

*napęd bezczujnikowy, DTC, MRAS,
napęd trakcyjny, sterowanie wektorowe,
napęd bezpieczny, silnik indukcyjny*

Mateusz DYBKOWSKI*, Grzegorz TARCHAŁA*

BEZCZUJNIKOWE UKŁADY NAPĘDOWE Z SILNIKAMI INDUKCYJNYMI W ZASTOSOWANIACH TRAKCJI MIEJSKIEJ

W artykule przedstawiono analizę bezczujnikowego układu wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym z wykorzystaniem metody DTC-SVM dla trakcji miejskiej. Do estymacji strumienia stojana, momentu elektromagnetycznego i prędkości kątowej wykorzystano estymator MRAS charakteryzujący się zwiększoną odpornością na zmiany parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego. Wykonano obszerne badania eksperymentalne na stanowisku laboratoryjnym z silnikiem indukcyjnym o mocy 50 kW w całym zakresie zmian prędkości i momentu obciążenia, typowe dla napędów trakcyjnych.

1. WPROWADZENIE

Maszyny indukcyjne odgrywają coraz większą rolę w przemysłowych układach napędowych. Są one silnikami o stosunkowo prostej konstrukcji, niezawodne i tanie w eksploatacji. W odróżnieniu do silników prądu stałego nie wymagają częstych przeglądów technicznych. Do ich prawidłowego działania niezbędne są specjalne techniki sterowania częstotliwościowego, które wymagają informacji o aktualnej wartości strumienia wirnika lub stojana oraz o prędkości kątowej [1], [2].

Napędy z silnikami indukcyjnymi są obecnie często wykorzystywane w trakcji miejskiej. Do sterowania tymi maszynami wykorzystuje się metody wektorowego sterowania DTC-SVM (*Direct Torque Control*) i DRFOC (*Direct Rotor Field Oriented Control*) [4], [5], [6]. Pozwalają one na pełną kontrolę momentu elektromagnetycznego maszyny oraz innych zmiennych stanu silnika. Układy sterowania wykorzystywane w systemach trakcyjnych mogą pracować ze sprzężeniem od prędkości kątowej lub bez wewnętrzne-

* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, mateusz.dybkowski@pwr.wroc.pl, grzegorz.tarchala@pwr.wroc.pl

go sprzężenia zwrotnego od tej zmiennej. Niezależnie od tego jaka struktura sterowania wykorzystana jest w układzie napędowym, ze sprzężeniem lub bez sprzężenia od prędkości, do prawidłowego jej działania, w systemach bezpieczeństwa i algorytmie osłabiania pola, niezbędna jest informacja o jej aktualnej wartości [5].

Wielkość ta może być mierzona przez czujniki lub też estymowana przez estymatory zmiennych stanu [2]. W związku z tym, że napędy trakcyjne są podatne na uszkodzenia wywołane drganiami, zmianami cieplnymi oraz innymi czynnikami, zaleca się aby w sposób redundantny wykorzystywać dwa niezależne sposoby pozyskiwania informacji o aktualnym położeniu wirnika.

Podczas normalnej pracy informacja o prędkości kątowej powinna pochodzić z czujnika prędkości, w stanach awaryjnych wykorzystany powinien być estymator prędkości.

Napędy, w których pomiar wielkości mechanicznych został zastąpiony poprzez estymator zmiennych stanu są nazywane napędami bezczujnikowymi [2]. Układy te wykorzystują prędkość, która wyliczana jest na podstawie łatwo mierzalnych zmiennych stanu maszyny takich jak prąd i napięcie stojana. W związku z tym, że układy odtwarzające zmienne stanu, a w szczególności prędkość kątową, nie są rozwiązaniami dającymi pewność stabilnej pracy we wszystkich możliwych warunkach, zaleca się aby w przypadku gdy napęd trakcyjny pracuje w trybie bezczujnikowym umożliwiał on jazdę tylko w trybie awaryjnym (bezpieczny dojazd do bazy).

