

**Prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński**

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**

**WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY**

**KATEDRA MECHATRONIKI**

☒ **44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10a**

☎ **(032) 237-28-03, fax (032) 237-27-09**

**Gliwice, dn. 15. 03. 2016**

**Recenzja rozprawy doktorskiej:**

**mgr inż. Marek Dudzik „Analiza możliwości ograniczenia składowej przemiennej momentu elektromagnetycznego w silniku ASM sterowanym wektorowo w napędach trakcyjnych”,**

**opracowana dla Rady Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej.**

**1. Tematyka i cel pracy ma tle aktualnego stanu wiedzy.**

Silniki indukcyjne od czasu ich wynalezienia przed stu trzydziestoma laty nieprzerwanie wiodą prym wśród przetworników elektromechanicznych, utrzymując wciąż pozycję najpopularniejszego i najpowszechniej stosowanego napędu w środowisku przemysłowym. Tą niezwykłą karierę zawdzięczają prostej konstrukcji, wysokiej niezawodności oraz naturalnym właściwościom ruchowym, znajdującym swoje odbicie w finezyjnym kształcie charakterystyki mechanicznej.

Przez pierwsze kilka dekad istnienia maszyn indukcyjnych trudnym do rozwiązania problemem pozostawała regulacja ich prędkości obrotowej, która wymagała stosowania dodatkowych urządzeń, dających możliwość zmiany napięcia zasilania oraz częstotliwości. Stąd też koncepcje współdziałania silników indukcyjnych z transformatorami, autotransformatorami i dławikami (dającymi możliwość nieznacznego obniżenia prędkości obrotowej), czy też z magnetycznymi potrajaczami i mnożnikami częstotliwości, pozwalającymi uzyskiwać wielokrotności prędkości synchronicznej. Ciekawostką jest, że idea integrowania obwodów magnetycznych silników indukcyjnych z obwodami magnetycznymi mnożników częstotliwości była jeszcze badana i rozwijana w końcu ubiegłego wieku. Innym

pomysłem były silniki 2- i wielobiegunowe, wyposażone w uzwojenia przełączalne (powszechnie stosowane rozwiązanie to uzwojenie Dahlandera), pozwalające uzyskiwać podwielokrotności prędkości synchronicznej.

Inną ważną drogą rozwoju napędów asynchronicznych było przekształcenie silnika klatkowego w silnik pierścieniowy (zastąpienie uzwojenia klatkowego rozłożonym uzwojeniem trójfazowym) i wyposażenia tak zmodyfikowanej konstrukcji w pierścienie ślizgowe (ze szczotkami), pozwalające na dostęp do „wnętrza” maszyny i galwaniczne „komunikowanie się” z uzwojeniem wirnika. Skutkiem przyjęcia takiego rozwiązania możliwe stało się włączenie do wirnika dodatkowych rezystancji, dodatkowego źródła napięcia (maszyny zasilane 2- stronnie, silniki Schrage-Richtera), bądź też tworzenia kaskadowych układów napędowych (np. kaskada Leblanca, czy też Scherbiusa). Były to często bardzo złożone układy, świadczące o dużej wyobraźni konstruktorów i ich wielkiej pomysłowości.

Rozwój energoelektroniki to dla maszyn indukcyjnych początek zupełnie nowej ery oraz początek dynamicznego i trwającego nieprzerwanie od ponad pół wieku rozwoju energoelektronicznych układów zasilania i sterowania, pozwalających na dowolne kształtowanie przebiegu napięcia i częstotliwości na zaciskach maszyny (z wykorzystaniem przetwarzania analogowego, bądź cyfrowego). Postęp znajduje swój wyraz w tworzeniu nowych elementów półprzewodnikowych (zaworów niesterowanych lub sterowanych), proponowaniu nowych topologii i struktur układów sterowania oraz opracowywaniu nowatorskich algorytmów sterowania.

