

Sposoby zmniejszania błędu estymacji momentu bezwładności

Streszczenie. W artykule zaproponowano skuteczne sposoby na zmniejszanie błędu estymacji momentu bezwładności. Zdefiniowano podstawowe przyczyny powstawania błędu. Podano warunki pracy silnika, w których estymacja momentu bezwładności jest najbardziej korzystna. Zaproponowano oryginalny układ rafinacji wyników estymacji pozwalający na zredukowanie względnego procentowego błędu estymacji do wartości poniżej promila.

Abstract. The effective ways to reduce the error of estimation of the moment of inertia were proposed in this paper. The basic reasons causing error are defined. The motor operation conditions are defined, in which estimation of the moment of inertia is the most advantageous. An original system for refining the estimation results was proposed. New system allows for reducing the relative percentage estimation error of moment of inertia to values below a promil. (**Methods for reducing the estimation error of the moment of inertia**).

Słowa kluczowe: moment bezwładności, błędy estymacji.

Keywords: moment of inertia, estimation error.

Wstęp

Jakość procesu regulacji prędkości w układach napędowych takich urządzeń jak obrabiarki i roboty przemysłowe może być polepszona [1], [2], [3], [4], [5] jeśli układ sterowania wykorzystuje informację o momencie bezwładności układu mechanicznego oraz jeśli informacja ta jest o wysokiej jakości. Pracy [1] opisywano problemy pojawiające się w stanach przejściowych związane z poprawną pracą zamkniętego układu regulacji prędkości po zmianie momentu bezwładności w układach napędowych z sztywnym przeniesieniem napędu. Natomiast w pracach [2], [6] opisywano problemy związane ze zmianą momentu bezwładności w układach dwumasowych z połączeniem sprzężystym silnika i maszyny roboczej. Istotny wpływ zmian momentu bezwładności układu mechanicznego na dokładne modelowanie silnika elektrycznego indukcyjnego również zauważyć można w pracy naukowej [7].

Znanych jest wiele technik pozyskiwania informacji o momencie bezwładności. W pracy [8] zaproponowano rozszerzony filtr Kalmana zredukowanego rzędu do estymacji momentu bezwładności szczególnie przy małych prędkościach obrotowych.

W pracy [9] przeprowadzono analizę porównawczą czterech różnych metod identyfikacji: rekurencyjnej metody najmniejszych kwadratów ze współczynnikiem zapomnienia (Recursive Last Squares), rekurencyjnego filtra Kalmana (Recursive Kalman Filter), gradientowej metody estymacji parametrów (Gradient Parameter Estimation Method), oraz rozszerzonego filtra Kalmana (Extended Kalman Filter). Autorzy pracy [9] przedstawili wniosek, że rozszerzony filtr Kalmana jest najbardziej efektywny w zastosowaniu do szacowania momentu bezwładności napędu pojazdu mobilnego.

W pracy [10] zaproponowano metodę estymacji deterministyczną opartą na sinusoidalnym sygnale testującym i sinusoidalnej odpowiedzi. W pracy także analizowano i porównano błędy estymacji momentu bezwładności z wyników badań porównawczych różnych metod estymacji: 1. metoda estymacji oparta o system MRAS, 2. metoda oparta o wymuszenie sinusoidalne momentu elektromagnetycznego. Błędy estymacji momentu bezwładności prowadzone metodą zaproponowaną przez autora pracy okazały się być mniejsze niż uzyskiwane metodą MRAS. W pracy [10] uzyskiwane procentowe błędy estymacji osiągały głównie wartości dwucyfrowe, a w pojedynczych najkorzystniejszych przypadkach były na poziomie procenta.

Niniejszy artykuł poświęcono głównie poszukiwaniu przyczyny powstawania błędów estymacji momentu

bezwładności w estymatorze klasy MRAS. W bieżącym artykule można znaleźć informacje, które pozwolą na skuteczne zmniejszanie błędu estymacji momentu bezwładności do wartości mniejszej od promila. Jak okaże się w treści, błąd można zmniejszać poprzez stworzenie najkorzystniejszych warunków, w których prowadzony mógłby być proces estymacji. W pracy głównie uzasadniono zalecenia prowadzenia procesu estymacji w warunkach: - estymacji w stanie silnego przyspieszenia, - oraz w dążeniu do stosowania układu regulacji prądu silnika cechującego się małym błędem regulacji prądu. Zaproponowano oryginalny i aktorski układ rafinacji wyników estymacji momentu bezwładności, który pozwala na znaczne zredukowanie procentowego względnego błędu estymacji do wartości poniżej promila.

