



POLITECHNIKA KRAKOWSKA

im. Tadeusza Kościuszki

---



Wydział  
Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej

# Streszczenie pracy Doktorskiej

**Analiza możliwości ograniczenia składowej  
przemiennej momentu elektromagnetycznego w  
silniku ASM sterowanym wektorowo w napędach  
trakcyjnych**

AUTOR:

**MGR INŻ. MAREK DUDZIK**

PROMOTOR:

**PROF. DR HAB. INŻ. ADAM JAGIEŁŁO**

## 1. Metoda z bezpośrednim zadawaniem momentu DTC

Metoda DTC znajduje wykorzystanie w pojazdach trakcyjnych, gdy wymaga się od nich bardzo dobrych właściwości dynamicznych, dobrych właściwości statycznych, jak również dobrych właściwości przy wysokich prędkościach. Metoda ta spełnia te wymagania przy małej złożoności obliczeniowej, co stanowi jej istotny atut. Do jej zalet zaliczyć można również prostotę w dostrojeniu metody. Metoda DTC cechuje się dużą uniwersalnością, małą zależnością od parametrów maszyny indukcyjnej i przeciętnymi właściwościami przy niskich prędkościach. Wadami tej metody są duże straty łączeniowe i wysoki współczynnik THD [1]. Rysunek 1 przedstawia schemat sterowania wektorowego metodą DTC-ST [1], [2], [3], gdzie:

$\Psi_{sref}$  – zadana wartość chwilowa strumienia magnetycznego stojana;

$\Psi_s$  – estymowany sygnał chwilowej wartości strumienia stojana maszyny sterowanej;

$\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$  – estymowany sygnał chwilowego strumienia stojana maszyny sterowanej w osiach  $\alpha, \beta$ ;

$M_{zad}$  – zadana wartość chwilowa momentu elektromagnetycznego maszyny sterowanej;

$M_e$  – estymowany sygnał chwilowego momentu elektromagnetycznego maszyny sterowanej;

$dpsi$  – sygnał wyjściowy dwustanowego regulatora histerezy strumienia;

$dM$  – sygnał wyjściowy trójstanowego histerezy regulatora momentu;

$u_{sABC}$  – sygnał chwilowy napięć zasilania stojana maszyny sterowanej;

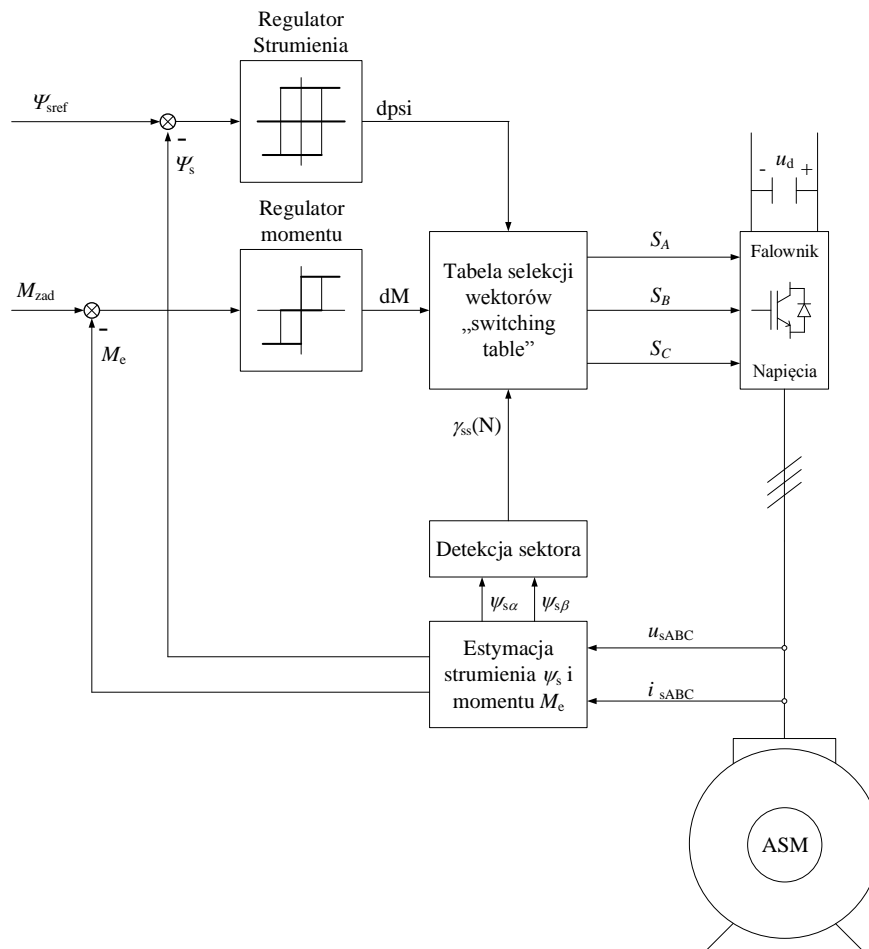
$i_{sABC}$  – sygnał chwilowy prądów stojana maszyny sterowanej;

$u_d = u_d(t)$  – wartość chwilowa napięcia zasilania falownika napięcia;

$\omega_m$  – chwilowa wartość prędkości kątowej maszyny sterowanej;

$S_A, S_B, S_C$  – czasowe, dyskretne sygnały sterujące przełączeniem dwupołożeniowych kluczy falownika napięcia;

$\gamma_{ss}(N)$  – numer sektora, w którym znajduje się wektor  $\vec{\psi}_s(t)$ .