Olbrzymie znaczenie dla rozwoju nowoczesnych i „inteligentnych” układów napędowych ma rozwój techniki mikroprocesorowej i technologii informatycznych, decydujących o mocach obliczeniowych oraz szybkości działania jednostki sterującej (zbieranie, archiwizowanie i przetwarzanie danych), jak też – techniki pomiarowej i sensoryki, pozwalającej na bieżące śledzenie zachowania się układów w czasie rzeczywistym.

Do jednej z najbardziej zaawansowanych metod sterowania wektorowego silników indukcyjnych należy metoda bezpośredniego sterowania momentem i strumieniem DTC. Autor skupił szczególną uwagę na metodzie DTC-ST i postawił sobie za cel jej udoskonalenie poprzez ograniczenie składowej przemiennej w przebiegu czasowym momentu elektromagnetycznego. Korzyści, związanych z jej praktycznym zastosowaniem, upatruje przede wszystkim w napędach trakcji elektrycznej.

Spójrzmy teraz na sposób rozwiązania problemu przez Autora oraz proponowaną i stosowaną przez Niego metodę badawczą. Autor decyduje się na realizację szerokiego programu badań

symulacyjnych, bazującego na profesjonalnym pakiecie demonstracyjnym, zawartym w bibliotece programu MATLAB/SIMULINK. Ten sposób podejścia do metodologii rozwiązania problemu wymaga również komentarza oraz spojrzenia na kontekst historyczny.

Rozwój techniki komputerowej, której początki przypadają na okres II wojny światowej, zaważył w istotny sposób na sposobie realizacji zadań inżynierskich, a zwłaszcza – na metodologii projektowania. Pierwsze komputery oferowały znaczne ułatwienie i przyspieszenie prowadzonych obliczeń, stąd też pierwsze opracowywane komputerowe programy projektowania były naśladownictwem obliczeń manualnych (modnym i popularnym językiem programowania był FORTRAN), a najistotniejszą korzyścią, wynikającą z zastosowania komputerów była daleko idąca możliwość przyspieszenia obliczeń oraz możliwość wykonania znacznie większej liczby iteracji w zamkniętych (warunkowych) pętlach obliczeniowych, sięgających nieraz kilkuset, a nawet kilku tysięcy wariantów (w obliczeniach manualnych tych pętli było zazwyczaj kilka lub kilkanaście). Dobrym przykładem są programy komputerowe do projektowania silników indukcyjnych klatkowych, które powstawały w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie (prof. T. Śliwiński, T. Pustała, R. Zapaśnik), w OBRME „KOMEL” oraz biurach projektowych wielu fabryk maszyn elektrycznych np. FSMM „SILMA”, INDUKTA w Bielsku-Białej, CELMA w Cieszynie, czy też „BESEL w Brzegu.

Kolejnym znaczącym krokiem, wyznaczającym początek nowej „filozofii projektowania” było sprzęgnięcie algorytmów projektowania z matematycznymi algorytmami optymalizacji, a konsekwencją były programy, w których doświadczenie i intuicję projektanta zastępowała odpowiednio skonstruowana funkcja celu (nazywana czasem współczynnikiem jakości), decydująca o kolejnych zmianach wartości wybranych zmiennych konstrukcyjnych oraz o strategii poruszania się po zbiorze rozwiązań dopuszczalnych. Jeszcze inne spojrzenie na metodykę rozwiązywania problemów technicznych przyniósł dynamiczny rozwój metod sztucznej inteligencji (zapoczątkowany w latach 70-80 ubiegłego wieku), inspirowany rozwojem badań nad budową i funkcjonowaniem mózgu oraz próbami zrozumienia i opisanie długofalowych procesów biologicznych. Skutkiem pogłębiania tej wiedzy są narodziny nowatorskich teorii: sieci neuronowych, zbiorów rozmytych, czy też algorytmów ewolucyjnych i genetycznych. Teorie te wyzwalały projektanta z konieczności żmudnego budowania modelu obiektu w postaci matematycznej i pozwalają na zastąpienie działań matematycznych o charakterze analitycznym - procesem trenowania „inteligentnych struktur”.

