

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Zawarczyńskiego: „Analiza układów sterowania momentem i prędkością kątową falownikowego napędu pompy”

1 Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie umowy z Politechniką Świętokrzyską reprezentowaną przez Rektora prof. dr hab. inż. Zbigniewa Korubę w związku z Uchwałą Nr 36/2020 Senatu Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 28 października 2020 roku w sprawie wyznaczenia recenzentów, egzaminów doktorskich oraz powołania składu komisji egzaminacyjnych w przewodzie doktorskim mgr inż. Łukasza Adama Zawarczyńskiego. Recenzowana praca powstała na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki na Politechnice Świętokrzyskiej pod kierownictwem dr hab. inż. Tadeusza Stefańskiego, prof. PŚk. Liczy ona w sumie 258 stron, gdzie 11 stron zawiera literaturę, a 39 stron mieści szczegółowe dodatki.

2 Teza naukowa i zakres pracy

Na stronie 19 Autor formułuje zasadniczy cel rozprawy jako:

Opracowanie elektrohydraulicznego układu objętościowego sterowania przepływem i ciśnieniem z falownikowym napędem pompy o stałej objętości geometrycznej o własnościach dynamicznych i statycznych zbliżonych do układu sterowania dławieniowego.

Problem ujęty w celu pracy jest obszerny, skomplikowany i interdyscyplinarny. Co więcej, wykazuje wzajemne zależności wewnętrzne. Rozwiązanie wymagało podejścia wielokryterialnego. Aby zachować porządek i jednocześnie nie uchybić któremukolwiek aspektowi, Autor przy formułowaniu tezy pracy dokonał wyodrębnienia czterech najważniejszych podobszarów wymagających udowodnienia z zachowaniem kolejności następowania jednego po drugim:

1. *Identyfikowane parametry modeli matematycznych analizowanych silników elektrycznych zasilanych z falownika, w sposób istotny zależą od warunków zasilania i obciążenia, a także od zastosowanego planu eksperymentu i sygnału pobudzającego.*
2. *Poprawę wskaźników jakości sterowania uzyska się uwzględniając wpływ warunków zasilania i obciążenia silników na wartości parametrów jego modeli matematycznych, np. poprzez zastosowanie sterowania z otwartą pętlą adaptacji.*
3. *Możliwe jest zrealizowanie układu sterowania objętościowego z pompą o stałej objętości geometrycznej o własnościach dynamicznych i statycznych porównywalnych z układem sterowania dławieniowego.*
4. *Możliwe jest podwyższenie sprawności napędu hydraulicznego z pompą o stałej wydajności geometrycznej poprzez odpowiedni wybór silnika elektrycznego oraz metody sterowania prędkością lub momentem.*

Udowodnienie tak sformułowanej tezy pracy wymagało podjęcia szeregu działań naukowych. W tym celu Autor założył następujący układ pracy:

- w rozdziale pierwszym naszkicował koncepcję badanego układu urządzeń, osadził ją w konkretnych obszarach zastosowań, przedstawił znane i stosowane rozwiązania towarzyszące aspektowi obranemu za cel pracy,
- rozdział drugi poświęcił analizie dynamiki silników o zbliżonej mocy (asynchronicznego IM oraz synchronicznych BLDC i PMSM) w otwartym układzie sterowania, gdzie dokonał ewaluacji ich cech takich jak dynamika prędkości podczas rozruchu, sprawność oraz przeciążalność momentem,
- w rozdziale trzecim dokonał obszernej identyfikacji parametrycznej modeli matematycznych rozpatrywanych silników; przedstawił wyniki estymacji parametrów dla liniowych i nieliniowych modeli wybranych silników,
- w rozdziale czwartym dokonał szczegółowej analizy układów regulacji prędkości kątowej silników, gdzie przedstawił obszerne wyniki symulacyjne i zestawiał je z rezultatami uzyskanymi w laboratorium,
- w rozdziale piątym przeprowadził analizę układów regulacji momentu wybranych silników; podobnie jak w poprzednim rozdziale – tu również zrealizował serie badań laboratoryjnych oraz symulacyjnych,
- w rozdziale szóstym przybliżył zagadnienia regulacji przepływu w układzie elektrohydraulicznym, gdzie czytelnik miał szansę zaznajomienia z tematyką układów sterowania objętościowego i sterowania dławieniowego, Autor zestawiał ich modele matematyczne i wykonał identyfikację parametryczną oraz porównał sprawność obu układów,