Rys. 1. Schemat sterowania wektorowego metodą DTC-ST [1], [2], [3]

## 2. Okoliczności i przyczyny podjęcia tematu pracy

Do okoliczności i przyczyn podjęcia tematu należą:

- ✓ Wzrost wymagań eksploatacyjnych stawianych współczesnym układom regulacji w napędach trakcyjnych, a co za tym idzie, konieczność rozwoju istniejących metod sterowania napędami współczesnych pojazdów trakcyjnych, tworzenie nowych, oryginalnych koncepcji układów regulacji opartych o te metody, jak i tworzenie zupełnie nowych metod sterowania układami napędowymi pojazdów trakcyjnych.
- ✓ Konieczność realizacji sposobu sterowania maszyną indukcyjną umożliwiającego poprawę działania metody DTC w zakresie obniżenia wartości tętnień momentu elektromagnetycznego bez zmiany jej struktury wewnętrznej, a w najlepszym przypadku bez zmiany nastaw regulatorów funkcjonującej metody sterowania na pojeździe. Dzięki temu będzie istniała możliwość modernizacji pojazdów trakcyjnych wykorzystujących metodę DTC przy minimalnej ingerencji w układ sterowania.
- ✓ Chęć poprawy niezawodności pojazdu trakcyjnego oraz prawdopodobne zmniejszenie częstotliwości przeglądów pojazdów już istniejących, jak również konstruowanych i projektowanych jednostek napędowych pojazdów trakcyjnych wykorzystujących metodę DTC.

- ✓ Możliwość zmniejszenia częstości wymian maszyn elektrycznych sterowanych metodą DTC.
- ✓ Możliwość zmniejszenia częstości wymian podzespołów układu napędowego pojazdu trakcyjnego, między innymi takich jak wały maszyn, bądź też łożyska je podtrzymujące i inne.
- ✓ Możliwość podniesienia rentowności pojazdu trakcyjnego, dzięki zwiększeniu jego niezawodności ze względu na uszkodzenia pochodzące od tętnień momentu elektromagnetycznego, które występują w klasycznej metodzie DTC.
- ✓ Możliwość podniesienia bezpieczeństwa osób pracujących na pojeździe podczas jego eksploatacji.

Wobec powyżej wymienionych okoliczności i przyczyn podjęcia tematu pracy, zmierza ona w swej ostatecznej formie do zaproponowania koncepcji dodatkowego układu regulacji dla pojazdu trakcyjnego wykorzystującego metodę DTC, który umożliwiłby obniżenie tętnień momentu elektromagnetycznego pochodzących od tej metody. Przy tym układ ten ma za zadanie obniżenie tętnień momentu elektromagnetycznego przy minimalnej ingerencji w układ sterowania na tym pojeździe. Dzięki temu będzie istniała możliwość modernizacji pojazdu bez potrzeby wymiany i dodatkowych ustawień już istniejących i funkcjonujących podzespołów układu napędowego sterowanego poprzez metodę DTC. Pojawi się również możliwość projektowania pojazdów trakcyjnych wykorzystujących zaproponowaną koncepcję, co w konsekwencji umożliwić może w przyszłości ich praktyczną realizację.

### 3. Cel i zakres pracy

Na maszynę indukcyjną zasilaną z dwupoziomowego przekształtnika napięcia w metodzie DTC w danej chwili działa jeden z wektorów wirującego napięcia stojanowego. Należy podkreślić fakt, że liczba tych wektorów jest ograniczona do 8 (6 wektorów aktywnych i 2 zerowe). Na podstawie tego stwierdzić można, że możliwości modyfikacji algorytmów zmian tych wektorów są również ograniczone, "stąd zwykle polepszenie jednych właściwości odbywa się kosztem pogorszenia innych" [2, p. 17]. Sytuacja ta mogłaby ulec zmianie, gdyby maszyna elektryczna zasilana była z przekształtnika mocy, którego długości generowanych wektorów mogłyby być dostosowywane odpowiednio do warunków panujących w obiekcie sterowanym. Możliwe było by to tylko wtedy, gdyby maszyna elektryczna została zasilona z przekształtnika mocy, który długości generowanych wektorów mógłby dostosowywać odpowiednio do wymogów punktu pracy zasilanej maszyny asynchronicznej.

Na podstawie hipotezy odnoszącej się do problemu wykorzystania zmienności długości wektorów napięcia przekształtnikowego do redukcji tętnień momentu napędowego maszyny asynchronicznej w napędach trakcyjnych sformułowano ogólną tezę pracy, która brzmi: **"istnieje możliwość ograniczenia składowej przemiennej momentu elektromagnetycznego dla metody DTC poprzez odpowiednie dostosowanie napięcia zasilania falownika dwupoziomowego"**.

Obszar, w jakim mieści się niniejsza praca, ma charakter naukowy, którego głównym celem jest opracowanie odpowiednich koncepcji dla istniejącego już modelu sterowania maszyną asynchroniczną przy pomocy metody DTC. Należy również podkreślić, że proponowana przez autora pracy metoda zmiany długości wektorów napięcia przekształtnika mocy poprzez odpowiednie dostosowanie wartości jednego z potencjałów znajdujących się na zaciskach wyjściowych przekształtnika odbywać się będzie niejednokrotnie w stanie nieustalonym pracy maszyny sterowanej. Fakt ten ogranicza możliwości przedstawienia ścisłego rozwiązania zagadnienia poprzez zaprezentowanie odpowiedniego aparatu matematycznego, dlatego też prezentacji tej nie obejmuje zakres pracy.

Autor musiał ograniczyć tematykę swej pracy do wpływu na tętnienia momentu napędowego ze względu na obszerność zadań rozwojowych związanych z modyfikacją metod sterowania. Część analityczna pracy ogranicza się w głównej mierze do opisu stanów ustalonych w układzie napędowym, co w przypadku napędów trakcyjnych jest dopuszczalne ze względu na quasi-stacjonarny charakter występujących w trakcji zmian prędkości kątowej wału maszyny. Stany przejściowe o dużej dynamice występujące w tych układach w momencie poślizgu kół, określane terminem angielskim "slip and slide", nie są rozpatrywane w tej pracy. Reakcja układu napędowego na te stany pracy jest tematyką zbyt obszerną, by można było ją uwzględnić w przeprowadzonych badaniach.

