

WOJCIECH BŁASIŃSKI, ZBIGNIEW NOWACKI

**Politechnika Łódzka
Instytut Automatyki**

UKŁAD HAMOWANIA ELEKTRYCZNEGO DO BADANIA NAPĘDÓW

Recenzent: **dr hab. inż. Andrzej Dębowski, prof. PŁ**

Maszynopis dostarczono: 15.12.2011

Do obciążania badanych napędów zwykle stosuje się generatory prądu stałego. Energia pobierana z badanego napędu jest tracona w dołączonych do generatora rezystorach. Oprócz strat energii wadą takiego układu jest trudność z uzyskaniem odpowiednich momentów obciążenia przy małych prędkościach obrotowych. W pracy przedstawiono zastosowanie zautomatyzowanego układu Leonarda do obciążania badanego napędu. Układ Leonarda pozwala na zwrot pobieranej energii do sieci zasilającej oraz umożliwia dowolne kształtowanie momentu obciążenia, także dla małych prędkości obrotowych. Odpowiednie właściwości układu uzyskuje się przez sterowanie wzbudzenia maszyn prądu stałego.

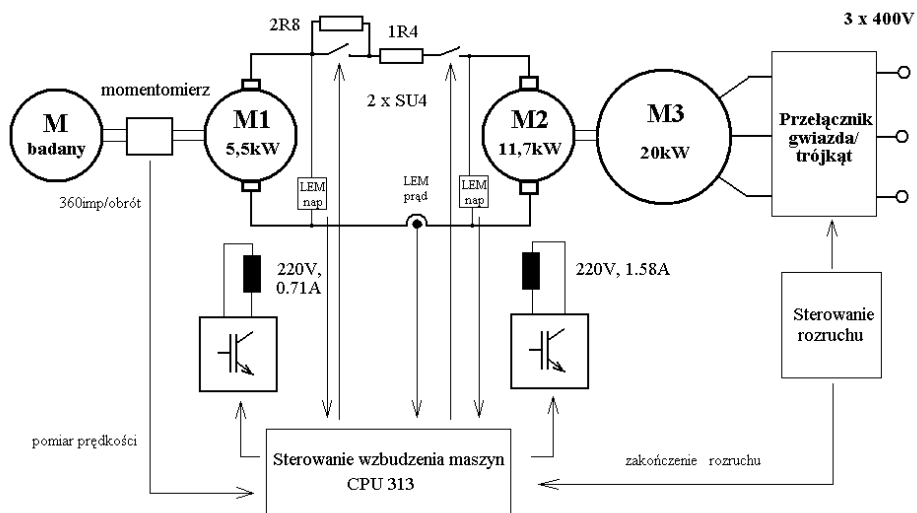
1. WSTĘP

Nowe koncepcje związane ze sterowaniem układów napędowych z silnikami elektrycznymi oprócz badań symulacyjnych, które potwierdzają zasadność ich stosowania wymagają także weryfikacji w układach rzeczywistych. Ważną próbą każdego napędu są próby obciążeniowe, których wyniki ostatecznie potwierdzają właściwości układu napędowego.

W pracy przedstawiono opis maszynowego układu do realizacji prób obciążeniowych badanych napędów. Dzięki odpowiedniemu sterowaniu możliwe jest wykonywanie prób obciążenia w szerokim zakresie stanów pracy badanego napędu z możliwością zwrotu pobieranej energii do sieci zasilającej.

Układ umożliwia na kształtowanie charakterystyk obciążenia w funkcji czasu oraz w funkcji prędkości. Możliwa jest realizacja reakcyjnego lub potencjalnego momentu obciążenia.