I wreszcie kolejny (a z pewnością – nie ostatni) etap, który wiąże się z niebywałym i wcześniej trudnym do wyobrażenia rozwojem technologii informatycznych i grafiki komputerowej. Spektakularnym objawem tego postępu stała się możliwość (wpierw 2- wymiarowej, a następnie 3-wymiarowej) wizualizacji obiektów oraz animacji różnorodnych zachowań i stanów tych obiektów, pozwalająca na przeniesienie projektanta ze świata laboratoryjnych badań realnych fizycznych prototypów w przestrzeń wirtualną. Konsekwencją tego kierunku rozwoju IT są metody szybkiego prototypowania, wyzwalamy projektanta z konieczności żmudnego budowania prototypów, jak też powodujące, że na rynku usług projektowych opłacalne stało się projektowanie już nie tylko krótkich serii, ale nawet pojedynczych egzemplarzy i wyrobów jednostkowych. Ważnym wsparciem dla metod szybkiego prototypowania stały się uniwersalne programy do łatwej i szybkiej budowy modeli „czegokolwiek”, niezależnie od natury fizycznej obiektów, jak też obszerne biblioteki, obejmujące gotowe już „wirtualne modele” praktycznie wszystkich obiektów i systemów technicznych, które możemy odnaleźć w otaczającej nas rzeczywistości. Autor rozprawy doktorskiej sięgnął do biblioteki programu MATLAB/SIMULINK i skorzystał z gotowego modelu komputerowego układu sterowania momentem i strumieniem silnika indukcyjnego, aby przeprowadzić badania swojej zmodyfikowanej metody sterowania, polegającej na zasilaniu 2-położeniowego falownika napięciem o wartości obniżonej, zmiennej w czasie (w klasycznej metodzie DTC napięcie to ma wartość stałą).

Tą zmodyfikowaną, proponowaną przez siebie metodę, Autor określa mianem metody sterowania DTM-DM. Oznaczenie to wprowadza po raz pierwszy na str. 25, ale nie wyjaśnia skrótu DM i nie proponuje dla tej metody terminu słownego. Metoda ta prowadzi do obniżenia poziomu tętnień w przebiegu czasowym momentu elektromagnetycznego, a Autor oczekuje, że skutkiem zastosowania tego układu w pojazdach trakcyjnych będzie poprawa niezawodności, zmniejszenie częstotliwości przeglądów, wydłużenie żywotności pojazdów i jego poszczególnych części (np. wałów i łożysk) oraz podniesienie bezpieczeństwa użytkowania pojazdu (str. 18 i 19).

Reasumując, tematykę pracy doktorskiej należy uznać za aktualną i nowoczesną, dobrze wpisującą się w aktualne trendy rozwoju układów sterowania maszynami indukcyjnymi poprzez rozwój nowych koncepcji i modyfikację metod istniejących.

W realizacji celu pracy Autor korzysta z nowej filozofii projektowania, polegającej na szybkim prototypowaniu układów, bądź algorytmów sterowania przy wykorzystaniu bibliotek profesjonalnych programów, zawierających gotowe modele komputerowe systemów technicznych.

## 2. Cel i teza pracy

Rozdział związany ze sformułowaniem tezy, nie jest wyodrębniony i wkomponowany jest w rozdział 2 „Cel i zakres pracy” (str. 18-24). Teza pracy została przedstawiona na str. 21 rozprawy i brzmi: *„istnieje możliwość ograniczenia składowej przemiennej momentu elektromagnetycznego dla metody DTC poprzez odpowiednie dostosowanie napięcia zasilania falownika dwupoziomowego”*.

Z inżynierskiego punktu widzenia oraz punktu widzenia ewentualnych użytkowników celowe byłoby dodanie informacji o właściwościach eksploatacyjnych, cechach lub wielkościach, które muszą być zachowane w zmodyfikowanym rozwiązaniu lub też podanie wartości granicznych (minimalnych i maksymalnych), które nie mogą być przekroczone w wyniku modyfikacji. Z punktu widzenia teorii optymalizacji, bądź też jakichkolwiek innych działań innowacyjnych, prowadzących do udoskonalenia lub usprawnienia systemu, założenia te składają się na układ równań lub nierówności, wyznaczających zbiór rozwiązań dopuszczalnych (zdefiniowany poprzez funkcje ograniczeń).