- w rozdziale siódmym przeanalizował układy regulacji ciśnienia, koncentrując uwagę na przypadkach, gdy w układach elektrohydraulicznych zachodzi konieczność sterowania momentem elementu wykonawczego,
- w rozdziale ósmym podsumował zgromadzone wyniki badań oraz zrewidował uzyskane rezultaty pod kątem pytań postawionych w tezie pracy,
- na sam koniec zrelacjonował swój warsztat badawczy, w tym stanowiska laboratoryjnego, szczegółowo opisał urządzenia oraz omówił aspekty towarzyszące realizacji eksperymentów.

3 Aktualność i wartość merytoryczna tematyki

Przedmiot rozprawy łączy w sobie elementy różnych obszarów naukowych i inżynierskich. Stanowi obszerne i wielopłaszczyznowe połączenie zagadnień z zakresu elektrotechniki, elektroniki, mechaniki, matematyki i informatyki. Osadzony jest w niezwykle popularnym obszarze zainteresowań, jako że dotyczy powszechnego komponentu składowego większości maszyn i urządzeń towarzyszących wszystkim aspektom życiowym. Spektrum zastosowań jest tak szerokie, że obejmuje obszar od gospodarstwa domowego aż po przemysł zbrojeniowy.

Interdyscyplinarność i popularność zagadnienia dopełniają przede wszystkim jego zastosowania przemysłowe. Problematyka i teza wywodzą się z już istniejących rozwiązań i stawiają wymagania wobec następnych. Taka dwukierunkowość jest niezwykle atrakcyjna pod względem naukowym. Istniejące rozwiązania oferują cały wachlarz dotychczasowych doświadczeń i jednocześnie konstruuje listę wymagań na przyszłość. W zamian oferują dostęp do danych pomiarowych dla celów symulacyjnych i koncepcyjnych, a następnie weryfikację i analizę porównawczą z nowo zaproponowanymi rozwiązaniami.

Badania podjęte w rozprawie uwzględniają jeszcze jedną niezwykle ważną i aktualną kwestię jaką jest redukcja zapotrzebowania na energię. Promocja a jednocześnie presja na podejmowanie działań proekologicznych, w tym eliminację strat energii i ograniczanie emisji są aktualnie jednym z fundamentalnych aspektów we wszystkich obszarach i sferach ludzkiej egzystencji. Tym samym prowadzenie badań i analiz zmierzających do optymalizacji pracy układów przetwarzających energię (w dowolnej postaci) wydaje się być szczególnie celowe i uzasadnione.

Odnosząc się do kwestii merytorycznych podniesionych w pracy należy stwierdzić, że układy elektrohydrauliczne mają szerokie zastosowanie przemysłowe, głównie jako układy regulacji położenia i prędkości elementu wykonawczego.

Rozwój układów wykonawczych należy kojarzyć z rozwojem teorii sterowania i układów automatycznej regulacji czyli w przybliżeniu XIX wiek, kiedy to następowały wyraźne zmiany w tej dziedzinie. Początkowo wszelkiego rodzaju badania i zastosowania układów regulacji miały charakter empiryczny. Zauważalny skok a następnie dynamiczny rozwój układów wykonawczych nastąpił podczas

II Wojny Światowej. Wtedy opracowano wiele nowych technologii w zakresie stosowanych materiałów, jak również zaczęto wykorzystywać podzespoły elektroniczne. Aktualnie realizowane prace nad układami wykonawczymi są wysoce zaawansowane co należy upatrywać z ogólnoświatowym skokowym rozwojem technicznym i technologicznym. Związane są m.in. z wykorzystaniem w układach nowych materiałów, np. materiałów z pamięcią kształtu, materiałów magnetoreologicznych, nowych technologii związanych z układami cyfrowymi oraz nowymi, zintegrowanymi czujnikami pomiarowymi. Innym kierunkiem rozwoju układów wykonawczych jest zaimplementowanie w ich układach sterowania nowych, bardziej zaawansowanych metod sterowania, które nie były wcześniej stosowane ze względu na ograniczenia technologiczne (możliwości obliczeniowe). Jednak dynamiczny rozwój w tej dziedzinie spowodował, że sterowniki cyfrowe stały się układami o stosunkowo dużej mocy obliczeniowej zdolnej do realizacji złożonych algorytmów sterowania i znajdują obecnie coraz szersze zastosowanie. Stosowane obecnie nowe technologie mają na celu poprawienie właściwości statycznych i dynamicznych układów wykonawczych oraz ich niezawodności. Niniejsza rozprawa stanowi obszerny i ambitny krok w tym kierunku.