2. OPIS UKŁADU OBCIĄŻANIA



Rys. 1. Ogólny schemat blokowy układu obciążania silnika

Ogólny schemat blokowy układu obciążania silnika przedstawiono na rys. 1. Układ składa się z dwóch zestawów maszyn: silnika badanego M i maszyny prądu stałego M1 oraz maszyny prądu stałego M2 i silnika indukcyjnego M3. Zasadniczym celem układu jest możliwość obciążania badanego silnika i odpowiedniego kształtowania charakterystyk obciążenia. W tym stanie pracy maszyna M1 jest prądnicą, maszyna M2 pracuje jako silnik, maszyna M3 pracuje jako generator nadsynchroniczny i przesyła energię do sieci zasilającej. Mostkowe układy sterowania wzbudzenia maszyn prądu stałego umożliwiają pracę czterokwadrantową, co sprawia, że kierunek przesyłania energii może być zmieniany w zależności od potrzeb. Zatem maszyna M1 może pracować jako silnik, maszyna M2 jako prądnica, a maszyna M3 jako silnik np. przy realizacji potencjalnego momentu obciążenia. Różne stany pracy układu są możliwe dzięki czterokwadrantowemu sterowaniu wzbudzenia maszyn prądu stałego. Mostkowe układy zasilania obwodów wzbudzenia maszyn (4 tranzystory IGBT) pracują z modulacją MSI i są sterowane sygnałami napięciowymi z układu sterowania.

Sterowanie wzbudzenia maszyny M1 jest realizowane w układzie otwartym i w trakcie próby zwykle nie jest zmieniane. Wartość prądu wzbudzenia tej maszyny stanowi współczynnik proporcjonalności w zależności przeliczającej prąd tworników maszyn prądu stałego na moment obciążenia.

Sterowanie wzbudzenia maszyny M2 jest zależne od wyboru trybu pracy układu i od stanu łączników w obwodzie tworników maszyny M1 i M2.

Zasadniczą częścią układu sterowania jest sterownik PLC, CPU313. Generuje sygnały do mostkowych układów zasilania obwodów wzbudzenia maszyn oraz umożliwia zamykanie i otwieranie obwodu DC maszyn M1 i M2. Do zamykania i otwierania obwodu tworników maszyn prądu stałego wykorzystano łączniki prądu stałego SU4.

Przełącznik gwiazda/trójkąt wraz z układem sterowania jest w zasadzie niezależną częścią układu. Realizuje sterowaną czasowo procedurę rozruchu maszyny M3 wraz ze wszystkimi funkcjami kontrolnymi. Sygnał zakończenia rozruchu jest przesyłany do układu sterowania wzbudzenia i stanowi warunek konieczny umożliwiający realizację procedury obciążania.

Obwód mocy wyposażony jest w czujniki pomiarowe: napięcie (SEM) tworników maszyn prądu stałego, prądu tworników, prędkości obrotowej badanego napędu i momentu na wale badanego silnika. Sygnał prędkości obrotowej może być wykorzystany do kształtowania charakterystyki obciążenia, sygnał momentu stanowi informację o stanie pracy badanego silnika i nie jest wykorzystywany w układzie sterowania.

3. OPIS UKŁADU STEROWANIA

Sterowanie wzbudzenia maszyny M2 jest zależne od stanu łączników w obwodzie DC. Jeżeli obwód DC jest otwarty, to wzbudzenie maszyny M2 jest ustawiane tak, aby napięcia tworników maszyny M1 i M2 były równe. Sterowanie to jest realizowane w układzie zamkniętym, z regulatorem napięcia. Wartością zadaną jest napięcie twornika maszyny M1, a sygnałem sprzężenia zwrotnego napięcie twornika maszyny M2. Regulator jest proporcjonalny i zapewnia dobre właściwości dynamiczne i niewielki uchyb ustalony. Wybrano regulator proporcjonalny ze względu na to, że nadrzędnym wymaganie jest stabilność układu zamkniętego w szerokim zakresie zmian punktu pracy układu oraz zapewnienie możliwie krótkich czasów trwania stanów dynamicznych. Zastosowanie regulatora PI powodowałoby dodatkowe opóźnienia w torze przetwarzania uchybu regulacji. Dobór nastaw regulatora PI utrudnia także histereza w obwodzie wzbudzenia maszyn prądu stałego, dlatego wobec braku wymagań dokładności statycznej zdecydowano się na regulator proporcjonalny.