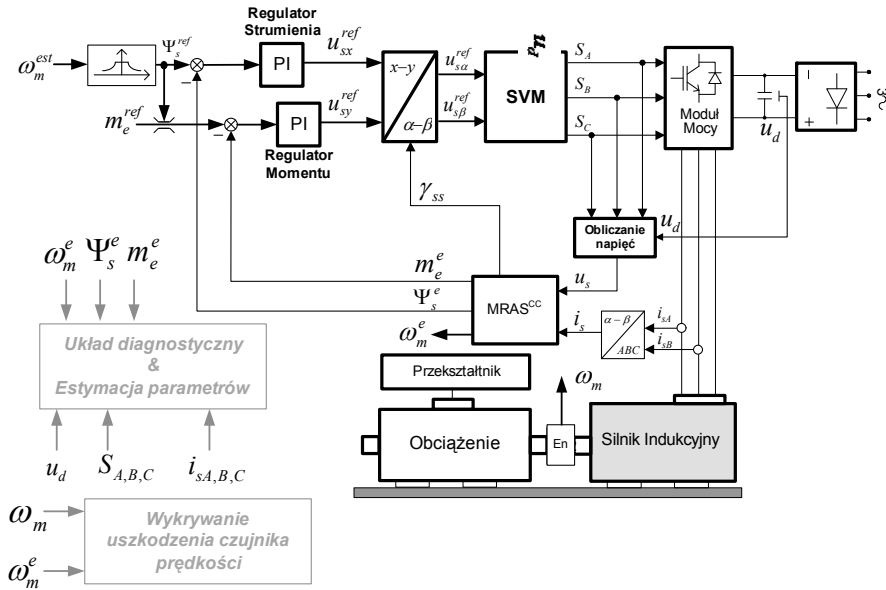
W niniejszym artykule przedstawiono układ bezpośredniego sterowania momentem silnika indukcyjnego DTC-SVM z estymatorem MRAS^{CC} [3] do pracy w bezczujnikowym napędzie trakcyjnym. Wykonano badania eksperymentalne napędu z silnikiem indukcyjnym o mocy 50 kW w różnych warunkach pracy.

2. UKŁAD NAPĘDOWY

Jedną z najczęściej wykorzystywanych struktur regulacji momentu w napędach trakcyjnych jest metoda DTC-SVM. Jej schemat przedstawiony został na rys. 1.

Nadrzędną wielkością zadaną jest moment elektromagnetyczny, który zmieniany jest zgodnie z aktualnym stanem napędu. Estymowana wartość prędkości kątowej wykorzystywana jest w układzie osłabiania pola oraz w algorytmie diagnostycznym. Ponadto prędkość ta przestraża estymator strumienia i momentu elektromagnetycznego estymatora MRAS [3].

Informacje z czujników prądu stojana, napięcia w obwodzie pośredniczącym, oraz sygnały estymowane dostarczane są do układu diagnostycznego. W przypadku wystąpienia awarii czujnika lub błędnego działania napędu, układ musi doprowadzić do jego bezpiecznego zatrzymania. Z tego punktu widzenia informacja o aktualnej wartości prędkości kątowej jest jednym z kluczowych aspektów w napędzie trakcyjnym gwarantującym jego bezpieczne użytkowanie.



Rys. 1. Bezczywnikowy układ DTC-SVM z estymatorem MRAS
 Fig. 1. General scheme of the sensorless traction drive system

Estymator strumienia stojana, momentu elektromagnetycznego oraz prędkości kątownej przedstawiony w niniejszej pracy opiera się na modelu matematycznym silnika indukcyjnego [2] opisanym za pomocą równań (1)–(4) wyrażonych w jednostkach względnych:

$$T_N \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} = \frac{1}{x_s \sigma} \left(\mathbf{u}_s - \alpha \mathbf{i}_s + \frac{x_m r_r}{x_r^2} \Psi_r - j \frac{x_m}{x_r} \omega_m \Psi_r \right) \quad (1)$$

$$T_N \frac{d\Psi_r}{dt} = -\frac{r_r}{x_r} \Psi_r + \frac{x_m r_r}{x_r} \mathbf{i}_s + j \omega_m \Psi_r \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{T_M} (m_e - m_o) \quad (3)$$

$$m_e = x_m / x_r (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad (4)$$

gdzie: ω_m , m_e , m_L , T_M – prędkość kątowna, moment elektromagnetyczny i obciążenia, mechaniczna stała czasowa, r_s , r_r – rezystancje stojana i wirnika, x_m , $x_s = x_m + x_{s\sigma}$, $x_r = x_m + x_{r\sigma}$ – reaktancje magnesująca, stojana i wirnika, $x_{s\sigma}$, $x_{r\sigma}$ – reaktancje rozproszenia

stojana i wirnika, $T_N = 1/2\pi f_{sN}$, $\alpha = r_s + r_r x_m^2/x_r^2$, $\sigma = 1 - x_m^2/x_s x_r$, f_{sN} – częstotliwość znamionowa.