Zaletą układów elektrohydraulicznych jest ich skuteczność. Precyzja działania jest zdecydowanie większa niż w przypadku standardowego (czystego) układu hydraulicznego, mechanicznego czy elektrycznego. Aktualnie w sterowaniu położeniem lub prędkością hydraulicznego elementu wykonawczego dominują dwa układy: dławieniowy i objętościowy. Obecnie najczęściej zmianę natężenia przepływu cieczy roboczej realizuje się poprzez zmianę prędkości obrotowej pompy, wykorzystując falownikowy układ napędowy. Powszechne jest również stosowanie układów sterowania typu load-sensing, które realizują ideę sterowania objętościowego, dopasowując parametry hydrauliczne układu do zmiennego obciążenia.

Do napędu pomp hydraulicznych najczęściej stosowane są indukcyjne silniki klatkowe (IM), ale stopniowo ustępujące miejsca silnikom synchronicznym ze wzbudzeniem od magnesów trwałych. Przyczynia się do tego zastosowanie mikroprocesorowych układów kontrolno-sterujących pozwala na implementację złożonych algorytmów sterowania, wykorzystujących bieżącą informację o sygnałach i parametrach obiektu sterowania. Algorytmy te wymagają stosowania skomplikowanych metod i technik pomiarowych lub algorytmów odtwarzających sygnały niemierzalne. W większości układów sterowania napędami falownikowymi jest niezbędny pomiar podstawowych wielkości fizycznych silnika, takich jak: położenie kątowne i prędkości kątowa wirnika, moment na wale, strumień oraz prąd i napięcie stojana. Obecnie coraz powszechniejsza staje się tendencja do minimalizacji liczby informacji otrzymywanych za pomocą bezpośrednich pomiarów, poprzez zastosowanie estymacji sygnałów.

W sterowaniu falownikowymi napędami z silnikami prądu przemiennego najczęściej są stosowane metody, których realizacja wymaga aktualnej informacji o położeniu wektora strumienia skojarzonego wirnika (ewentualnie strumienia stojana lub strumienia głównego) w przestrzeni wektorowej. Bezpośredni pomiar strumienia jest dokonywany za pomocą czujników hallotronowych (delikatne i

temperaturowo wrażliwe) lub specjalnych uzwojeń pomiarowych (preferowane w rozwiązaniach przemysłowych). Obecnie większość rozwiązań układów sterowania bazuje na odtwarzaniu strumienia za pomocą estymatorów (ang. open-loop observers) lub obserwatorów działających w układzie zamkniętym (ang. closed-loop observers). Moment silnika jest wyznaczany w sposób pośredni (z pomiaru mocy i prędkości kątovej silnika) lub jak ma to miejsce coraz częściej za pomocą bezpośredniego pomiaru. Uzyskanie pożądanych właściwości regulacyjnych prędkości kątovej lub momentu silnika wymaga odpowiednich nastaw parametrów regulatorów. Określenie ich wartości jest aktualnie dokonywane na podstawie identyfikacji parametrycznej bądź nieparametrycznej modelu matematycznego silnika wraz z obciążeniem.

Jako, że napęd falownikowy pompy jest eksploatowany w zmiennych warunkach zasilania i obciążenia (zmiany częstotliwości i napięcia stojana, momentu obciążenia i temperatury uzwojeń), zmianie ulegają właściwości statyczne i dynamiczne silnika, a przy niewłaściwej strukturze układu sterowania – także napędu falownikowego. Wymienione czynniki wpływają na charakter stanu nieustalonego i ustalonego silnika, a więc także na wartości identyfikowanych parametrów jego modelu matematycznego. Modele matematyczne silników elektrycznych są często układem nieliniowych równań różniczkowych. Szczególnie trudnym problemem jest identyfikacja parametryczna tych modeli w czasie rzeczywistym. Obecnie stosowane komputerowe algorytmy umożliwiają identyfikację z dużą dokładnością. W realizacji eksperymentów identyfikacyjnych modelu matematycznego silnika zwraca się aktualnie bardzo dużą uwagę na odwzorowanie warunków eksploatacji napędu do rzeczywistych, faktycznie występującego w czasie eksploatacji napędu. Dużą uwagę poświęca się wyborowi sygnału pobudzającego istotnie wpływającemu na wyniki identyfikacji.