Po zamknięciu obwodu DC oraz zwarcie jednego z rezystorów w obwodzie, sterowanie wzbudzenia maszyny M2 zostaje przełączone na sterowanie wartości prądu w obwodzie. Regulacja napięcia zostaje zastąpiona regulacją prądu w obwodzie tworników maszyn DC. Wartość zadana prądu wynika z realizacji określonej wartości momentu oporowego dla badanego silnika. Algorytm sterowania zależy od wybranego trybu pracy układu. Poniżej przedstawiono możliwe tryby pracy:

- tryb ręczny – ustawianie wzbudzenia maszyny M2 jest realizowane ręcznie, w układzie zamkniętym z regulatorem proporcjonalnym, z zachowaniem kontroli wartości maksymalnej prądu;
- tryb automatyczny ze skokowym momentem obciążenia – moment reakcyjny obciążenia. W tym trybie prąd w obwodzie DC jest utrzymywany na stałej, nastawionej uprzednio wartości, niezależnie od prędkości maszyny M1. Jedynie dla prędkości w zakresie 0-100 obr/min prąd jest liniowo zależny od prędkości, co zapewnia przybliżoną charakterystykę reakcyjną momentu obciążenia. Ten tryb pracy umożliwia badanie rozruchu oraz stanów statycznych ze stałym momentem;
- tryb automatyczny ze skokowym momentem obciążenia – moment potencjalny obciążenia. Ten tryb pracy pozwala na sprawdzanie właściwości badanego napędu, w sytuacji gdy energia jest przekazywana od obciążenia do badanego silnika;
- tryb automatyczny z momentem liniowo zależnym od prędkości. Prąd w obwodzie DC jest proporcjonalny do prędkości obrotowej maszyny M1, z ograniczeniem do wartości maksymalnej prądu. Ten tryb pracy umożliwia badanie napędów z momentem obciążenia liniowo zależnym od prędkości obrotowej;
- tryb automatyczny z momentem liniowo zależnym od czasu.

Modyfikacja programu sterownika pozwala na realizację także innych zależności funkcyjnych momentu obciążenia maszyny badanej.

Sterowanie łącznikami prądu stałego w obwodzie DC jest realizowane ręcznie, przy czym sprawdzane są warunki dla zamknięcia obwodu i dla otwarcia obwodu. Warunkiem zamknięcia obwodu DC jest zmniejszenie różnicy napięć tworników maszyn M1 i M2 poniżej wartości przyjętej za dopuszczalną (przyjęto wartość 15 V), warunkiem otwarcia obwodu jest zmniejszenie prądu DC poniżej wartości dopuszczalnej (przyjęto 10 A). Kontrolą podlega wartość maksymalna prądu DC, po przekroczeniu wartości maksymalnej (przyjęto 80 A) następuje awaryjne otwarcie łączników w obwodzie DC. Wyłączenie awaryjne jest także możliwe ręcznie, wyłącznikiem awaryjnym.

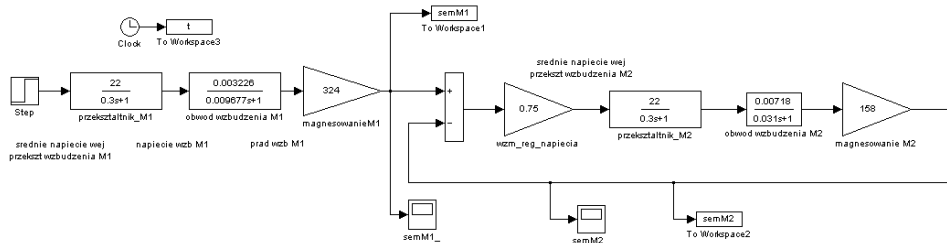
Zastosowanie dwóch łączników w obwodzie tworników ze stopniowym załączaniem i wyłączaniem wraz z odpowiednio połączonymi rezystorami umożliwia ograniczenie skutków przerwania prądu stałego w obwodach o indukcyjnym charakterze. Przez odpowiedni dobór wartości rezystorów zmniejsza się wrażliwość prądu twornika na zmiany warunków wzbudzenia maszyn (zmniejszenie wzmocnienia obiektu dla pętli prądowej).