Uwaga ta nabiera szczególnego znaczenia w kontekście zdania, przytoczonego przez samego doktoranta, a zaczerpniętego z monografii profesora Andrzeja Sikorskiego (str. 162), która brzmi: *„stąd zwykle polepszenie jednych właściwości odbywa się kosztem pogorszenia innych”*.

Istotne dla realizacji tezy założenie konstrukcyjne, mówiące o tym, że Autor będzie unikał zmiany struktury wewnętrznej układu sterowania DTC oraz zmiany nastaw regulatorów Autor umieścił we wcześniejszym rozdziale 1.1.9 na str. 18. Lepiej byłoby nadać mu charakter komentarza do tezy i umieścić zaraz po tezie.

Wstępnemu omówieniu zakresu pracy Autor poświęca częściowo rozdz. 2 oraz rozdz. 3, któremu nadaje tytuł: „Konstrukcja pracy” (lepiej brzmiący nagłówek to „Plan pracy”).

Odnosnie do rozdziału wstępnego 1.1.8 (str. 14-18), mówiącego o negatywnym wpływie tętnień na kanał przenoszenia mocy od silnika do koła w metodzie DTC, to podkreślić należy przejrzysty i wyczerpujący opis zachodzących zjawisk fizycznych, świadczący o zrozumieniu przez Doktoranta istoty tych zjawisk i o umiejętności interpretowania procesów fizycznych. Myślę jednak, że cennym uzupełnieniem tej części pracy byłby (choćby uproszczony) model matematyczny układu mechanicznego: „wał silnika – koło” zbudowany np. w programie MATLAB/SIMULINK.

### 3. Charakterystyka pracy, osiągnięcia Aurora oraz uwagi krytyczne i dyskusyjne.

Rozdział 4. pracy ma charakter przeglądowny i jest poświęcony charakterystyce metod sterowania wektorowego silników indukcyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem metody DTC. Bazuje na publikacjach autorów polskich, głównie z ośrodków: warszawskiego, białostockiego, wrocławskiego i gdańskiego. Autor potwierdza dobrą znajomość literatury przedmiotu, jak też umiejętność przejrzystego opisu budowy oraz zasad działania różnych układów energoelektronicznych. Wytknąć należy natomiast Doktorantowi brak strzałek kierunkowości dla kątów na poszczególnych rysunkach (na rys. 12 widnieje strzałka dwukierunkowa), a właśnie przyjęcie strzałek kierunkowości dla kątów oraz strzałek kierunkowości dla momentów i prędkości (str. 42) decyduje o znakach + lub - w przedstawionych wzorach (np. (9), (10)). Konieczne też jest przyjęcie rozłożenia przestrzennego faz stojana A,B,C (rys. 8), albowiem ten sam wirujący wektor przestrzenny napięcia stojana (rys. 9) może wytworzyć wektor przestrzenny strumienia skojarzonego wirującego zgodnie lub też przeciwnie do ruchu wskazówek zegara w zależności od następnstwa osi faz. Odnośnie do przyjętych założeń upraszczających dla modelu silnika indukcyjnego (str. 23, 24 oraz str. 40 i 41), to niefortunnie opisano monoharmoniczność rozkładu przestrzennego przepływu uzwojeń maszyny słowami: „*rozłożenie przestrzenne uzwojenia stojana i wirnika maszyny asynchronicznej zastępuje się uzwojeniami skupionymi*”. Uzwojenia w przyjętym modelu maszyny mają bowiem rozłożenie przestrzenne sinusoidalne, odpowiadające tzw. łusce prądowej. Stąd też w przyjętym modelu tzw. składowa zerowa (1,1,1) nie wytwarza pola magnetycznego, gdy tymczasem w maszynie rzeczywistej może prowadzić do powstania strumienia magnetycznego 3 harmonicznej przestrzennej o charakterze pola przemiennego (pulsującego). Wzór na przekładnię prądową stojan-wirnik na str. 41 należy uzupełnić o współczynnik sprowadzający, związany z różną liczbą uzwojeń fazowych stojana i wirnika.