Spośród znanych metod, bazujących na przetwarzaniu danych pomiarowych sygnałów wejściowych i wyjściowych, jedynie metody optymalizacji statycznej spełniają warunki do przeprowadzenia efektywnej identyfikacji. Liczne publikacje dowodzą, że takie podejście gwarantuje możliwość wyboru dowolnego rodzaju sygnału pobudzającego obiekt, zastosowania eksperymentu czynnego lub biernego, wyboru dowolnej postaci modelu matematycznego i minimalizowanej funkcji.

W zakresie metod sterowania silnikami aktualnie wymieniane są metody: skalarna, bezpośredniego sterowania strumieniem i momentem silnika indukcyjnego (DTC, ang. Direct Torque Control) oraz polowozorientowaną (FOC, ang. Field-Oriented Control) dla silników IM i PMSM. W przypadku silnika BLDC najczęściej stosowanym algorytmem sterowania tzw. algorytm klasyczny (cykliczne przełączanie tranzystorów falownika, wynikające z położenia wirnika). Wymienione metody sterowania zapewniają praktycznie bezinercyjne sterowanie momentem, a regulację prędkości kątovej o zbliżonym czasie regulacji. Najprostszą strukturę oraz najmniejsze wymagania pomiarowe posiada metoda skalarna. Do jej realizacji niezbędny jest tylko pomiar (lub estymacja, np. za pomocą obserwatora) momentu (regulacja momentu) lub prędkości kątovej (regulacja prędkości). Metody DTC i FOC wymagają dodatkowo pomiaru lub estymacji strumienia

stojana lub wirnika oraz transformacji mierzonych wielkości silnika do układu współrzędnych zorientowanego zgodnie z wektorem pola.

Biorąc pod uwagę istotność i aktualność wybranej tematyki połączonych obszarów badawczych należy skonkludować podjęte badania za uzasadnione i rozwojowe.

4 Ocena metodologii badań i wyników

Geneza badań oparta jest na spostrzeżeniu faktu, że częściej, ze względu na stosunkowo prostą realizację i właściwości dynamiczne, stosuje się sterowanie dławieniowe w układach elektrohydraulicznych, podczas gdy możliwe jest, biorąc pod uwagę długotrwały aspekt ekonomiczny, zastosowanie objętościowego sterowania przepływem i ciśnieniem. Metodologia badań jest prawidłowo ukierunkowana – głównie w stronę udowodnienia tezy pracy, gdzie Autor kieruje się zamiarem opracowania elektrohydraulicznego układu objętościowego sterowania przepływem i ciśnieniem z falownikowym napędem pompy o stałej objętości geometrycznej o właściwościach dynamicznych i statycznych zbliżonych do układu sterowania dławieniowego.

Każdy aspekt rozpatrywanego układu został starannie zbadany poczynając od analizy wybranych silników, przez ich modelowanie matematyczne, regulację prędkości kątowej oraz momentu, skończywszy na sterowaniu przepływem i ciśnieniem. Praca jest dobrze zorganizowana, zawiera logiczny porządek badań. Rozdziały kolejno odsłaniają zaplanowane w tezie pracy aspekty badanego układu. Początkowo występuje analiza silników, ich modeli matematycznych, następnie układów ich regulacji, po czym wyniki tych badań wykorzystywane są w dalszych, kluczowych rozdziałach. Autor bardzo szczegółowo relacjonuje swoje badania – niemalże każdy aspekt opisany jest z detalami, co umożliwia odtworzenie analiz. Rzetelność zrealizowanych badań i pomiarów potwierdzają opisy zamieszczone w dodatkach rozprawy. Godne uznania, moim zdaniem, jest zamieszczenie w pracy krytycznych komentarzy i przedstawienie mniej skutecznych prób przed wskazaniem ich bardziej korzystnych alternatyw (rozdział 3.3). Należy zwrócić również uwagę na niezwykle korzystny efekt uboczny towarzyszący realizacji pracy doktoranta – zbudowanie potężnego autorskiego stanowiska pozwalającego na realizację kolejnych dodatkowych badań, również przez innych badaczy.