Ze względu na możliwość pracy z prędkością obrotową przekraczającą wartość znamionową dodatkowo zrealizowane jest interwencyjne ograniczenie wzrostu napięcia twornika maszyny powyżej wartości dopuszczalnej. Regulator interwencyjny jest regulatorem proporcjonalnym, powoduje odwzbudzenie maszyny M1 i działa zawsze, niezależnie od stanu łączników w obwodzie DC maszyn M1 i M2.

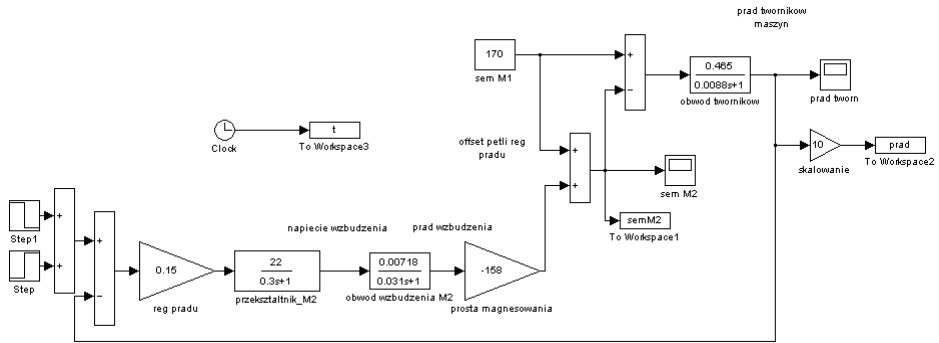
4. BADANIA SYMULACYJNE UKŁADU

Zastosowanie zamkniętych pętli regulacji napięcia i prądu oraz przyjęcie regulacji proporcjonalnej powoduje konieczność ustalenia wzmocnienia regulatorów. Do tego celu zostały zrealizowane modele układu regulacji napięcia i regulacji prądu. Istotne jest przyjęcie uproszczenia nieliniowych układów przekształtników zasilających obwody wzbudzenia. Układy wzbudzenia są sterowane sygnałami wyjściowymi sterownika (a więc sygnałami cyfrowymi) i w układzie modulatora, zewnętrznym w stosunku do sterownika są przekształcone na współczynnik wypełnienia sterujący pracą tranzystorów przekształtników mostkowych. Uwzględniając krótkie czasy przetwarzania sygnałów w sterowniku oraz odpowiednio wysokie częstotliwości pracy przekształtników założono, że mogą one być zastąpione odpowiednimi układami ciągłymi. Zatem na schematach modelu cyfrowy regulator proporcjonalny zastąpiono regulatorem ciągłym, zaś modulator z przekształtnikiem zastąpiono członem inercyjnym I rzędu. Stała czasowa w inercyjnym modelu przekształtnika wynika głównie z funkcji ograniczenia szybkości zmian sygnału wyjściowego modulatora. Taką funkcję realizują scalone modulatory zastosowane w układzie. Powyższe uproszczenia pozwoliły na uzyskanie liniowych modeli układów regulacji napięcia i prądu. Do obliczenia wzmocnienia regulatorów zastosowano kryterium modułowe Kesslera, a następnie sprawdzono wyniki w modelach symulacyjnych. Ostateczną weryfikację przyjętych założeń upraszczających i wyznaczonych nastaw przeprowadzono w układzie rzeczywistym.

Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy układu regulacji napięcia, regulacja napięcia jest włączona, gdy obwody tworników maszyn DC są rozłączone. Na rys. 3 pokazano schemat blokowy układu regulacji prądu, regulacja prądu jest włączana po zamknięciu obwodu tworników maszyn DC.