Przyjęto następujący układ artykułu. W pierwszym akapicie zaproponowano estymator o nowej konstrukcji, w taki sposób, że obwód estymacji współczynnika bezwładności jest systemem dynamicznym pierwszego rzędu (z jednym integratorem zastępczym). Następnie wykazano, że taki prosty estymator jest w stanie skutecznie estymować współczynnik bezwładności zależny od momentu bezwładności. Zdefiniowano błąd względny estymacji współczynnika bezwładności i czynniki jego powstawania. W pracy zawarto wyniki badań symulacyjnych, które posłużyły do zdefiniowania wniosków o warunkach pracy silnika, w których estymacja momentu bezwładności jest najbardziej korzystna.

Estymator podsystemu elektromechanicznego pierwszego rzędu

Estymator podsystemu elektromechanicznego służy do pozyskiwania informacji o momencie bezwładności i momencie obciążenia w układzie regulacji prędkości [11]. Sposób włączenia estymatora w układ regulacji prędkości silnika prądu stałego przedstawiono na rysunku 1.

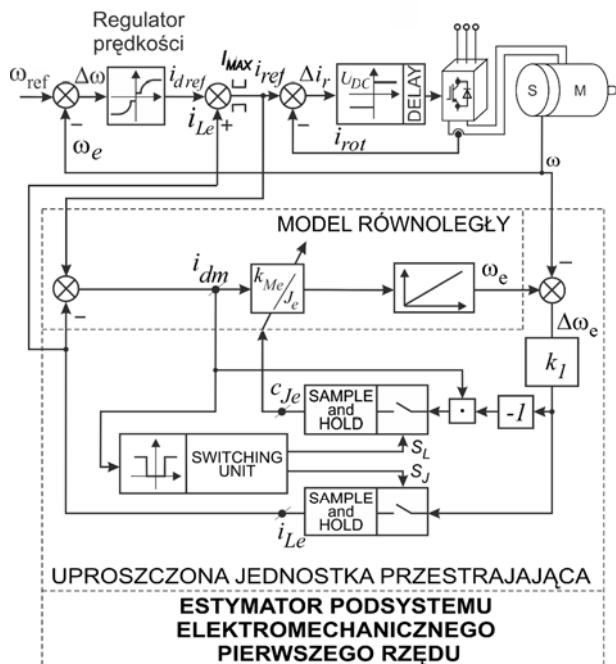
Podstawowymi elementami składowymi napędu są silnik M wykonujący ruch sterowany, czujnik S mierzący prędkość wału silnika, przekształtnik zasilający silnik, obwód regulacji prądu, obwód regulacji prędkości oraz estymator podsystemu elektromechanicznego.

Działanie układu regulacji prędkości można opisać za pomocą operacji na sygnałach wykonywanych przez poszczególne podsystemy. Od sygnału prędkości zadanej ω_{ref} odejmowany jest sygnał pomiarowy prędkości ω pozyskany z wyjścia czujnika S prędkości wału silnika. Różnica tych sygnałów stanowi uchyb regulacji prędkości $\Delta\omega$. Sygnał uchybu $\Delta\omega$ podawany jest na wejście nieliniowego regulatora prędkości. Sygnałem wyjściowym

regulatora prędkości jest zadany prąd dynamiczny i_{dref} , który w swojej interpretacji fizycznej służy zadawania momentu dynamicznego silnika. Moment dynamiczny liniowo pływa na przyspieszenie lub opóźnienie ruchu wału silnika. Do zadanego prądu dynamicznego i_{dref} dodawany jest sygnał wyjściowy estymatora czyli estymowany prąd obciążenia i_{Le} . Suma sygnałów i_{dref} oraz i_{Le} stanowi zadany prąd silnika i_{ref} . Zadany prąd silnika i_{ref} jest sygnałem wejściowym podrzędnego obwodu regulacji prądu. Do regulacji prądu zastosowano regulator dwustanowy z stałym czasem opóźnienia $DELAY$. Opóźnienie zastosowano celem ograniczenia częstotliwości przełączeń do wartości dopuszczalnej dla tranzystorów przekształtnika. Jest to układ regulacji prądu z modulacją typu delta o zmiennej częstotliwości przełączania z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego prądu silnika.