Na uwagę w pracy przede wszystkim zasługuje znacząca ilość wkładu zawierającego oryginalne osiągnięcia Autora, które widoczne są nie tylko w tekście właściwym, ale również w dodatkach (schematy, oryginalne rozwiązania implementacyjne). Doceniam również dociekliwość Autora przy wyborze trudniejszych metod badań, procentujących w efekcie długofalowym – przykładowo zadania modelowania silników rozpatrzono przede wszystkim w taki sposób, aby oddawały sygnały wyjściowe w stanach nieustalonych zamiast skupić się na charakterystykach statycznych i częstotliwościowych.

Przedłożona praca zawiera wartościowy zasób wyników. Począwszy od rozdziałów 2-3 odnaleźć można wyniki złożonej analizy wybranych silników w zakresie przydatności do współpracy w układach elektrohydraulicznych sterowanych objętościowo. Analiza ta uzupełniona jest o szczegółowe rozpatrzenie możliwości sterowania tym silnikami, dla różnych warunków obciążenia i jednocześnie wykonana jest zarówno w aspekcie symulacyjnym jak i eksperymentalnym w odniesieniu do rzeczywistych obiektów. Katalog zgromadzonych wyników wykorzystywany jest w dalszych analizach (np. wyniki analiz modeli silników wykorzystano w rozdziałach opisujących analizę układów regulacji prędkości kątownej i momentu – rozdziały 4 i 5). Badania nie tylko można potraktować jako kompletne z perspektywy całego układu, ale jako trzy specjalistyczne analizy przeprowadzone dla odrębnych zagadnień silników, ich sterowania, skończywszy na samych układach elektrohydraulicznych branych pod uwagę całościowo. Niektóre z oryginalnych osiągnięć i wyników Autora ująć można następująco:

- przeprowadzenie analizy porównawczej silników IM, BLDC i PMSM oraz ich układów regulacji z perspektywy ich własności statycznych i dynamicznych,
- realizacja szerokiego zakresu badań modelowania matematycznego i symulacji, oraz weryfikacji tych badań w oparciu o pomiary w układzie rzeczywistym,
- wdrożenie oryginalnych rozwiązań zastosowanych w układzie, np. implementację układu sterowania silnikiem BLDC przy wykorzystaniu karty kontrolno-sterującej dSpace 1103,
- opracowanie metody sterowania prądem rozruchowym silnika BLDC (wykorzystując ograniczanie napięcia podczas rozruchu z zastosowaniem regulatora histerezy),
- dokonanie analizy porównawczej układów sterowania dławieniowego i objętościowego oraz wyciągnięcie oryginalnych wniosków udowadniających tezę.

Wspomniany wkład i oryginalne osiągnięcia świadczą o umiejętnościach mgr inż. Łukasza Zawarczyńskiego w zakresie samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Bogaty opis zrealizowanych badań świadczy o bardzo dobrej wiedzy teoretycznej Autora w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika.

5 Uwagi redakcyjne

Co do ogólnej postaci pracy i zorganizowania poszczególnych rozdziałów nie mam zastrzeżeń: zawierają wyczerpujące wstępy, prawidłowy opis wiedzy teoretycznej (co świadczy o dobrym zaznajomieniu Autora w tematyce), szczegółowy

opis wykonanych badań, co, gdzie konieczne, zostało prawidłowo poparte literaturą. Celowość każdego rozdziału i zasadniczy cel kolejnych badań został również wyjaśniony.