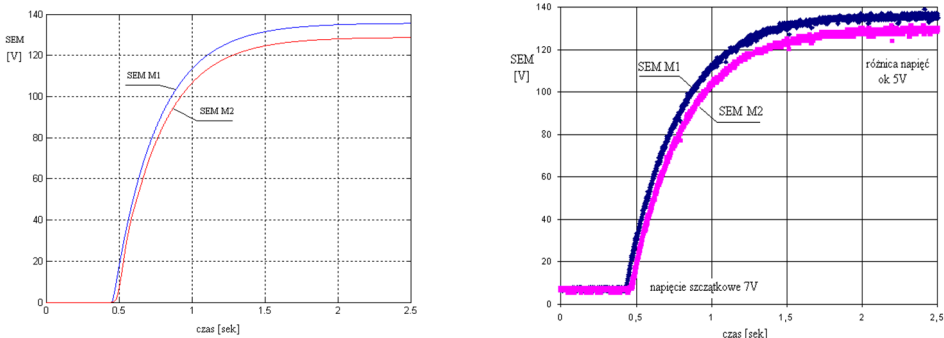


Rys. 2. Schemat modelu symulacyjnego układu regulacji napięcia maszyny M2, wartością zadaną jest napięcie maszyny M1

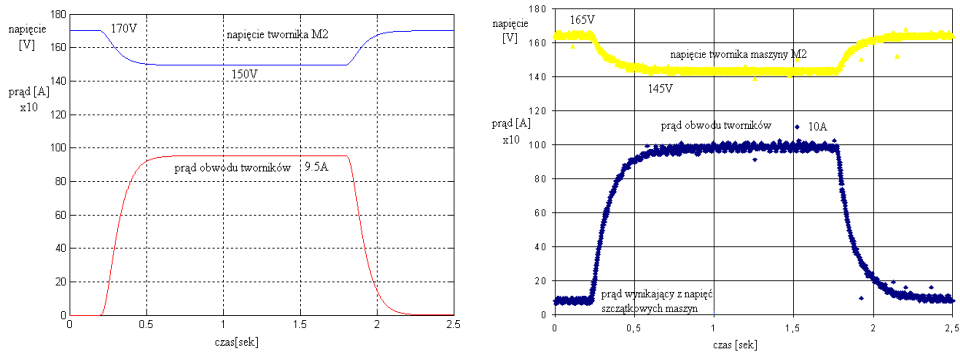


Rys.3. Schemat modelu symulacyjnego układu regulacji prądu w obwodzie tworników maszyn M1 i M2

Na rys. 4 przedstawiono porównanie przebiegów czasowych w modelu symulacyjnym układu regulacji napięcia i w układzie rzeczywistym. Przebiegi zarejestrowano po skokowym załączeniu napięcia wzbudzenia maszyny M1. Regulator napięcia ustawia wzbudzenie maszyny M2, tak aby różnica SEM obu maszyn nie przekraczała wartości przyjętej za dopuszczalną.



Rys. 4. Przebiegi czasowe sił elektromotorycznych maszyn M1 i M2 w modelu symulacyjnym i układzie rzeczywistym dla skokowego załączenia wzbudzenia maszyny M1



Rys. 5. Przebiegi czasowe napięcia twornika maszyny M2 i prądu tworników maszyn w modelu symulacyjnym i układzie rzeczywistym po skokowym włączeniu i wyłączeniu prądu zadanego