Moment bezwładności, w przedstawionym na rysunku 1 układzie regulacji prędkości, określany jest automatycznie przez estymator podsystemu elektromechanicznego. Estymator podsystemu elektromechanicznego, który można zaklasyfikować do systemów MRAS [11], zawiera w swojej strukturze model równoległy oraz jednostkę przestrajającą. Model równoległy służy do naśladowania zachowania się podsystemu elektromechanicznego silnika. Jednostka przestrajająca służy do zmiany parametrów modelu równoległego w taki sposób, aby uchyb naśladowania wynosił zero.

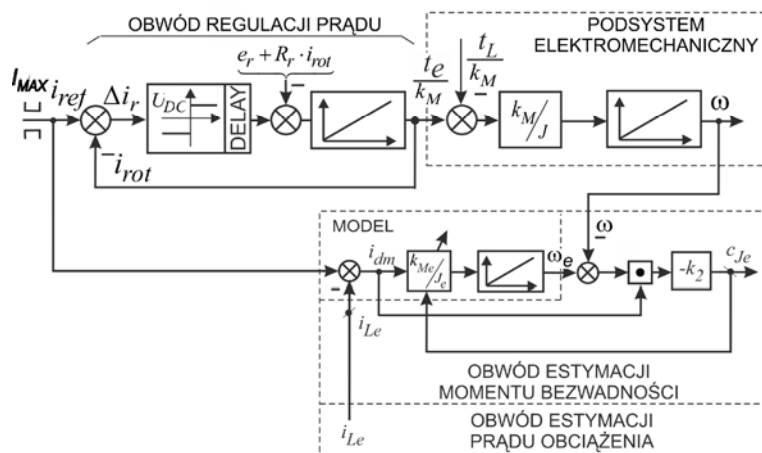
W artykule zaproponowano nową uproszczoną wersję estymatora podsystemu o zmodyfikowanej jednostce przestrajającej. W nowej wersji estymatora, którą przedstawiono na rysunku 1, w jednostce przestrajającej integrator zastąpiono układem próbkująco - pamiętającym (Sample & Hold) [11]. W efekcie tej zamiany, rolę integratora zerującego uchyb naśladowania przejął integrator modelu równoległego podsystemu elektromechanicznego.



Rys. 1. Schemat układu regulacji prędkości z estymatorem podsystemu elektromechanicznego

Zjawisko zerowania uchybu naśladowania w nowej wersji estymatora zostanie wyjaśnione dogłębniej w wyniku analizy matematycznej oraz na podstawie schematu równoważnego obwodu estymacji współczynnika bezwładności, w dalszej treści artykułu.

Do zdefiniowania uchybu naśladowania konieczne jest przeprowadzenie analizy matematycznej działania systemu. Na rysunku 2, silnik oraz przekształtnik zostały zastąpione modelem obwodu regulacji prądu i modelem podsystemu elektromechanicznego. W analizie działania estymatora nie można pominąć obwodu regulacji prądu, ponieważ jest on integralną częścią tego systemu, którego działanie wpływa na wynik estymacji.



Rys. 2. Model obwodu regulacji prądu i podsystemu elektromechanicznego

Działanie podsystemu elektromechanicznego opisano zależnością:

$$(1) \quad d\omega/dt = k_M/J \cdot (i_{ref} - \Delta i_r - t_L/k_M),$$

gdzie:

- ω – prędkość kątowa wału silnika [rad/s],
- k_M – stała momentu silnika [Nm/A],
- J – zastępczy moment bezwładności całego systemu mechanicznego sprowadzony do prędkości wału silnika [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$],
- i_{ref} – prąd zadany [A],
- Δi_r – uchyb regulacji prądu [A],
- t_L – moment obciążenia [Nm].