Jak w przypadku każdej pracy zauważyłem jedynie nieliczne błędy redakcyjne, składniowe, literówki oraz nasunęły się pewne wątpliwości natury redakcyjnej zestawione poniżej:

1. Strona 39: „Metody bazujące pomiarach”: brakuje wyrazu „na”,
2. Rozdział 5 zawiera podrozdział 5.3, a pod nim 5.3.1. Jest to jedyny podrozdział (tzn. nie występuje tu podrozdział 5.3.2), co może być mylące. W celu rozdzielenia pewnych sekcji proponuję stosowanie nienumerowanych sekcji, podobnie jak uczynił to Autor w przypadku podrozdziału 3.3.4.
3. W pracy występuje kilka przypadków powtórzonych akapitów, najczęściej są to pewne zdania występujące we wstępie i na początkach rozdziałów. Niepotrzebnie zwiększają one objętość pracy. W takich przypadkach proponowałbym bardziej ogólny opis we wstępie, a bardziej szczegółowy w poszczególnych rozdziałach.
4. Strona 166: niepotrzebny wyraz „one” w „Układy dławieniowe najczęściej znajdują one zastosowanie”.
5. Rys. A.7: tu prawdopodobnie brakuje słowa „obciążonego” w podpisie rysunku (str. 224),
6. W przypadku podawania wartości poszczególnych parametrów w tekście warto zachować formatowanie takie jak w równaniach, tzn. szczególnie dotyczy to spacji jak w przypadku $L_d = 0,00886 \text{ H}$ zamiast $L_d=0,00886 \text{ H}$ (strona 40).
7. Indeksy dolne w pracy pisane są często kursywą. W niektórych przypadkach może to być mylące, w szczególności gdy przyjmuje się pisanie wartości kursywą (nie tylko w równaniach), a czcionka regularna wykorzystywana jest do tekstu. Przykład: $V_{DC \max}$, gdzie DC powinno być pisane czcionką regularną, gdyż DC nie reprezentuje tu nawiązania do wartości. To samo stwierdzić można w przypadku L_r , gdzie wartość ta reprezentuje indukcyjność wirnika, a indeks dolny pochodzi od słowa „rotor”, a nie od zmiennej r . Co innego na przykład w przypadku v_q , gdzie q dotyczy współrzędnej – tu wykorzystano prawidłowy zapis.
8. Rys. 6.5: występuje tu nawiązanie „masą 10”. Tak samo przy rysunku 6.10 i innych. Jest to nawiązanie do strony 167, lecz w niektórych przypadkach może ono być mylące.
9. Podobna uwaga dotyczy nawiązania „na zaworze proporcjonalnym 16” w rozdziale 6 (na stronie 182), które wykorzystuje numerację, która nie została wprowadzona w tamtym rozdziale.

10. Kolejna podobna uwaga dotyczy odwołania na stronie 193: „skonfigurowanym układzie mierzono ciśnienie przetwornikiem 11”. Nie potrafiłem odnaleźć definicji „przetwornika 11” w innej części pracy.

Powyższe uwagi są wynikiem pewnych moim zdaniem drobnych błędów oraz niejasności, których nie sposób uniknąć w każdym dłuższym opracowaniu i uważam, że nie mają znaczącego wpływu na czytelność i zrozumienie opisów badań zamieszczonych w pracy.

6 Uwagi merytoryczne

Ogólnie pracę oceniam bardzo dobrze jak wspomniano w uwagach w rozdziale 4. Jednak jak w przypadku każdej pracy podczas lektury nasunęło się kilka uwag i pytań, do których oczekuję od Autora odpowiedzi lub komentarza:

1. Pierwsza uwaga jest ogólna, ale odniosę się do specyficznego przypadku. Rozumiem, że w pracy zawarty jest opis badań, które Autor również regularnie publikował w czasopismach naukowych i nie wszystkie zostały zawarte w pracy razem ze wszystkimi szczegółami. Autor jednak czasem odnosi się do rozważań na zasadzie możliwości przeprowadzenia analizy w pewien sposób po czym nie precyzuje czy podana możliwość została wykorzystana. Są to nieliczne przypadki, gdzie przykładem jest odniesienie do „otwartej pętli adaptacji”, o której przykładowo mowa na stronie 44. Czy została ona faktycznie zastosowana, czy Autor odnosi się jedynie do możliwości, którą należy uwzględnić w implementacji jeszcze bardziej złożonego układu regulacji?
2. Na stronie 38 Autor wspomina o „identyfikacji parametrów dyskretnego modelu matematycznego, a więc często konieczności ich przeliczania na parametry modelu ciągłego”. Dyskretny model matematyczny w takim przypadku jest pewnym udogodnieniem wynikającym z próbkowania lub zastosowania wybranej metody numerycznej do dalszych obliczeń, przy czym w dalszym ciągu parametry modelu mają te same znaczenia co w przypadku analizy ciągłej. Proszę o komentarz.
3. Podobna uwaga dotyczy wspomnianej przez autora „konieczności wyznaczania dużej liczby parametrów” (na tej samej stronie), Efektywne wyznaczanie parametrów w dużym stopniu uzależnione jest od metody optymalizacji i problem jest redukowany, gdy występuje dostęp do odpowiednich sygnałów i mamy możliwość oddzielania analizy dla poszczególnych elementów układu. Proszę o komentarz w jakich przypadkach wspomniany problem może być znaczący.
4. Mam pewne wątpliwości co do wzoru na stronie 44, tzn. z równań (3.10) oraz (w uproszczonej po pewnych założeniach postaci) (3.11). Aby występowała taka zależność musiałaby występować bezpośrednia relacja pomiędzy uzyskanymi według wybranego kryterium parametrami modelu, a danymi pomiarowymi (w tym przypadku – prędkości kątowej i momentu). Moim zdaniem taką