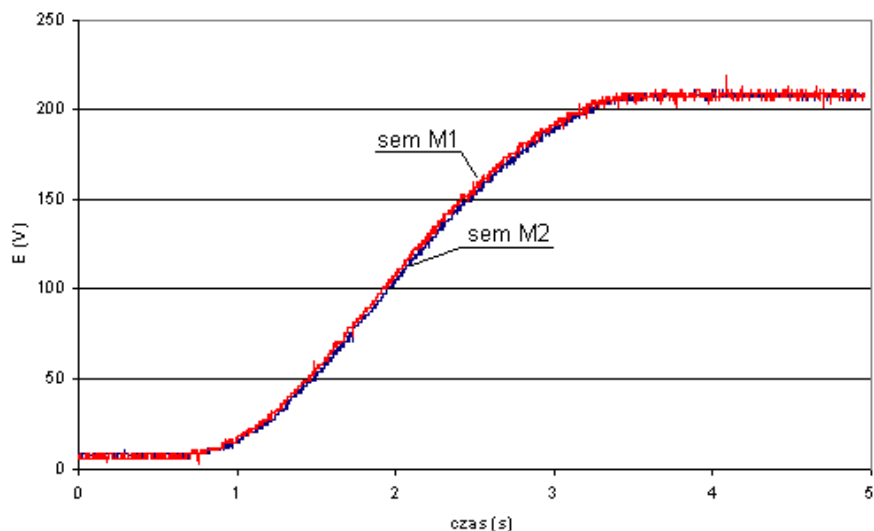
Z kolei na rys. 5 przedstawiono porównanie przebiegów czasowych w modelu symulacyjnym układu regulacji prądu i w układzie rzeczywistym. Przebiegi zarejestrowano po skokowym włączeniu i wyłączeniu zadanego prądu w obwodzie tworników. Wyniki przedstawione na rys. 4 i rys. 5 stanowią potwierdzenie uproszczeń przyjętych przy realizacji modelu układu. Dla nastaw regulatorów przyjętych na podstawie modelu uzyskano zbliżone rezultaty w symulacjach i układzie rzeczywistym.

Kolejne oscylogramy przedstawiają wybrane przebiegi czasowe ilustrujące właściwości układu hamowania dla różnych sytuacji dynamicznych.

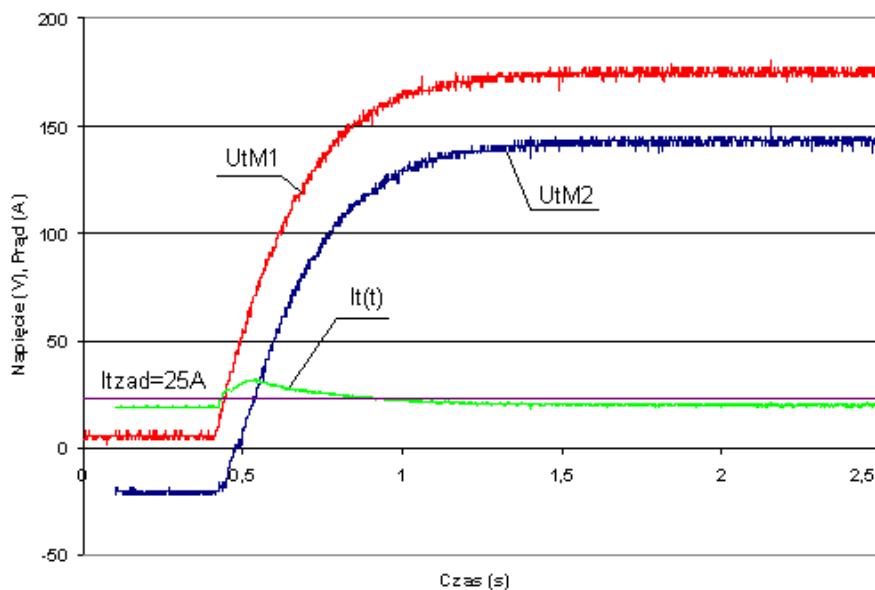
Na rys. 6 przedstawiono działanie układu regulacji napięcia maszyn dla przypadku liniowej zmiany wzbudzenia maszyny M1. SEM maszyny M1 jest wartością zadaną w układzie regulacji SEM maszyny M2 (przypadek skokowej zmiany wzbudzenia przedstawiono na rys. 4).

Na rys. 7 przedstawiono stabilizację prądu w obwodzie tworników maszyn DC. Początek przebiegu to stan, gdy maszyna M1 nie jest wzbudzona, wzbudzenie maszyny M2 zapewnia odpowiednią wartość prądu tworników. Skokowe załączenie wzbudzenia maszyny M1 powoduje pojawienie się stanu dynamicznego, a regulator prądu modyfikuje wzbudzenie maszyny M2, tak aby prąd tworników nie uległ zmianie.