Mimo złożoności tematyki praca obejmuje wyjaśnienie postawionej tezy w możliwym do przedstawienia przez autora zakresie. Jako układ do celów badawczych wybrano istniejący model symulacyjny występujący w publikacjach krajowych, jak i zagranicznych [4], [5], [6]. Układ ten został zaprojektowany przez H. Blanchette, L.-A. Dessaint z Ecole de technologie supérieure (Montreal) i jest on jednym z układów demonstracyjnych środowiska Matlab, Simulink.

Zakres pracy wynika z postawionego problemu. Implikuje on rozwiązanie następujących zadań:

1. Opracowanie w środowisku Simulink układu sterowania napięciem zasilania falownika dwupoziomowego dla zaprojektowanego w tym środowisku układu sterowania wektorowego maszyny ASM z bezpośrednim zadawaniem momentu, zasilanego ze sterowanego idealnego źródła napięcia.
2. Zastosowanie opracowanego układu sterowania napięciem zasilania falownika dwupoziomowego do ograniczenia składowej przemiennej momentu elektromagnetycznego w zaprojektowanym w środowisku Simulink modelu silnika ASM sterowanego wektorowo z bezpośrednim zadawaniem momentu elektromagnetycznego.

### **3. Konstrukcja pracy**

We wstępie do niniejszej pracy autor przedstawił rys historyczny rozwoju trakcji elektrycznej na świecie, na podstawie którego stwierdził, że wzrost wymagań eksploatacyjnych stawianych współczesnym układom regulacji w napędach trakcyjnych jest

nieunikniony. W rozdziale pierwszym zostały opisane też różne metody sterowania przekształtników zasilających maszyny indukcyjne. Opisano zalety i wady tych metod, trudności występujące w metodzie DTC–ST oraz ich rozwiązania. Rozdział ten zawiera także szerszy opis trudności związanej z wpływem tętnień momentu napędowego na kanał przenoszenia mocy od silnika do koła w metodzie DTC. Podkreślono w nim wagę zmniejszenia tętnień momentu elektromagnetycznego w układach napędowych sterowanych poprzez metodę DTC i w związku z tym przedstawiono okoliczności i przyczyny podjęcia tematu pracy.

Rozdział 2. Cel i zakres pracy autor rozpoczął od opisu narodzin samej koncepcji pracy. Zawarł w nim objaśnienie sensu tytułu, założenia do pracy, informację o tym, w jakim rozmiarze praca została podjęta, czego praca dotyczy, a czego nie oraz w jakim obszarze się mieści.

Rozdział 4. Opis analityczny metody sterowania DTC–ST zawiera klasyfikację wektorowych metod sterowania momentem i strumieniem. Opisano w nim ideę sterowania wektorowego metodą DTC–ST za pomocą wektorów napięcia wytwarzanych przez dwupołożeniowy falownik. Przedstawiono podział na sektory w metodzie DTC–ST oraz w jaki sposób odbywa się chwilowa zmiana położenia wektora strumienia stojana pod wpływem działania wspomnianych wektorów napięcia. Opisano czynniki wpływające na decyzję o wyborze wektora napięcia w metodzie DTC–ST. Przedstawiono wzór na chwilowy moment elektromagnetyczny maszyny indukcyjnej oraz jego przekształconą postać dla pierwszej harmonicznej tego momentu. Na podstawie ww. wzoru wyjaśniono ideę wykorzystania regulatorów histerezowych oraz tablicy przełączeń, tzw. "switching table" w tej metodzie.

W rozdziale 5. Dotychczasowe metody, które pozwalają osiągnąć cel pracy zawarto analizę publikacji dotyczących zasadniczego tematu pracy. Opisano alternatywne rozwiązania problemu obniżenia tętnień momentu elektromagnetycznego maszyny indukcyjnej zawarte w literaturze światowej. W początkowej części rozdziału autor skupia się na przedstawieniu analizy tematu dokonanej przez autora publikacji [2], dodając później swoje uwagi i własne propozycje poszerzające spojrzenie na podjęty problem. Wskazuje też, że podejście do tematyki badawczej zawarte w niniejszej pracy plasuje się poza powszechnym trendem badawczym. Autor pracy w niniejszym rozdziale zwraca szczególną uwagę na rozwiązania problematyki wprowadzające współczynnik wypełnienia ("duty ratio –  $\delta$ ") [7], [8]. Koncepcja opisana w publikacji [8], polegająca na regulacji średniej długości wektora aktywnego napięcia w czasie przełączeń ("switching time") przy wykorzystaniu współczynnika wypełnienia jest niezwykle istotna, ponieważ ostatecznie można sprowadzić ją do idei regulacji wartości napięcia zasilania dwupoziomowego falownika napięcia.

Rozpoczynając rozdział 6. Koncepcja i metoda autora – opis teoretyczny autor wyjaśnia, dlaczego dostosowanie wartości napięcia zasilania falownika powoduje obniżenie tętnień momentu elektromagnetycznego maszyny indukcyjnej. Przedstawia wyniki symulacji układu sterowania maszyną indukcyjną metodą DTC w środowisku Matlab/Simulink. Następnie opisuje koncepcje układu umożliwiającego zmniejszenie tętnień momentu elektromagnetycznego, dzięki której stworzono algorytm służący do tego celu. Na podstawie sformułowanego algorytmu zamodelowano przykładowy układ sterowania maszyną indukcyjną metodą DTC–MD i przedstawiono wyniki symulacji jej pracy. Na zakończenie porównano je z wynikami uzyskanymi dla metody DTC.