Wykorzystując zależności opisujące model silnika przedstawiony w równaniach (1)-(4), estymator MRAS^{CC} przyjmuje postać:

$$T_N \frac{d\mathbf{i}_s^e}{dt} = \frac{1}{x_s \sigma} \left(\mathbf{u}_s - r_s \mathbf{i}_s^e - \frac{x_m}{x_r} \left(r_r \frac{x_m}{x_r} \mathbf{i}_s^e - \frac{r_r}{x_r} \Psi_r^e - j\omega_m^e \Psi_r^e \right) \right) \quad (5)$$

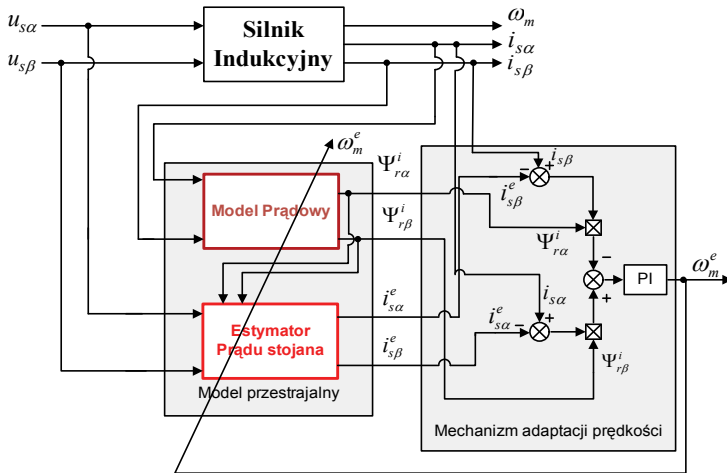
$$\frac{d}{dt} \Psi_r^i = \left[\frac{r_r}{x_r} (x_m \mathbf{i}_s - \Psi_r^i) + j\omega_m^e \Psi_r^i \right] \frac{1}{T_N} \quad (6)$$

Prędkość kątowna wyliczana jest z zależności:

$$\omega_m^e = K_P (e_{i_{s\alpha}} \Psi_{r\beta}^i - e_{i_{s\beta}} \Psi_{r\alpha}^i) + K_I \int (e_{i_{s\alpha}} \Psi_{r\beta}^i - e_{i_{s\beta}} \Psi_{r\alpha}^i) dt \quad (7)$$

gdzie: $e_{i_{s\alpha,\beta}} = i_{s\alpha,\beta} - i_{s\alpha,\beta}^e$

Szczegółowy model matematyczny estymatora MRAS^{CC}, badania wrażliwości i stabilności opisano w szczegółach w [3]. Schemat ideowy układu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy estymatora MRAS^{CC}

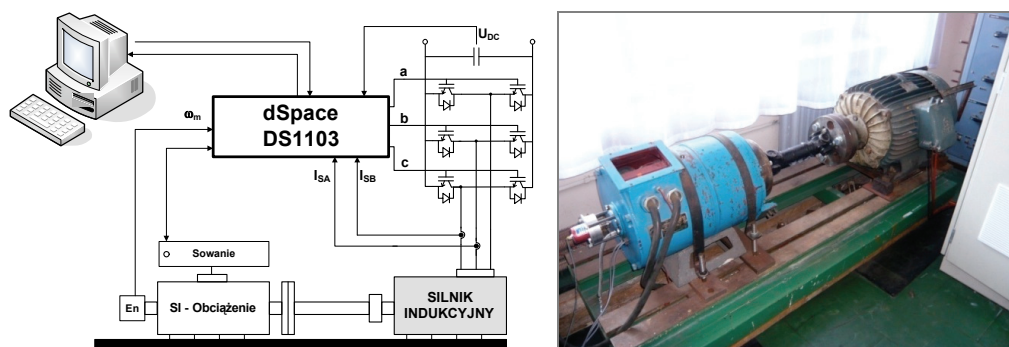
Fig. 2. Block diagram of the MRAS^{CC} estimator