Działanie modelu równoległego również opisano zależnością:

$$(2) \quad d\omega_e/dt = c_{Je} \cdot (i_{ref} - i_{Le}),$$

gdzie:

- ω_e – sygnał prędkości kątowej modelu równoległego [rad/s],
- c_{Je} – estymowany współczynnik bezwładności [$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{A}/(\text{Nm})$],
- i_{Le} – estymowany prąd obciążenia [A].

Do wyprowadzenia zależności opisującej uchyb naśladowania $\Delta\omega_e$ konieczne jest zdefiniowanie uchybów estymacji:

$$(3) \quad \begin{aligned} \Delta\omega_e &= \omega - \omega_e \\ \Delta i_L &= (t_L/k_M + \Delta i_r) - i_{Le} \\ \Delta c_{Je} &= k_M/J - c_{Je} \end{aligned}$$

przy czym:

i_{dm} jest prądem dynamicznym modelu [A],

$\Delta\omega_e$ jest uchybem równoległej symulacji prędkości [rad/s],

Δi_L jest uchybem estymacji prądu obciążenia [A],

Δc_{Je} jest uchybem estymacji współczynnika bezwładności [kg·m²·A/(Nm)].

Uchyb naśladowania Δe wyprowadzono w wyniku odjęcia stronami zależności (1) od zależności (2):

$$(4) \quad \Delta e = d\Delta\omega_e/dt = -(k_M/J) \cdot \Delta i_L + \Delta c_{Je} \cdot i_{dm}.$$

Występujący w zależności (4) symbol i_{dm} oznacza prąd dynamiczny modelu zdefiniowany jako różnica prądu zadanego i_{ref} oraz estymowanego prądu obciążenia i_{Le} :

$$(5) \quad i_{dm} = i_{ref} - i_{Le}.$$

Uchyb naśladowania Δe zależy jednocześnie od uchybu estymacji współczynnika bezwładności Δc_{Je} jak i uchybu estymacji prądu obciążenia Δi_L . Warto zauważyć, że uchyb estymacji współczynnika bezwładności Δc_{Je} przemnożony jest przez sygnał prądu dynamicznego i_{dm} . W praktyce oznacza to, że wpływ uchybu estymacji Δc_{Je} na uchyb naśladowania Δe jest silniejszy w stanach dynamicznych napędu, w których sygnał i_{dm} przyjmuje relatywnie duże wartości. Ciekawym zauważeniem jest fakt, że sygnał i_{dm} skalujący uchyb estymacji Δc_{Je} może przyjmować wartości dodatnie lub ujemne w zależności od przyspieszenia lub opóźnienia ruchu wału silnika. Fakt ten może być przyczyną niestabilności obwodu estymacji współczynnika bezwładności, przy niewłaściwie zbudowanej jednostce przestrajającej estymatora. Zagadnienie to zostanie wyjaśnione dogłębniej przy wykorzystaniu schematu równoważnego obwodu estymacji współczynnika bezwładności.

Schemat równoważny obwodu estymacji współczynnika bezwładności

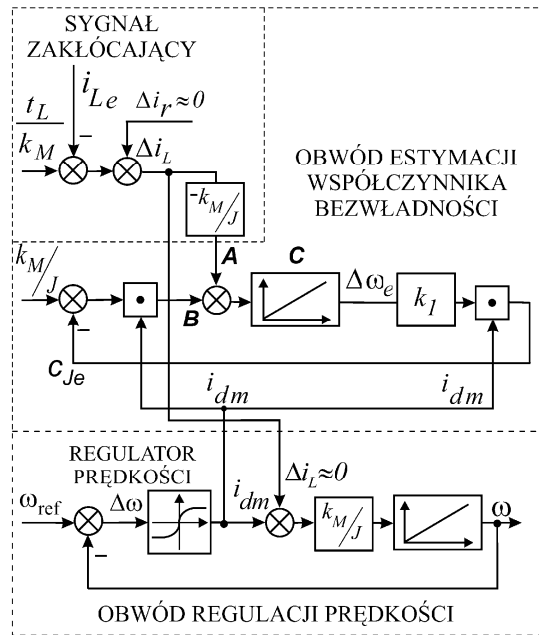
Mechanizm procesu zerowania uchybu naśladowania Δe zostanie wyjaśniony za pomocą schematu równoważnego obwodu estymacji współczynnika bezwładności. Schemat równoważny obwodu estymacji współczynnika bezwładności, który przedstawiono na rysunku 3, utworzono na podstawie zależności (4). Uchyb wspólny Δe jest zerowany przez integrator zastępczy „C” poprzez wykorzystanie sygnału c_{Je} sprzężenia zwrotnego wychodzącego od jednostki przestrajającej wprowadzonego do modelu równoległego, co również przedstawiono na rysunku 1.