W rozdziale 7. Podsumowanie autor podsumowuje efekty swojej pracy. Przypomina, że istnieje możliwość ograniczenia składowej przemiennej momentu elektromagnetycznego dla metody DTC poprzez odpowiednie dostosowanie wartości napięcia zasilania falownika dwupoziomowego, czego dowiódł w rozdziałach poprzednich. Prezentuje także rezultaty obliczeń charakterystycznych wielkości związanych z tętnieniami momentu uzyskanych dla metod DTC i DTC–MD. Porównując wyniki dla obu metod autor stwierdza, że w rzeczywistości wykorzystanie zaproponowanych przez niego rozwiązań powinno poprawić niezawodność maszyny indukcyjnej.

#### 4. Realizacja układu sterowania wartością napięcia zasilania falownika dwupoziomowego - metoda DTC–MD

Zaproponowany przez autora układ sterowania wektorowego DTC z możliwością dostosowania wartości napięcia zasilania falownika napięcia dla uproszczenia będzie nazywany w niniejszej pracy układem DTC–MD.

Równania opisujące działanie układu sterowania wartością napięcia zasilania falownika dwupoziomowego z układem umożliwiającym wykrycie zmiany momentu zadanego maszyny sterowanej w metodzie DTC–MD są następujące:

$$T_{\max \varepsilon < 0} = \lambda_{\max \varepsilon < 0} \cdot M_{\text{zad}}(t_i) + T_{0 \min \varepsilon < 0} \quad (22)$$

$$\text{jeżeli } M_{\text{zad}}(t_i) - M_e(t_i) > -T_{\max \varepsilon < 0} \quad , \quad \text{wtedy } S_{T_{\max}}(t_i) = 0 \quad (23a)$$

$$\text{jeżeli } M_{\text{zad}}(t_i) - M_e(t_i) \leq -T_{\max \varepsilon < 0} \quad , \quad \text{wtedy } S_{T_{\max}}(t_i) = 1 \quad (23b)$$

$$u_{\text{ddost}}(i) = u_{\text{dzas}}(t_i) - S_i \quad (24)$$

gdzie:

$$\text{jeżeli } S_i < u_{\text{ddostMin}} \quad , \quad \text{to } S_i = u_{\text{ddostMin}} \quad , \quad (25a)$$

$$\text{jeżeli } u_{\text{ddostMin}} \leq S_i \leq u_{\text{ddostMax}} \quad , \quad \text{to} \\ S_i = S_{i-1} + u_{\text{dzas}}(t_i) \cdot \lambda_{\text{zas}} \cdot S_{T_{\max}}(t_i) - S_{\text{dete}}(t_i) \cdot S_i \quad [\text{V}], \quad \text{przy } S_0 = 0 \quad , \quad (25b)$$

$$\text{jeżeli } S_i > u_{\text{ddostMax}} \quad , \quad \text{to } S_i = u_{\text{ddostMax}} \quad (25c)$$

Gdzie

$i$  –  $i$ -ta iteracja obliczeń numerycznych ( $i = 1, 2, \dots$ ),

$t_i$  – czas  $i$ -tej iteracji obliczeń numerycznych w sekundach,

$T_{\max \varepsilon < 0}$  – określona wartość chwilowa maksymalnych tętnień momentu ze znakiem dodatnim w N·m,

$\lambda_{\max \varepsilon < 0}$  – bezwymiarowy współczynnik wagi momentu zadanego wpływający na określone wartości chwilowe maksymalnych tętnień momentu ze znakiem dodatnim,

$M_{\text{zad}}(t) = M_{\text{zad}}$  – chwilowa wartość momentu zadanego w N·m,

$T_{0 \min \varepsilon < 0}$  – minimalna wartość określonych wartości chwilowych maksymalnych tętnień momentu ze znakiem dodatnim w N·m.

$u_{\text{ddost}}(i)$  –  $i$ -ta iteracja obliczeń numerycznych zadanej dostosowanej wartości napięcia zasilania falownika napięcia mierzona w voltach,

- $u_{dzas}(t_i)$  – nieobniżona wartość napięcia zasilania falownika napięcia mierzona w woltach w czasie  $i$ -tej iteracji obliczeń numerycznych,
- $\lambda_{zas}$  – bezwymiarowy współczynnik wagi wystąpienia sygnału  $S_{Tmax}(t_i) = 1$  wpływający na sygnał  $u_{ddost}(i)$ ,
- $S_{Tmax}(t_i)$  – sygnał wyjściowy bloku "Sprawdzenie warunku logicznego, czy układ może zmniejszyć wartości tętnień momentu elektromagnetycznego maszyny sterowanej", który wystąpił w czasie  $i$ -tej iteracji obliczeń numerycznych.
- $M_{zad}(t_i)$  – wartość momentu zadanego w N·m w czasie  $i$ -tej iteracji obliczeń numerycznych,
- $M_e(t_i)$  – moment elektromagnetyczny maszyny indukcyjnej w N·m w czasie  $i$ -tej iteracji obliczeń numerycznych,
- $S_{Tmax}(t_i)$  – sygnał wyjściowy bloku "Sprawdzenie warunku logicznego, czy układ może zmniejszyć wartości tętnień momentu elektromagnetycznego maszyny sterowanej" w czasie  $i$ -tej iteracji obliczeń numerycznych.
- $S_{detc}(t_i)$  – sygnał wyjściowy układu detekcji zmian momentu zadanego w układzie sterowania w przedziałach czasu, w których prędkość obrotowa maszyny sterowanej utrzymywana była w okolicach stałej wartości, występujący w czasie  $i$ -tej iteracji obliczeń numerycznych.
- $u_{dostMin}$  – najmniejsza możliwa do osiągnięcia wartość napięcia  $S_i$  w woltach,
- $u_{dostMax}$  – największa możliwa do osiągnięcia wartość napięcia  $S_i$  w woltach.