Składowe strumienia stojana, niezbędne do prawidłowej pracy układu DTC-SVM można wyznaczyć z zależności:

$$\Psi_s^e = \frac{x_m}{x_r} \Psi_r^e + x_s \mathbf{i}_s \quad (8)$$

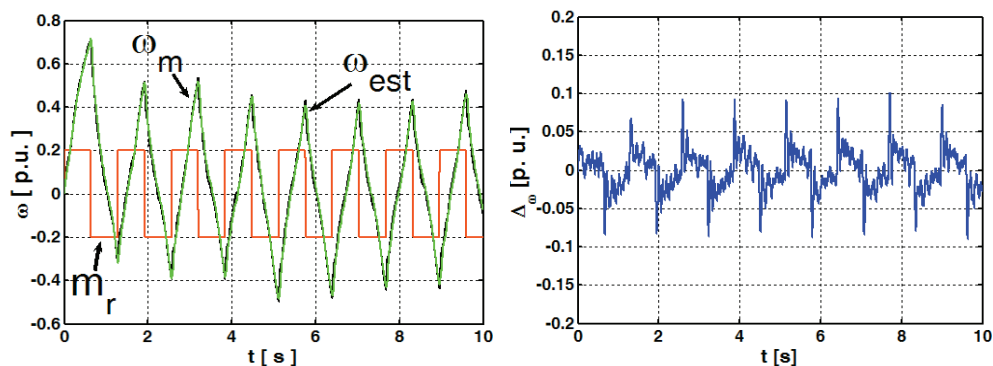
3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W niniejszym rozdziale przedstawiono badania eksperymentalne bezczujnikowego układu wektorowego sterowania indukcyjnym silnikiem trakcyjnym przy wykorzystaniu metody DTC-SVM i estymatora MRAS^{CC}. Schemat stanowiska i jego zdjęcie przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska laboratoryjnego i zdjęcie zestawu badawczego 50 kW

Fig. 3. Schematic diagram of the laboratory test bench and the photo of the 50 kW traction drive system



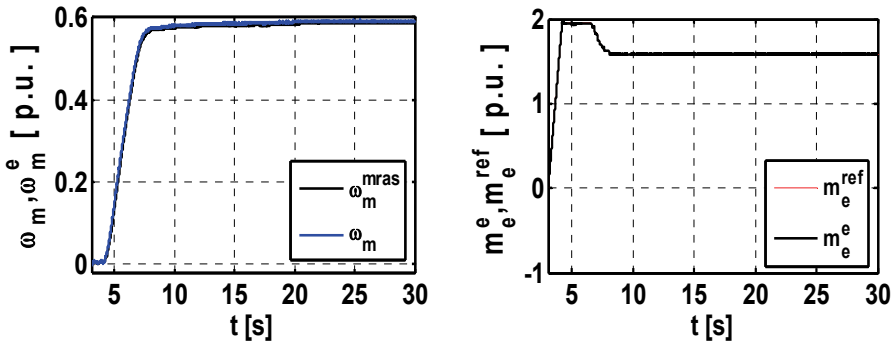
Rys. 4. Przebiegi eksperymentalne układu DTC-SVM z estymatorem MRAS^{CC} dla $m_{ref} = \pm 0,2 m_{LN}$

Fig. 4. Experimental transients of the DTC-SVM drive with with MRAS^{CC} estimator for $m_{ref} = \pm 0,2 m_{LN}$

W celu sprawdzenia poprawności działania struktury sterowania momentem z silnikiem o mocy 50 kW wykonano testy, które w sposób jednoznaczny pozwalają na ocenę jakości estymacji momentu elektromagnetycznego, prędkości, dynamiki działania struktury. Badania polegały na stosunkowo szybkich, skokowych, zmianach momentu. Na skutek tych zmian prędkość wzrasta (dla dodatniego momentu) i spada (dla wartości ujemnej). Moment estymowany jest w sposób prawidłowy, błąd odtwarzania prędkości kątowej jest bliski zeru (rys. 4).

