny synchronicznej. Dla uzyskania ilościowych zależności niezbędnych do ustalenia optymalnych wartości parametrów układu rozruchowego konieczna jest analiza modelu matematycznego maszyny synchronicznej zasilanej z sześciopulsowego przekształtnika tyrystorowego zasilanego z rzeczywistego źródła prądowego. Należy uwzględnić sprężystość elementów łączących silnik z maszyną roboczą oraz zdolność magazynowania energii ruchu obrotowego mas zamachowych wirnika oraz maszyny robocze.

LITERATURA

[1] Opracowanie układów napędowych z silnikami synchronicznymi o sterowanej prędkości obrotowej dla maszyn górniczych o mocy 160-3150 kW (pomp, wentylatorów i turbosprężarek). Praca naukowo-badawcza, symb. NB-10/RG 1/86 wykonana w IEiAG Politechniki Śl. (niepublikowana).

[2] Mazurek J., Przywara G.: Tyrystorowe układy napędowe z maszyną synchroniczną. WNT, Warszawa 1980.

ПУСК С ВНЕШНИМ УПРАВЛЕНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРИВОДНОЙ СИСТЕМЫ С СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ДЛЯ ВЕНТИЛЯТОРОВ И ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

Р е з ю м е

В вентильных двигателях, в которых система внутренного управления не потребляет сигналов с датчика положения вала стоит дорого оборудование двигателя этом датчиком для самого пуска. Но отсутствие внутренного управления во время пуска дает большое колебание синхронного двигателя, а в условиях особенного несогласования параметров системы управления пуском до параметров електромеханических приводной системы пуок может оказатьсия невозможным. В докладе показано метод пуска вентильного двигателя через подачу импульсов тока в посреднической цели постаянного тока, в котором обычно использованые управление выполнего на основе датчика положения вала заменено внешним управлением. Выбрано существительные с точки зрения успешности пуска параметры приводной системы. Представлено результаты вступителных лабораторных исследований предложеной системы.

THE STARTING OF A CONVERTER DRIVING SYSTEM WITH A SYNCHRONOUS MOTOR AND AN EXTERNAL CONTROL FOR FANS AND TURBO-COMPRESSORS

S u m m a r y

When signals from a rotor's position sensor are not needed during the work of a self-controlled synchronous machine, it is ecpensive and troublesome to apply this sensor while starting. On the other hand, lack of a self-control device while starting couses big rockings of the synchronous machine. When the particular parameters of the starting controller do not correspond with mechanical and electrical parameters of the drive, the starting may appear to be utterly impossible. In this paper the method of starting the self-controlled synchronous machine in a way of chopping a current in the intermediate DC circuit has been presented. The commonly used self-control system based on signals from the rotor's position sensor has been replaced by an external control system. The meaningful parameters of the starting control device have been chosen from the point of view of starting effectiveness. Results of the introductory lab research of the suggested method have been described.

Recenzent: Doc. dr inż. Franciszek Szczucki