## 5. Porównanie wyników symulacji pracy metody DTC z metodą DTC-MD

Tabele 1 i 2 przedstawiają wyniki obliczeń określonych wielkości związanych z tętnieniami momentu elektromagnetycznego maszyny indukcyjnej sterowanej odpowiednio metodami DTC i DTC-MD

Tab. 1. Wyniki obliczeń określonych wielkości związanych z tętnieniami momentu elektromagnetycznego maszyny indukcyjnej sterowanej metodą DTC

$M_{zad}$ [N·m]	$u_d$ [V]	$n_m$ [ $\frac{obr}{min}$ ]	$\Delta t$ [sek]	$n_{Tmin}$ [-]	$T_{sr\_min}$ [N·m]	$T_{min}$ [N·m]	$n_{Tmax}$ [-]	$T_{sr\_max}$ [N·m]	$T_{max}$ [N·m]
360,0	600,0	497,0	0,56	3538	-53,2	-80,3	3538	32,5	52,0
120,0	600,0	242,0	0,58	3760	-50,1	-73,8	3759	38,2	59,7
720,0	600,0	425,0	0,54	3342	-49,8	-75,8	3342	33,9	53,3



Tab. 2. Wyniki obliczeń określonych wielkości związanych z tętnieniami momentu elektromagnetycznego maszyny indukcyjnej sterowanej metodą DTC–MD

$M_{zad}$ [N·m]	$u_d$ [V]	$n_m$ $\left[\frac{obr}{min}\right]$	$\Delta t$ [sek]	$n_{Tmin}$ [-]	$T_{sr\_min}$ [N·m]	$T_{min}$ [N·m]	$n_{Tmax}$ [-]	$T_{sr\_max}$ [N·m]	$T_{max}$ [N·m]
360,0	187,8	498,0	0,56	1965	-17,1	-66,7	1965	3,8	6,2
120,0	127,3	242,5	0,58	2653	-11,2	-19,7	2652	4,5	7,1
720,0	255,8	425,0	0,54	2519	-25,4	-44,6	2519	9,6	14,9

Gdzie:

$M_{zad}$  – wartość momentu zadanego w układzie sterowania,

$u_d$  – wartość napięcia zasilania falownika napięcia,

$n_m$  – prędkość obrotowa wału maszyny indukcyjnej,

$\Delta t$  – analizowany przedział czasu symulacji,

$n_{Tmin}$  – liczba wystąpień najmniejszych momentów elektromagnetycznych maszyny sterowanej, które odczytano w poszczególnych przedziałach czasu, dla których wartość momentu elektromagnetycznego była mniejsza od wartości zadanej w analizowanym przedziale czasu  $\Delta t$  symulacji,

$T_{sr\_min}$  – średnia arytmetyczna obliczona z najmniejszych momentów elektromagnetycznych maszyny sterowanej, które odczytano w poszczególnych przedziałach czasu, dla których wartość momentu elektromagnetycznego była mniejsza od wartości zadanej w analizowanym przedziale czasu  $\Delta t$  symulacji,

$T_{min}$  – najmniejsza wartość momentu elektromagnetycznego spośród najmniejszych momentów elektromagnetycznych maszyny sterowanej, które odczytano w poszczególnych przedziałach czasu, dla których wartość momentu elektromagnetycznego była mniejsza od wartości zadanej w analizowanym przedziale czasu  $\Delta t$  symulacji,

$n_{Tmax}$  – liczba wystąpień największych momentów elektromagnetycznych maszyny sterowanej, które odczytano w poszczególnych przedziałach czasu, dla których wartość momentu elektromagnetycznego była większa od wartości zadanej w analizowanym przedziale czasu  $\Delta t$  symulacji,

$T_{sr\_max}$  – średnia arytmetyczna obliczona z największych momentów elektromagnetycznych maszyny sterowanej, które odczytano w poszczególnych przedziałach czasu, dla których wartość momentu elektromagnetycznego była większa od wartości zadanej w analizowanym przedziale czasu  $\Delta t$  symulacji,

$T_{max}$  – największa wartość momentu elektromagnetycznego spośród największych momentów elektromagnetycznych maszyny sterowanej, które odczytano w poszczególnych przedziałach czasu, dla których wartość momentu elektromagnetycznego była większa od wartości zadanej w analizowanym przedziale czasu  $\Delta t$  symulacji.

Na podstawie danych przedstawionych w tabelach 1 i 2 stwierdzić można, że przy tym samym momencie zadanym wartości średnie  $T_{sr\_min}$  i  $T_{sr\_max}$  obliczone z wartości

momentów elektromagnetycznych dla metody DTC–MD były mniejsze od wartości średnich  $T_{\text{sr\_min}}$  i  $T_{\text{sr\_max}}$  dla metody DTC.

Stosunki wartości  $T_{\text{sr\_min}}$  i  $T_{\text{sr\_max}}$  uzyskanych dla metody DTC–MD kolejno do wartości  $T_{\text{sr\_min}}$  i  $T_{\text{sr\_max}}$  otrzymanych z metody DTC dla danego momentu zadanego, wyrażone procentowo wyniosły:

dla  $M_{\text{zad}} = 360 \text{ N} \cdot \text{m}$  :

$$\frac{T_{\text{sr\_min}}(\text{metoda DTC- MD})}{T_{\text{sr\_min}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{-17,1}{-53,2} \cdot 100\% = 32,14\%$$

$$\frac{T_{\text{sr\_max}}(\text{metoda DTC- MD})}{T_{\text{sr\_max}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{3,8}{32,5} \cdot 100\% = 11,69\%$$

dla  $M_{\text{zad}} = 120 \text{ N} \cdot \text{m}$  :