Na rysunku 5 przedstawiono rozruch układu napędowego z silnikiem trakcyjnym z momentem znacznie przekraczającym wartość znamionową ($m \sim 3m_N$). Widoczne jest, że w początkowej chwili, gdy moment elektromagnetyczny jest mniejszy od wartości momentu obciążenia prędkość silnika jest równa zeru (do 3 sek.). Po przekroczeniu momentu generowanego przez silnik wartości obciążenia (wymuszonego przez strukturę sterowania) układ rozpoczyna się rozpędzać. Proces ten przebiega tak długo, aż wartość zadana momentu nie zostanie zmniejszona do wartości równej lub mniejszej od momentu obciążenia. Układ pracuje wtedy z prędkością stałą lub przechodzi w tryb łagodnego hamowania.

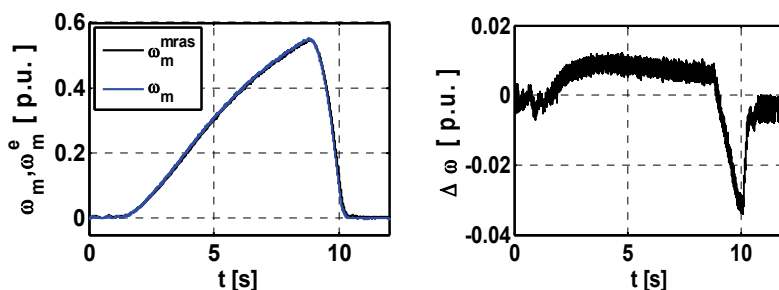
Na rysunku 5 widać, że napęd bezczujnikowy z estymatorem MRAS pracuje w sposób prawidłowy, prędkość estymowana pokrywa się z wartością mierzoną, moment estymowany jest na wartości wymuszonej, przez operatora.



Rys. 5. Rozruch bezczujnikowego układu DTC-SVM z momentem większym od wartości znamionowej
 Fig. 5. Start-up operation of the DTC-SVM drive under bigger than nominal load torque with MRAS^{CC} estimator; (experimental tests)

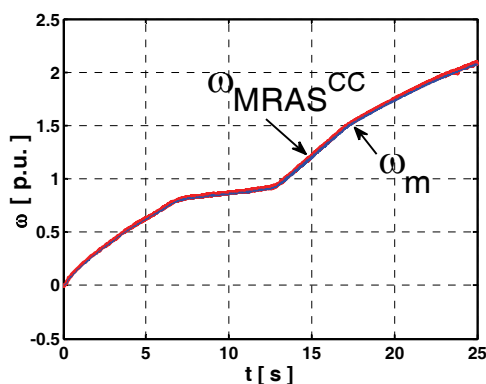
Na rysunku 6 przedstawiono inny ważny proces typowy dla napędów trakcyjnych. Jest to stan rozruchu i hamowania. Procesy te ze względów bezpieczeństwa są priorytetowe i każdy napęd, który ma być zaimplementowany w rzeczywistych pojazdach komunikacji miejskiej musi przejść rygorystyczne testy polegające na szybkim rozruchu i hamowaniu z odpowiednimi przyspieszeniami. Podczas tych stanów niedopuszczalne są jakiegokolwiek anomalie pojawiające się w estymowanych wielkościach.

Widoczne jest, że wartość prędkości estymowanej pokrywa się z wartością rzeczywistą. Proces hamowania jest bardzo szybki – zatrzymanie napędu pracującego z pełnym momentem obciążenia z prędkości ~ 1000 obr/min trwa niecałe 2 sekundy.