Na schemacie równoważnym z rysunku 3 można łatwo wyjaśnić konieczność stosowania w układzie jednostki przestrajającej operacji mnożenia sygnału wyjściowego integratora wspólnego C przez sygnał i_{dm} , lub przez znak sygnału i_{dm} . Tak jak to przedstawiono na rysunku 3, znak uchybu Δe zależy od znaku sygnału:

$$(6) \quad B = \Delta c_{Je} \cdot i_{dm},$$

i zależy od znaku sygnału prądu dynamicznego i_{dm} .

Gdyby jednostka przestrajająca była zbudowana niewłaściwie, to znaczy bez operacji mnożenia sygnału wyjściowego $\Delta\omega_e$ integratora wspólnego C przez sygnał prądu dynamicznego i_{dm} , zaistniałoby niebezpieczeństwo niestabilnej pracy obwodu estymacji współczynnika bezwładności. W przypadku niewłaściwie zbudowanej jednostki przestrajającej, niestabilna praca mogłaby być wywołana możliwą sytuacją z pojawieniem się dodatniego sprzężenia zwrotnego, gdyby znak sygnału i_{dm} byłby ujemny.



Rys. 3. Schemat równoważny obwodu estymacji współczynnika bezwładności

Schemat równoważny estymatora, przedstawiony na rysunku 3 zostanie dodatkowo wykorzystany do analizy dokładności estymacji. Praca obwodu estymacji współczynnika bezwładności jest zakłócana pracą drugiego sprzężonego obwodu estymacji prądu obciążenia. Wpływ zakłócający na ten obwód estymacji odbywa się poprzez sygnał zakłócający A:

$$(7) \quad A = -(k_M/J) \cdot \Delta i_L,$$

zależny od wyniku drugiego sprzężonego obwodu estymacji prądu obciążenia Δi_L .

Sygnał A należy uznać za zakłócający, ponieważ podlega on ciągłym zmianom za czas pracy obwodu estymacji współczynnika bezwładności. Nawet w przypadku dokładnego dostrojenia sąsiedniego obwodu estymacji prądu obciążenia, w którym sygnał A jest równy zero, sygnał ten za chwilę czasu będzie różny od zera w wyniku tego, że zależy on od uchybu regulacji prądu Δi_r , zgodnie z zależnością (3). Kontynuując, uchyb obwodu regulacji prądu Δi_r podlega zmianom w wyniku drgającego charakteru pracy ciągle aktywnego obwodu regulacji prądu silnika. Obwód regulacji prądu można uznać za system drgający, w którym uchyb oscyluje wokół wartości zadanej i_{ref} , z powodu zastosowania przekształtnika o przełączanym i dwustanowym charakterze pracy jego tranzystorów. Dwustanową pracę tranzystorów stosuje się celem zmniejszenia strat energii elektrycznej w tranzystorach. W wyniku oscylacyjnego charakteru sygnału uchybu regulacji prądu Δi_r , sygnał A nie można uznać za równy zero. Nie można pominąć wpływu obwodu regulacji prądu, ponieważ sygnał A powoduje powstawanie błędu estymacji Δc_{Je} współczynnika bezwładności, co zostanie wyjaśnione poniżej.

Dokładność estymacji współczynnika bezwładności

Dokładność obwodu estymacji współczynnika bezwładności można określić ilościowo i na podstawie parametrów określających punkt pracy podrzędnego obwodu regulacji prądu. Błąd względny estymacji współczynnika bezwładności zdefiniowano jako stosunek uchybu estymacji współczynnika bezwładności Δc_{Je} odniesiony do wartości prawidłowej k_M/J :

$$(8) \quad \Delta c_{Je} \% = \frac{\Delta c_{Je}}{k_M} \cdot 100\% \cdot J$$

Powyższy wzór określający dokładność obwodu estymacji współczynnika bezwładności uzyskano na podstawie zależności (4). W wyniku działania integratora wspólnego C w stanie ustalonym, w zależności (4), zachodzi równość:

$$(9) \quad \Delta e = d\Delta\omega_e/dt = 0,$$

a sama zależność (4) upraszcza się do postaci:

$$(10) \quad 0 = -(k_M/J) \cdot \Delta i_L + \Delta c_{Je} \cdot i_{dm}$$

Podstawiając wyznaczony z zależności (3) uchyb Δi_L oraz wyznaczony zależności (9) uchyb Δc_{Je} do zależności (8) można uzyskać wzór określający względny błąd estymacji współczynnika bezwładności:

$$(11) \quad \Delta c_{Je} \% = \frac{(t_L/k_M - i_{Le}) + \Delta i_r}{i_{dm}} \cdot 100\%,$$

zależny od uchybu Δi_r , podrzędnego obwodu regulacji prądu silnika.

Wykorzystując praktycznie zależność (11) można określić zalecenia dotyczące warunków pracy obwodu estymacji współczynnika bezwładności.

Wartym zauważenia jest fakt, że symbol i_{dm} , oznaczający prąd dynamiczny modelu, umiejscowiony jest w mianowniku zależności (11). Z faktu tego wynika wniosek, że nie ma sensu prowadzić procesu estymacji współczynnika bezwładności, gdy prąd dynamiczny jest równy lub bliski zeru. W takim stanie należy się wówczas spodziewać dużego błędu względnego estymacji $\Delta c_{Je} \%$.

Zależność (11) jest również dowodem na to, względny błąd estymacji $\Delta c_{Je} \%$ jest najmniejszy, w stanie silnego przyspieszenia napędu, gdy prąd dynamiczny i_{dm} jest największy. Efekt ten został wykorzystany do skonstruowania układu przełączającego, który przedstawiono na rysunku 1. Działanie układu przełączającego jest oparte o zasadę, że układ przełączający włącza do działania tylko jeden z dwóch obwodów estymacji estymatora. W stanach dynamicznych silnego przyspieszenia lub opóźnienia ruchu, gdy i_{dm} jest duże układ przełączający włącza do pracy obwód estymacji współczynnika bezwładności i wyłącza obwód estymacji prądu obciążenia. W chwilach o stanie przeciwnym, gdy sygnał i_{dm} jest mały i nie obserwujemy zmian prędkości, układ przełączający wyłącza obwód estymacji współczynnika bezwładności i włącza obwód estymacji prądu obciążenia.

Wartym zauważenia w zależności (11) jest też fakt, że występujący w liczniku zależności (11) uchyb regulacji prądu Δi_r wpływa wprost proporcjonalnie na uchyb względny $\Delta c_{Je} \%$. Kontynuując, śledzenie drgającego uchybu regulacji prądu Δi_r podczas procesu estymacji współczynnika bezwładności może przynieść korzyści w postaci małego błędu względnego estymacji $c_{Je} \%$. Na przykład, jeżeli zostanie przeprowadzony proces estymacji współczynnika bezwładności o małej stałej czasowej, i zostanie przerwany w chwili, gdy uchyb regulacji prądu Δi_r byłby równy 0,5 A, to pomimo dużej wartości prądu dynamicznego 5A, najlepsza dokładność jakiej by można oczekiwać zostałaby opisana błędem względnym nie mniejszym niż 10%. W ocenie inżyniera projektującego napęd elektryczny z obwodem estymacji współczynnika bezwładności o małej stałej czasowej, nie jest to dokładność satysfakcjonująca.

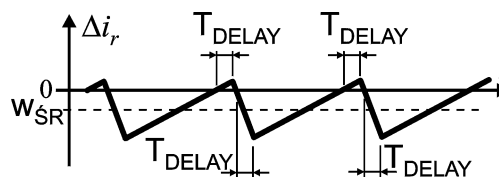
Jedną z wielu metod na poprawienie dokładności estymacji współczynnika bezwładności prowadzi poprzez zmniejszenie amplitudy oscylacji uchybu regulacji prądu, kosztem zwiększenia częstotliwości przełączeń tranzystorów przekształtnika i kosztem zwiększenia strat energii w przekształtniku [12].