$$\frac{T_{\text{sr\_min}}(\text{metoda DTC- MD})}{T_{\text{sr\_min}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{-11,2}{-50,1} \cdot 100\% = 22,36\%$$

$$\frac{T_{\text{sr\_max}}(\text{metoda DTC- MD})}{T_{\text{sr\_max}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{4,5}{38,2} \cdot 100\% = 11,78\%$$

dla  $M_{\text{zad}} = 720 \text{ N} \cdot \text{m}$  :

$$\frac{T_{\text{sr\_min}}(\text{metoda DTC- MD})}{T_{\text{sr\_min}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{-25,4}{-49,8} \cdot 100\% = 51,00\%$$

$$\frac{T_{\text{sr\_max}}(\text{metoda DTC- MD})}{T_{\text{sr\_max}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{9,6}{33,9} \cdot 100\% = 28,32\%$$

Podobną sytuację jak powyższa zauważyć można porównując otrzymane najmniejsze i największe wartości  $T_{\text{min}}$  i  $T_{\text{max}}$  z tabel 1 i 2. Stosunki wartości  $T_{\text{min}}$  i  $T_{\text{max}}$  uzyskanych dla metody DTC–MD kolejno do wartości  $T_{\text{min}}$  i  $T_{\text{max}}$  otrzymanych z metody DTC, wyrażone procentowo dla danego momentu zadanego wyniosły:

dla  $M_{\text{zad}} = 360 \text{ N} \cdot \text{m}$  :

$$\frac{T_{\text{min}}(\text{metoda DTC- MD})}{T_{\text{min}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{-66,7}{-80,3} \cdot 100\% = 83,06\%$$

$$\frac{T_{\text{max}}(\text{metoda DTC- MD})}{T_{\text{max}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{6,2}{52,0} \cdot 100\% = 11,92\%$$

dla  $M_{\text{zad}} = 120 \text{ N} \cdot \text{m}$  :

$$\frac{T_{\text{min}}(\text{metoda DTC- MD})}{T_{\text{min}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{-19,7}{-73,8} \cdot 100\% = 26,69\%$$

$$\frac{T_{\text{max}}(\text{metoda DTC- MD})}{T_{\text{max}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{7,1}{59,7} = 11,89\%$$

dla  $M_{\text{zad}} = 720 \text{ N} \cdot \text{m}$  :

$$\frac{T_{\text{min}}(\text{metoda DTC-MD})}{T_{\text{min}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{-44,6}{-75,8} \cdot 100\% = 58,84\%$$
$$\frac{T_{\text{max}}(\text{metoda DTC-MD})}{T_{\text{max}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{14,9}{53,3} \cdot 100\% = 27,95\%$$

Kolejna cecha metody proponowanej przez autora pracy została ujawniona przy porównaniu liczb wystąpień  $n_{T_{\text{min}}}$  i  $n_{T_{\text{max}}}$  dla metody DTC-MD z liczbami  $n_{T_{\text{min}}}$  i  $n_{T_{\text{max}}}$  dla metody DTC. Stosunki liczb  $n_{T_{\text{min}}}$  i  $n_{T_{\text{max}}}$  uzyskanych dla metody DTC-MD kolejno do liczb  $n_{T_{\text{min}}}$  i  $n_{T_{\text{max}}}$  otrzymanych z metody DTC, wyrażone procentowo dla danego momentu zadanego wyniosły:

dla  $M_{\text{zad}} = 360 \text{ N} \cdot \text{m}$  :

$$\frac{n_{T_{\text{min}}}(\text{metoda DTC-MD})}{n_{T_{\text{min}}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{1965}{3538} \cdot 100\% = 55,54\%$$
$$\frac{n_{T_{\text{max}}}(\text{metoda DTC-MD})}{n_{T_{\text{max}}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{1965}{3538} \cdot 100\% = 55,54\%$$

dla  $M_{\text{zad}} = 120 \text{ N} \cdot \text{m}$  :

$$\frac{n_{T_{\text{min}}}(\text{metoda DTC-MD})}{n_{T_{\text{min}}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{2653}{3760} \cdot 100\% = 70,56\%$$
$$\frac{n_{T_{\text{max}}}(\text{metoda DTC-MD})}{n_{T_{\text{max}}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{2652}{3759} \cdot 100\% = 70,55\%$$

dla  $M_{\text{zad}} = 720 \text{ N} \cdot \text{m}$  :

$$\frac{n_{T_{\text{min}}}(\text{metoda DTC-MD})}{n_{T_{\text{min}}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{2519}{3342} \cdot 100\% = 75,37\%$$
$$\frac{n_{T_{\text{max}}}(\text{metoda DTC-MD})}{n_{T_{\text{max}}}(\text{metoda DTC})} \cdot 100\% = \frac{2519}{3342} \cdot 100\% = 75,37\%$$

Przedstawione powyżej wyniki porównań w analizowanych przedziałach czasu wykazują, że tętnienia momentu elektromagnetycznego maszyny indukcyjnej sterowanej metodą DTC-MD są mniejsze od tętnień momentu elektromagnetycznego maszyny indukcyjnej sterowanej metodą DTC. Patrząc na zapisane w tabelach 1 i 2 wartości  $T_{\text{sr\_min}}$ ,  $T_{\text{sr\_max}}$ ,  $T_{\text{min}}$ ,  $T_{\text{max}}$  oraz obliczone stosunki wartości  $T_{\text{sr\_min}}$ ,  $T_{\text{sr\_max}}$ ,  $T_{\text{min}}$  i  $T_{\text{max}}$  uzyskanych z metody DTC-MD do wartości analogicznych uzyskanych z metody DTC, w każdym przypadku zanotowano zmniejszenie danej wartości otrzymanej z metody DTC-MD w stosunku do wartości otrzymanej z metody DTC.