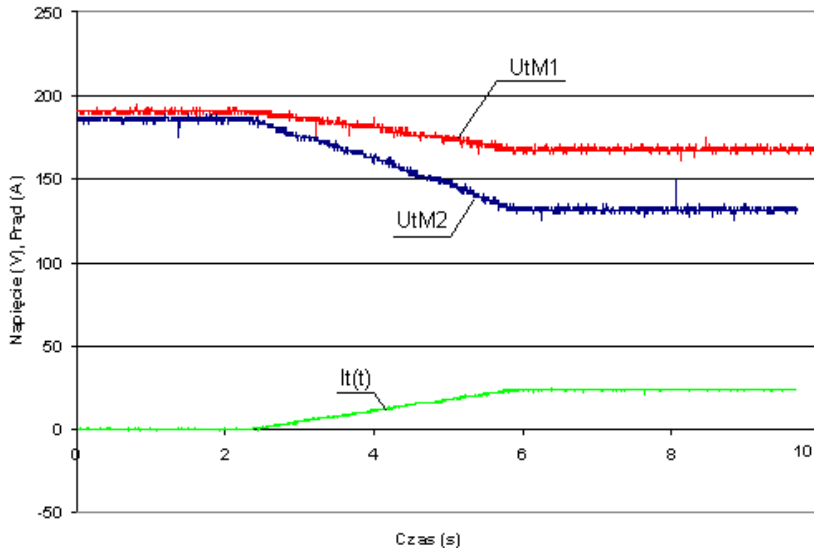
Na rys. 8 przedstawiono przebiegi czasowe dla przypadku liniowej w czasie zmiany prądu zadanego tworników maszyn DC.



Rys. 6. Przebiegi czasowe SEM maszyny M1 i M2 przy liniowej zmianie wzbudzenia maszyny M1



Rys. 7. Przebiegi czasowe napięć tworników maszyn i prądu tworników po skokowym załączeniu wzbudzenia maszyny M1



Rys. 8. Przebiegi czasowe napięć i prądu tworników maszyn DC po włączeniu liniowej w czasie zmiany prądu zadanego tworników

5. WNIOSKI

Przedstawiony układ został zastosowany w badaniach porównawczych napędów z silnikiem indukcyjnym i silnikiem z magnesami trwałymi. Wykorzystano zarówno możliwość stabilizacji momentu obciążenia, jak również możliwość dowolnego kształtowania momentu obciążenia w zależności od prędkości obrotowej wału badanego silnika.

Skuteczny w całym zakresie punktu pracy układ regulacji prądu stwarza możliwość eliminacji regulatora napięcia i pracy układu z połączonymi obwodami tworników maszyn wyłącznie z regulatorem prądu. Wniosek ten potwierdzają symulacje, ale zastosowanie takiego układu sterowania wymaga dodatkowych badań w układzie rzeczywistym. Jak wspomniano, duże znaczenie w regulacji prądu ma dobór wartości rezystora łączącego obwody tworników maszyn DC. Dodatkowa rezystancja w obwodzie tworników maszyn ułatwia uzyskanie stabilnej pracy układu regulacji prądu, ale zwiększa straty w układzie.

LITERATURA

- [1] **Blasiński W.:** Modelling and Simulation of the Electric Brake System Applied to the Test Drive. 8-th International Symposium on System – Modelling – Control, Zakopane, Maj 1995, ss. 114-118.

- [2] **Bąkowicz K.:** Zastosowanie przekształtnika mostkowego do sterowania wzbudzenia maszyn prądu stałego. Praca dyplomowa. Instytut Automatyki Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2011.

ELECTRIC BRAKE SYSTEM FOR DRIVE TESTING

Abstract

The paper presents the Ward – Leonard system used as the electric brake to test drives. The investigations concerning new electrical drives usually require the different experimental tests. The most important are the load tests. System consists of two sets of machines, tested motor coupled to DC generator and the DC machine coupled to induction machine connected to the line. Proposed system enables modelling the load torque as the function of time or the function of angular velocity of motor. The required value of the load torque is set by respective adjust the excitation current of DC machine. The dynamic properties of the system are investigated. The simulation model as well as the experimental system with voltage and current proportional controllers are presented.

Wojciech Błasiński, Zbigniew Nowacki
Technical University of Lodz, Institute of Automatic Control