Istnieje dodatkowa możliwość zwiększenia dokładności estymacji współczynnika bezwładności poprzez zatrzymanie procesu estymacji dokładnie w chwili, gdy uchyb regulacji prądu Δi_r jest równy zero poprzez wykorzystanie układu przełączającego do przerywania procesu estymacji.

Kolejnym rozwiązaniem alternatywnym poprawienia dokładności obwodu estymacji współczynnika bezwładności jest wykorzystanie danych próbek estymowanego współczynnika bezwładności dokładnie pobranych w chwilach, kiedy uchyb regulacji prądu Δi_r jest dokładnie równy zero, przy ciągle działającym obwodzie estymacji współczynnika c_{Je} .

Przy rozważeniu zastosowania proponowanych metod alternatywnych należy zwrócić uwagę na zjawisko powstawania niezerowej wartości uchybu regulacji prądu. Obwód regulacji prądu z delta-modulacją charakteryzujący się stałym opóźnieniem nie jest dokładny statycznie. Niedokładność statyczna, pomimo zerowej wartości uchybu regulacji Δi_r , obwodu regulacji prądu pogarsza się wraz ze wzrostem prędkości (siły elektromotorycznej) silnika. W konsekwencji okazuje się, że różne są wyniki procesów estymacji współczynnika bezwładności prowadzonych przy różnych wartościach prędkości.

Zjawisko powstawania niezerowego uchybu regulacji prądu zilustrowano na rysunku 4.



Rys. 4. Ilustracja powstawania niezerowej wartości średniej w_{SR} uchybu regulacji prądu Δi_r .

Tak jak to przedstawiono na rysunku 4, różne nachylenia sygnału uchybu regulacji prądu Δi_r są wynikiem odejmowania się siły elektromotorycznej silnika od napięcia zasilającego. Przy zastosowaniu stałego czasu opóźnienia T_{DELAY} od chwili zerowej wartości uchybu do chwili przełączenia powstaje niezerowa wartość średnia w_{SR} uchybu regulacji prądu zależna od wartości siły elektromotorycznej i zależna od prędkości silnika.

Ostatecznie, w efekcie niedokładności statycznej obwodu regulacji prądu, wyniki estymacji współczynnika bezwładności c_{Je} mogą być obciążone różnym błędem w zależności od prędkości wirowania wału silnika.

Zagadnienie estymacji momentu bezwładności nie jest proste. W kontraście do powyższej treści, wydawałoby się, że wprowadzenie procesu estymacji współczynnika bezwładności, przy zerowej prędkości powinno zminimalizować błąd względny $\Delta c_{Je} \%$. Jednakże dodatkowym problemem estymacji c_{Je} jaki pojawia się przy małych prędkościach jest nieliniowy wpływ pasywnego momentu obciążenia pochodzącego od tarcia w łożyskach, lub tarcia łopatek własnego wentylatora silnika o powietrze, lub tarc kinetycznych występujących w maszynie roboczej. Pomimo, że moment oporowy może przyjmować małe wartości przy małej prędkości, to jednak może wykazywać duże zmiany procentowe. Moment pasywny zmienia nawet znak przy zmianach kierunku wirowania. Wartości pasywnego momentu obciążenia w różnych kierunkach

wirowania nie muszą być sobie równe. Dlatego też, zaleca się prowadzenie procesu estymacji współczynnika bezwładności jednak przy dużych prędkości wirowania wału silnika, pomimo wpływu uchybu regulacji prądu Δi_r na błąd względny $\Delta c_{Je\%}$ opisany zależnością (11).

Badania symulacyjne

Badania symulacyjne przeprowadzono celem potwierdzenia następujących ciekawych zjawisk:
 - zjawiska powstawania różnych wyników estymacji współczynnika bezwładności przy różnych wartościach prądu dynamicznego,
 - zjawiska powstawania różnych wyników estymacji współczynnika bezwładności przy różnych prędkościach.

Badania wnoszą korzyści praktyczne w postaci informacji o warunkach pracy silnika w jakich najkorzystniej jest prowadzić proces estymacji współczynnika bezwładności. Informację tę można wykorzystać do ulepszenia konstrukcji estymatora podsystemu elektromechanicznego prowadzącej do zmniejszenia błędu szacowania.