Najmniejszy obliczony stosunek wyżej wymienionych wartości wyrażony procentowo wynosi 11,69%. Otrzymano go porównując wartości:  $T_{\text{sr\_max}}$  otrzymaną dla metody DTC-MD i  $T_{\text{sr\_max}}$  uzyskaną dla metody DTC, przy zadanej w układzie sterowania wartości momentu równej 360 N·m.

Oznacza to, że w najlepszym przypadku analizowanej pracy maszyny indukcyjnej metoda DTC–MD wykazała zmniejszenie wartości średniej arytmetycznej  $T_{sr\_max}$  ponad ośmiokrotnie w stosunku do wartości średniej arytmetycznej  $T_{sr\_max}$  otrzymanej z wyników pracy maszyny indukcyjnej sterowanej metodą DTC.

Okazuje się także, iż w najlepszym przypadku analizowanej pracy maszyny indukcyjnej sterowanej w oparciu o metodę DTC–MD zarejestrowano ponad ośmiokrotny spadek największej wartości momentu  $T_{max}$  (dla  $M_{zad} = 120 \text{ N} \cdot \text{m}$ ) w stosunku do wartości  $T_{max}$  otrzymanej dla pracy maszyny sterowanej metodą DTC.

Najmniejszą poprawę pracy maszyny indukcyjnej sterowanej metodą DTC–MD w porównaniu do metody DTC zanotowano w przypadku wartości momentu  $T_{min}$  (dla  $M_{zad} = 360 \text{ N} \cdot \text{m}$ ). Stosunek tych wartości dla obu metod wyrażony procentowo wyniósł 83,06%, co oznacza zmniejszenie tętnienia  $T_{min}$  w analizowany przypadku o niemalże 17%.

Porównując wielkości  $T_{sr\_max}$ ,  $T_{max}$  (uzyskane na podstawie obliczeń, dla których wartość momentu elektromagnetycznego była większa od wartości zadanej) z wielkościami  $T_{sr\_min}$ ,  $T_{min}$  (otrzymanymi na podstawie obliczeń, dla których wartość momentu elektromagnetycznego była mniejsza od wartości zadanej) z tabel 1 i 2 zauważyć można, że wartości bezwzględne pierwszych wielkości były mniejsze od wartości bezwzględnych drugich wielkości.

Na podstawie powyższych faktów stwierdza się, że istnieje możliwość ograniczenia składowej przemiennej momentu elektromagnetycznego dla metody DTC poprzez odpowiednie dostosowanie napięcia zasilania falownika dwupoziomowego, co dowodzi poprawności tezy pracy.

## Bibliografia pracy doktorskiej

- [1] M. Dybkowski, T. Orłowska-Kowalska, M. P. Kaźmierkowski i D. Stando, „Sterowanie układu napędowego z silnikiem indukcyjnym w zastosowaniach trakcyjnych,” *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 64*, nr Studia i Materiały nr 30, pp. 139-150, 2010.
- [2] A. Sikorski, *Bezpośrednia regulacja momentu i strumienia maszyny indukcyjnej*, tom 19, Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2009.
- [3] M. Morawiec, „Badanie układu napędowego silnika klatkowego z bezpośrednią regulacją momentu,” KATEDRA ENERGOELEKTRONIKI I MASZYN ELEKTRYCZNYCH, Politechnika Gdańska 2009 ver. 4, Opracowanie powstało na bazie instrukcji lab. J. Guziński, M. Włas : Badanie układu napędowego silnika klatkowego z bezpośrednią regulacją momentu 2008 ver. 3.
- [4] W. Hudy i K. Jaracz, „ANALIZA OPTIMALIZACJI PARAMETRYCZNEJ UKŁADU BEZPOŚREDNIEGO STEROWANIA MOMENTEM ELEKTROMAGNETYCZNYM METODĄ TAKAHASHI'EGO Z SILNIKIEM PIERŚCIENIOWYM,” w *MATERIAŁY XV JUBILEUSZOWEGO SYMPOZJUM "PODSTAWOWE PROBLEMY ENERGOELEKTRONIKI, ELEKTROMECHANIKI I MECHATRONIKI" PPEEm 2012 pod patronatem KOMITETU ELEKTROTECHNIKI*

POLSKIEJ AKADEMII NAUK, Gliwice, 11 - 13 GRUDNIA 2012.