Kluczowe znaczenie dla rozprawy doktorskiej mają rozdziały 5 i 6, w których Autor prezentuje istotę proponowanej przez siebie metody ograniczania składowej przemiennego momentu elektromagnetycznego polegającej na obniżaniu i odpowiednim dostosowywaniu wartości napięcia zasilania falownika dwupoziomowego. Autor wskazuje, że inspiracją dla jego pomysłu były publikacje, wskazujące na możliwość redukcji tętnień momentu poprzez redukcję czasu przełączeń i wprowadzenie tzw. współczynnika wypełnienia („duty ratio”), prezentowane w literaturze w odniesieniu do algorytmów sterowania, bazujących na algorytmach logiki rozmytej. W rozdz. 6 szczegółowo rozwija proponowaną przez siebie

koncepcję obniżania napięcia wejściowego na zaciskach falownika, a następnie przedstawia wyniki badań symulacyjnych maszyny indukcyjnej sterowanej klasyczną metodą DTC oraz metodą zmodyfikowaną przez Autora.

Przykładowe przebiegi czasowe obniżonego napięcia (uzyskane w rozważanych symulacjach) prezentuje na rys. 54 (str. 123). Autor zdaje sobie sprawę, że obniżone napięcie będzie pogarszało właściwości dynamiczne systemu napędowego, jak też może powodować trudności z uzyskaniem zadanej wartości momentu maszyny (uchyb momentu). Temu, jak poradzić sobie z tym problemem poświęca rozdział 6, proponując układ detekcji umożliwiający wykrycie zmiany momentu zadanego (str. 95, rys. 40), a następnie w kolejnym rozdziale (rozd. 6.4) testuje współdziałanie proponowanego układu sterowania z proponowanym układem detekcji (rysunki 47, 50). Zasadnicze znaczenie dla rozprawy doktorskiej mają wyniki badań symulacyjnych zrealizowanych przy pomocy programu zawartego w bibliotece Sim Power Systems/Demos/Electric Drive Models (szczegółowe dane podano na str. 74). Wyniki badań symulacyjnych obejmują przebiegi czasowe: momentu elektromagnetycznego, prędkości obrotowej, prądów fazowych i strumienia magnetycznego, jak też trajektorie (hodografy) wektora przestrzennego prądu, napięcia i strumienia magnetycznego na zespolonej płaszczyźnie dq.

Uzyskane wyniki Autor poddał szczegółowej analizie, ukierunkowanej na wykrycie minimalnych i maksymalnych wartości momentu elektromagnetycznego (rys. 65-71). Porównania wyników badań symulacyjnych pracy maszyn indukcyjnych, sterowanych metodą DTC-ST oraz autorską metodą DTC-MD, dokonano w rozdz. 6.4.3.

Autor w sposób przekonujący pokazuje, że udało mu się uzyskać założony cel, a mianowicie doprowadzić do zmniejszenia składowej przemiennej (tętnień) w przebiegu czasowym momentu elektromagnetycznego. Wniosek ten wynika z porównania wyników liczbowych, zawartych w Tab. 7 (proponowana metoda DTC-MD) oraz w tab. 8 (klasyczna metoda DTC-ST). Porównania wielkości tętnień w wartościach procentowych dokonuje na str. 168-169.

Moim zdaniem niezbędne jest pogłębienie analizy wyników badań symulacyjnych o inne istotne właściwości eksploatacyjne, charakteryzujące pracę maszyn indukcyjnych, jak też odniesienie uzyskanych wyników badań symulacyjnych do danych znamionowych i katalogowych silnika oraz do jego charakterystyk naturalnych. Każdy obiekt techniczny jest bowiem zaprojektowany na określone warunki pracy i posiada określone dane znamionowe, a stale rozwijanie i wciąż doskonalone metody sterowania i zarządzania systemami są ukierunkowane na wyzyskanie ich potencjalnych możliwości przy zachowaniu jednak

wszystkich ograniczeń elektrycznych, mechanicznych i cieplnych, gwarantujących bezpieczną pracę, brak awarii, założoną żywotność i ekonomiczne użytkowanie.