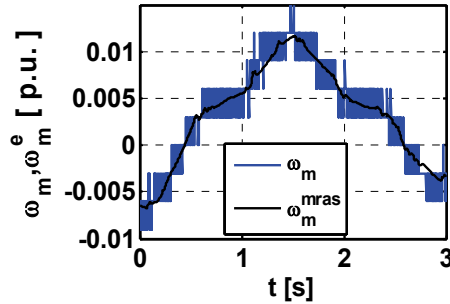
Rys. 6. Rozruch i hamowanie bezczujnikowego układu DTC-SVM z momentem obciążenia
 Fig. 6. Start-up and breaking operations of the DTC-SVM drive under load torque with MRAS^{CC} estimator; (experimental tests)

Aby możliwe było uzyskanie przez tramwaj prędkości przejazdowych bliskich 70 km/h konieczne jest wymuszanie w układach sterowania prędkości znacznie przekraczających wartość znamionową. W typowym napędzie trakcyjnym dla osiągnięcia prędkości ok. 30 km/h konieczne jest wygenerowanie znamionowej prędkości silników. Oznacza to, że w celu poruszania się z większymi prędkościami konieczne jest osłabianie pola. Na rysunku 7 przedstawiono proces rozruchu obciążonego układu napędowego do prędkości ponad dwa razy większej od wartości znamionowej. Wyraźnie widoczne jest, że napęd pracuje w sposób prawidłowy, prędkość estymowana jest z niewielkim błędem.



Rys. 7. Praca z osłabianiem pola bezczujnikowego układu DTC-SVM z momentem obciążenia
 Fig. 7. Experimental transients of the DTC-SVM drive with MRAS^{CC} for field weakening operation with load torque

Z punktu widzenia estymacji prędkości kątowej i napędów bezczujnikowych, kluczowa wydaje się sprawa pracy napędu w otoczeniu niskich prędkości kątowych. Na rys. 8 przedstawiono pracę napędu trakcyjnego sterowanego metodą DTC-SVM w otoczeniu niskich prędkości kątowych z momentem obciążenia. Widać, że wartość estymowana pokrywa się z wartością mierzoną, a jej przebieg jest bardziej „gładki” niż prędkość mierzona. Jest to wynikiem zastosowania do pomiaru prędkości typowych trakcyjnych czujników o rozdzielczości 100imp/obr.



Rys. 8. Praca z niskimi prędkościami bezczujnikowego układu DTC-SVM z momentem obciążenia
 Fig. 8. Experimental transients of the DTC-SVM drive with MRAS^{CC} for low speed operation with load torque

3. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono analizę pracy bezczujnikowego wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym w zastosowaniach trakcyjnych. Wykorzystano metodę DTC-SVM z estymatorem MRAS^{CC}. Wykazano, że układ pracuje w sposób prawidłowy w całym zakresie zmian prędkości i momentu obciążenia w różnych warunkach pracy, typowych dla trakcji lekkiej. Można powiedzieć, że w przypadku napędów trakcyjnych sterowanych metodą DTC-SVM bez jawnego sprzężenia od prędkości kątowej możliwa jest stabilna praca napędu w całym zakresie zmian prędkości i momentu obciążenia w trybie bezczujnikowym.

LITERATURA

- [1] VAS P., *Sensorless vector and direct torque control*, Oxford University Press, New York 1998.
- [2] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Sensorless induction motor drives*, Wrocław University of Technology Press, Wrocław, Poland, 2003 (in Polish).
- [3] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M., *Stator current-based MRAS estimator for wide range speed-sensorless induction motor drive*, IEEE Trans. Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, No. 4, 1296–1308.

- [4] COLINH C., PIETRZAK-DAWID M., *Sensorless traction system with low voltage high current induction machine for indoor vehicle*, Proc. of the IEEE/PEDS'2005 Confer., 2005, 50–55.
- [5] PEROUTKA Z., ZEMAN K., *Robust field weakening algorithm for vector-controlled induction machine traction drives*, Proc. of the IEEE/IECON'2006, 856–861.
- [6] PEROUTKA Z., ZEMAN K., *New field weakening strategy for AC machine drives for light traction vehicles*, Proc. the 9th Conf. EPE'2007, Aalborg, Denmark, on CD, 2007.

SENSORLESS INDUCTION MOTOR DRIVE SYSTEM FOR TRACTION APPLICATIONS

In the paper the sensorless DTC-SVM for induction motor drive system for tram application is described. To the rotor speed, electromagnetic torque and stator flux vector reconstruction the MRAS type estimator was applied. This estimator is less sensitive to the motor parameter variation than other observers and is stable in the whole speed reference changes. Experimental result was performed for 50kW induction motor in the whole speed and torque regions.