relację można wyprowadzić jedynie w uproszczonych przypadkach, gdzie kryterium jest dobrze znane oraz wykorzystano model liniowy (przykład: wyniki pomiarów traktowane jako wejściowe są przetworzone i umieszczone zgodnie z modelem w macierzy $\mathbf{X}$, a dane wyjściowe w wektorze $\mathbf{y}$ po czym zastosować można liniową metodę najmniejszych kwadratów i otrzymać parametry zgodnie ze wzorem $\mathbf{p} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X}) \mathbf{X}^T \mathbf{y}$). Proszę o komentarz.

5. Mam pytanie odnośnie równania (3.16) (ze strony 57), które dotyczy funkcji wielomianowych. Czy zostały one zastosowane w dalszej części pracy? Jeśli nie to jaką można by przyjąć ich wstępną postać lub metodę ich ewaluacji (np. przez interpolację)?
6. Jakie narzędzia wykorzystywał Autor do przeprowadzenia analiz estymacji (identyfikacji parametrów)? Autor wspomina o metodzie optymalizacji Boga, ale nie precyzuje wykorzystanej implementacji. Czy wspomnianą metodę zastosowano w środowisku obliczeniowym takim jak Matlab, Octave czy Mathematica, czy też implementację Autor wykonał sam w wybranym języku programowania?
7. Kolejna uwaga dotyczy rozbieżności parametrów modeli matematycznych silników w zależności od warunków zasilania i obciążenia. Oczywiście najwygodniejszym w zastosowaniu byłby model dostosowany do wspomnianych zmieniających się warunków, aby nie występowała konieczność estymacji parametrów przy każdorazowej ich zmianie. Jest zrozumiałe, że przy dobrym odzwierciedleniu kolejnych przypadków z osobna uzasadnione jest zastosowanie przedstawionych w pracy modeli; lecz przy trudniejszej analizie, którą wybrał Autor może warto spróbować zastosowania modeli fenomenologicznych. Sądzę, że Autor również zauważył taką możliwość, na przykład przy rozważeniu odwzorowania wykorzystując uproszczone równanie (3.15). Proszę o komentarz.
8. Podobnie jak w przypadku parametrów modeli matematycznych występuje pewna rozbieżność w optymalnych nastawach regulatorów dla różnych panujących warunków (prędkości kątowych, momentu obciążenia). Proszę o odpowiedź na pytanie: czy rozpatrywano zastosowanie nastaw stanowiących pewne kompromisowe rozwiązanie dla różnych warunków operacji układu, czy też raczej badania skłaniają się do dostosowania nastaw zgodnie ze zmierzonymi wielkościami odzwierciedlającymi wspomniane warunki operacji?
9. Proszę o wyjaśnienie wyprowadzenia wzoru (5.4) ze wzoru (5.3) lub o odniesienie do odpowiedniej literatury, gdzie wspomniane wyprowadzenie występuje.

7 Wniosek końcowy

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska zawiera znaczący wkład Autora w rozwój dyscypliny. Prezentuje wysoki poziom merytoryczny, dużą ilość in-

interesujących, oryginalnych i szczegółowo opisanych badań oraz ich wyników. Ze względu na powyższe uważam, że przedłożona praca spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U.2003 nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami). Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Zawarczyńskiego do publicznej obrony.