Dla prowadzonych badań symulacyjnych Autor wybrał przykładowy stan nieustalony, pokazany na rys. 17 (str. 70) reprezentatywny dla jego rozważań i eksponujący zalety jego metody. W trakcie realizacji zadanego programu pracy maszyna indukcyjna 3-krotnie dochodzi do stanu „praktycznie” ustalonego. Istotne jest jednak to, aby uzyskane wartości wielkości eksploatacyjnych wyrazić nie tylko w liczbach bezwzględnych, ale również w odniesieniu do danych znamionowych (w wartościach względnych lub procentowych) i pokazać dobitny sposób, że nie zostały przekroczone żadne ograniczenia, związane z budową maszyny i jej danymi znamionowymi. Konieczne jest również znalezienie i wyraziste wyartykułowanie odpowiedzi na stwierdzenie (które Autor powtarza za profesorem Andrzejem Sikorskim na str. 162), że *„polepszenie jednych właściwości odbywa się kosztem pogorszenia innych”*. Według mego doświadczenia odpowiedzią będzie wyznaczenie wartości poślizgu dla 3 stanów ustalonych (wchodzących w skład rozważanego przykładowego programu pracy układu napędowego dla obu rozważanych i porównywanych metod: klasycznej metody DTC-ST oraz proponowanej przez Autora metody DTC-MD. Wymaga to określenia prędkości synchronicznej maszyny poprzez wyznaczenie częstotliwości pierwszej harmonicznej czasowej prądu stojana (transformacja FFT) oraz średniej prędkości mechanicznej wirnika. Porównanie wartości poślizgu dla tych trzech stanów ustalonych w obu metodach ma istotne znaczenie, albowiem wartość poślizgu decyduje o mocy elektrycznej traconej na rezystancjach wirnika i pośrednio o sprawności przemiany elektromechanicznej.

Jak już wspomniano, Autor przyjął na stronach 23, 24, 40 i 41 założenia upraszczające dla modelu analizowanego silnika indukcyjnego oraz falownika dwupoziomowego. Niezbędna jest – w moim przekonaniu - dyskusja założeń upraszczających i próba oszacowania tego, jak rezygnacja z założeń upraszczających może wpłynąć na wyniki badań symulacyjnych, a wreszcie na zachowanie się i pracę systemu rzeczywistego. Najistotniejsze założenia upraszczające dotyczyły: liniowości obwodu magnetycznego silnika, nieuwzględniania strat w żelazie maszyny, monoharmoniczności pola magnetycznego, braku wypierania prądu w wirniku, pomijania strat mechanicznych i luzów w przekładniach mechanicznych, nieuwzględnienia niepewności pomiaru, oraz bezstratnej pracy zaworów energoelektronicznych (kluczy) itd.



Konieczna jest dyskusja tych założeń, choć ostateczną odpowiedź na powyższe pytania przynieść może dopiero weryfikacja pomiarowa i badania laboratoryjne rzeczywistego systemu.

#### **4. Redakcja pracy**

Praca jest obszerna i obejmuje 177 stron oraz załączniki w liczbie 15 stron. Autor przedstawia i prowadzi swoje wywody w sposób logiczny i przejrzysty. Zwraca uwagę bogaty materiał ilustracyjny, obejmujący m.in. schematy zastępcze, struktury topologiczne, charakterystyki czasowe, trajektorie wektorów przestrzennych, wykresy wskazane, schematy blokowe itd. W moim ogólnym odczuciu Autor całkiem dobrze operuje technicznym językiem polskim, choć w dalszej karierze naukowej musi zwrócić większą uwagę na doskonalenie języka i staranność terminologii.