- [5] N. H. A. Aziz i A. A. Rahman, „Simulation on Simulink AC4 Model (200hp DTC Induction Motor Drive) using Fuzzy Logic Controller,” w *2010 International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE 2010)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 5-7 December 2010.
- [6] W. Hudy i K. Jaracz, „Analiza układów regulacji prędkości obrotowej silnika indukcyjnego małej mocy z wewnętrznym obwodem bezpośredniego sterowania momentem elektromagnetycznym przy wykorzystaniu pakietu MATLAB/Simulink,” *MECHANIZACJA I AUTOMATYZACJA GÓRNICTWA*, nr 9(511), pp. 14-22, WRZESIEŃ 2013.
- [7] L. Romeral, A. Arias, E. Aldabas i M. G. Jayne, „Novel Direct Torque Control (DTC) Scheme With Fuzzy Adaptive Torque-Ripple Reduction,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, tom 50, nr 3, JUNE 2003.
- [8] T. Y. Abdalla, H. A. Hairik i A. M. Dakhil, „Minimization of Torque Ripple in DTC of Induction Motor Using Fuzzy Mode Duty Cycle Controller,” *Iraq J. Electrical and Electronic Engineering*, 2011.
- [9] T. Glinka, „HISTORIA I DZIEŃ DZISIEJSZY TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ,” *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 87/2010*, pp. 23-27.
- [10] Y. Srinivasa Kishore Babu i G. Tulasi Ram Das, „IMPROVEMENT IN DIRECT TORQUE CONTROL OF INDUCTION MOTOR USING FUZZY LOGIC DUTY RATIO CONTROLLER” *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 5 no 4, april 2010.
- [11] R. Toufouti, S. Meziane i H. Benalla, „DIRECT TORQUE CONTROL FOR INDUCTION MOTOR USING INTELLIGENT TECHNIQUES,” *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, pp. 36-44.
- [12] M. Vasudevan i R. Arumugam, „HIGH - PERFORMANCE ADAPTIVE INTELLIGENT DIRECT TORQUE CONTROL SCHEMES FOR INDUCTION MOTOR DRIVES” *KMITL Sci. Tech. J. Vol. 5 No. 3 Jul.-Dec. 2005*.
- [13] C. Bin-jun i N. Xiao-hong, „A Novel MC-DTC Method for Induction Motor Based on Fuzzy-neural Network Space Vector Modulation” *Journal of software*, Vol 7, No. 5 MAY 2012.
- [14] M. Żelechowski, Space Vector Modulated - Direct Torque Controlled (DTC-SVM) Inverter - Fed Induction Motor Drive, Ph.D. Thesis, Thesis supervisor Prof. Dr Sc. Marian P. Kaźmierkowski, Warsaw: Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Institute of Control and Industrial Electronics, 2005.
- [15] W. Siuta, w *Mechanika Techniczna*.
- [16] Z. ALNASIR i A. A.H., „Design of Direct Torque Controller of Induction Motor (DTC),” *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, pp. 54-70, Vol 4 No 2 Apr-May 2012.
- [17] G. Sieklucki, B. Bisztyga, A. Zdrojewski, T. Orzechowski i R. Sykulski, Modele i zasady sterowania napędami elektrycznymi, Kraków: Wydanie I, Wydawnictwa AGH,

2014.

- [18] S. Piechnik, *Mechanika techniczna ciała stałego*, Kraków: Wydawnictwo PK, 2007.
- [19] R. N. I. Idris i A. H. M. Yatim, „Direct Torque Control of Induction Machines With Constant Switching Frequency and Reduced Torque Ripple,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, tom 51, pp. 758-767, AUGUST 2004.
- [20] S. Mir i M. E. Elbuluk, „Precision torque control in inverter-fed induction machines using fuzzy logic,” *26th Annual IEEE, PESC '95 Record. vol. 1*, pp. 396-401, June 1995.
- [21] A. Purcell i P. P. Acarnley, „Enhanced Inverter Switching for Fast Response Direct Torque Control,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, tom 16, nr 3, pp. 382-389, MAY 2001.
- [22] K. Ramani i A. Krishnan, „A Novel Scheme of an Unified Flux and Torque Control Method for Direct Torque Control Algorithm Based Induction Motor,” *978-1-4244-1762-9/08/\$25.00*, 2008 IEEE.
- [23] A. Malina i M. Dudzik, „WYKORZYSTANIE ALGORYTMÓW SIECI NEURONOWYCH W CELU ZMNIEJSZENIA AMPLITUD WAHAŃ MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO W METODZIE STEROWANIA WEKTOROWEGO DTC,” w *Monografia: Elektrotechnika w zastosowaniach trakcyjnych: [praca zbiorowa pod redakcją ADAMA St. JAGIELŁY]*, Kraków, Wydawnictwo PK, 2014, pp. 281-294.
- [24] N. Vahdatifar, S. Mortazavi i R. Kianinezhad, „Neural Network Based Predictive DTC Algorithm for Induction Motors”. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 47 2010.
- [25] I. TAKAHASHI i T. NOGUCHI, „A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, Tomy %1 z %2IA-22, nr 5, pp. 820-827, SEPTEMBER/OCTOBER 1986.
- [26] E. Monmasson, A. A. Naassani i J.-P. Louis, „Extension of the DTC Concept,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, tom 48, nr 3, pp. 715-717, JUNE 2001.
- [27] J. Faiz i M. B. B. Sharifian, „Comparison of different switching patterns in direct torque control technique of induction motors,” *Electric Power Systems Research*, pp. 63-75, 2001.
- [28] B. S. Kumar, R. A. Gupta i R. Kumar, „12-Sector Methodology of Torque Ripple Reduction in a Direct Torque Controlled Induction Motor Drive,” w *SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, Oct. 18-26, 2006 in Bexco, Busan, Korea.
- [29] B. C. Babu i C. Poongothai, „High Performance Direct Torque Controlled Induction Motor Drive For Adjustable Speed Drive Applications,” w *First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, 2008.
- [30] C. Lascu, I. Boldea i F. Blaabjerg, „A Modified Direct Torque Control for Induction Motor Sensorless Drive,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, tom 36, nr 1, pp. 122-130, JANUARY/FEBRUARY 2000.

- [31] P. Mutschler i E. Flach, „Digital Implementation of Predictive Direct Control Algorithms for Induction Motors,” *0-7803-4943-1/98/\$10.00 IEEE*, pp. 444-451, 1998.
- [32] S. Vaez-Zadeh i G. H. Mazarei, „Open Loop Control of Hysteresis Band Amplitudes in Direct Torque Control of Induction Machines,” *0-7803-6401-5/00/\$10.00 IEEE*, pp. 1519-1524, 2000.
- [33] Mathworks, H. Blanchette i L.-A. Dessaint, „AC4-DTC Induction 200 HP Motor Drive,” Help pakietu Matlab/Simulink ver. R2011b (7.13.0.564) 64 bit, SimPowerSystems/Demos/Electric Drive Models/AC4 – DTC Induction 200 HP Motor Drive, Ecole de technologie superieure, Montreal.
- [34] A. S. Jagiełło, Systemy elektromechaniczne dla elektryków, Kraków: Wydawnictwo PK, 2008.