#### **Uwagi dot. redakcji pracy**

Autor, korzystając z różnych źródeł literaturowych, nie ujednolica nazw oraz oznaczeń wielkości fizycznych i parametrów. Również przy wprowadzaniu własnych oznaczeń pozostaje często w niezgodzie z Polskimi Normami (PN), czy też powszechnie stosowanymi oznaczeniami, co powoduje, że system oznaczeń jest niespójny. Celowe byłoby:

- przyjęcie indeksu  $s$  (dla wielkości fizycznych i parametrów związanych ze stojanem „stator”) oraz indeksu  $r$  (dla wielkości fizycznych i parametrów związanych z wirnikiem „rotor”),
- przyjęcie oznaczenia  $T$  dla momentu elektromagnetycznego ( $T_e$ ) i momentu mechanicznego ( $T_m$ ),
- wprowadzenie nazwy „wektor przestrzenny” (space vektor) prądu, napięcia czy też strumienia skojarzonego (inne terminy stosowane przez różnych autorów to: kompleksor, wektor uogólniony oraz wektor 2-osiowy),
- posługiwanie się terminem „sprowadzenie wielkości na stronę stojana” (a nie – „przeliczenie”),
- wprowadzenie terminu długość wektora prądu/napięcia (lub też: wartość bezwzględna, moduł, norma), a nie posługiwanie się terminem „wartość wektora”,

- przyjęcie zasady podawania najpierw pełnej nazwy wektora, a potem dopiero jego oznaczenia np. wektor przestrzenny strumienia skojarzonego stojana  $\psi_s$  (a nie: wektor  $\psi_s$  strumienia skojarzonego stojana),
- prezentowanie przebiegów czasowych w poszczególnych fazach systemu 3-fazowego przy zachowaniu tej samej skali,
- sparametryzowanie przebiegów czasowych hodografów wektorów przestrzennych poprzez naniesienie na trajektoriach: czasu, prędkości lub poślizgu.

### **Szczegółowe uwagi redakcyjne**

Niezgrabne terminy używane przez Autora lub drobne uchybienia redakcyjne to:

Str. 23 – „siły i momenty obrotowe przyłączone są ....”

Str. 33 – „ideowy falownik trójfazowy” (powinno być: wyidealizowany falownik lub rysunek ideowy falownika)

Str. 38 – błędny opis wektorów zerowych na rys. 38

Str. 39 – „odpowiedź chwilowa na wymienione zapytania”

Str. 44, 45 – „zmiana rozwartości kąta jest niejednoznaczna”

Str. 52/53 „kąta strumienia stojana”

Str. 74 rys. 2.1 „przebieg prądów” (powinno być: przebiegi czasowe prądów)

Str. 75,76, 95 – rysunki 22, 23 i 40 są odwrócone

Str. 96 „prawował” (powinno być: pracował)

Str. 98 „porównajmy maszynę pracującą w stanie niedynamicznym”

Str. 99 „układ ... ma wykonywać maksymalną pracę”

Str. 100 „grono pojazdów trakcyjnych”

Str. 120 „wartości parametrów symulacji pozostały niezmiennicze”

### **Bibliografia**

Odnosnie do bibliografii, to obejmuje ona 34 pozycje (str. 174-177). Dobór literatury jest trafny i uwzględnia pozycje naukowe z ostatnich lat. Wykaz literatury wymaga ujednoczenia opisu poszczególnych pozycji, jak też uporządkowania ich następstwa wg kolejności alfabetycznej lub chronologicznej.

## **5. Wniosek końcowy**

Temat pracy dotyczy aktualnej i nowoczesnej problematyki, ważnej zarówno z punktu widzenia teoretycznego, jak i możliwych zastosowań praktycznych, zwłaszcza w trakcji elektrycznej.

Autor odwiódł umiejętności oryginalnego myślenia i inżynierskiej pomysłowości, proponując koncepcję modyfikacji metody sterowania silników indukcyjnych DTC. Pokazał się, że posiada odpowiednią wiedzę z zakresu elektrotechniki, a zwłaszcza energoelektroniki, napędu elektrycznego i automatyki przemysłowej. Dowiódł umiejętności posługiwania się nowoczesnymi środkami obliczeniowymi, a zwłaszcza metodologią badań symulacyjnych i szybkiego prototypowania układów sterowania. Jego warsztat badawczy jest bogaty i właściwy dla kandydata do stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

**Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że w moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr inż. Marka Dudzika spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zawarte w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. i wnioskuję do Rady Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej o dopuszczenie mgr inż. Marka Dudzika do publicznej obrony.**