Symulowano układ regulacji prędkości z silnikiem prądu stałego zasilanego przekształtnikiem tranzystorowym, którego schemat przedstawiono na rysunku 1. Przyjęto następujące parametry modelu symulacyjnego: napięcie zasilające przekształtnik DC/DC 325V, dopuszczalny prąd maksymalny przekształtnika i silnika $I_{MAX} = 10$ A, moment obciążenia silnika $T_L = 1$ Nm, stała momentu silnika $k_M = 1,35$ Nm/A, wypadkowa rezystancja uzwojenia twornika silnika: $R_r = 4,65\Omega$, wypadkowa indukcyjność uzwojenia wirnika silnika $L_r = 0,07$ H, zastępczy moment bezwładności całego podsystemu elektromechanicznego $J = 0,0328$ kgm². Współczynnik wzmocnienia estymatora $k_f = 10000$.

W artykule zaproponowaną taką wersję estymatora w której zawsze pracuje tylko jeden z dwóch sprzężonych ze sobą obwodów estymacji. Dlatego też celem separacji zjawisk i ułatwienia analizy, symulację prowadzono w warunkach idealnego dostrojenia drugiego obwodu estymacji prądu obciążenia.

W pierwszej kolejności symulowano odpowiedź estymowanego współczynnika bezwładności c_{Je} podczas rozruchu silnika, aby zaobserwować zachowanie się estymatora w stanach zerowego i silnego przyspieszenia. Stan zerowego przyspieszenia oznaczono przedziałami czasu $z1$ i $z3$ na rysunku 5. Natomiast stan silnego przyspieszenia oznaczono przedziałem $z2$.

W przedziałach zerowego przyspieszenia $z1$ i $z3$, na rysunku 5 można stwierdzić, że sygnał estymowanego współczynnika bezwładności c_{Je} jest równy w przybliżeniu zero. Takie zachowanie estymatora można wyjaśnić wykorzystując zależność (11), którą można przedstawić w formie jak poniżej:

$$(12) \quad 0 = -(k_M / J) \cdot (t_L / k_M + \Delta i_r - i_{Le}) + (k_M / J - c_{Je}) \cdot (i_{ref} - i_{Le})$$

Uwzględniając, uzyskaną na podstawie rysunku 1 zależność na zadany prąd silnika:

$$(13) \quad i_{ref} = i_r + \Delta i_r = i_d + t_L / k_M + \Delta i_r,$$

oraz podejmując fakty następujące fakty:

- że symulację przeprowadzono przy założeniu stanu dokładnego skompensowania momentu obciążenia:

$$(14) \quad i_{Le} = t_L / k_M,$$

- oraz, że w stanie ustalonym prąd dynamiczny modelu

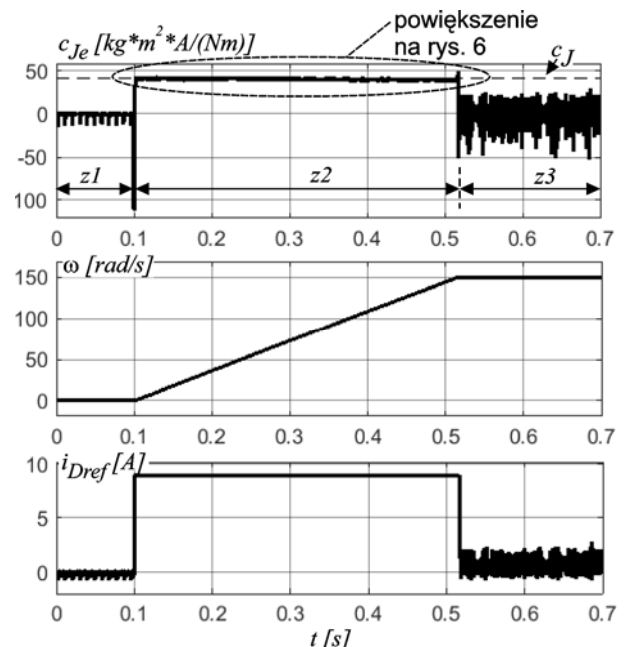
równoległego i_{dm} oraz prąd dynamiczny silnika i_d są równe zero, uzyskuje się równość:

$$(15) \quad 0 = -c_{Je} \cdot \Delta i_r.$$

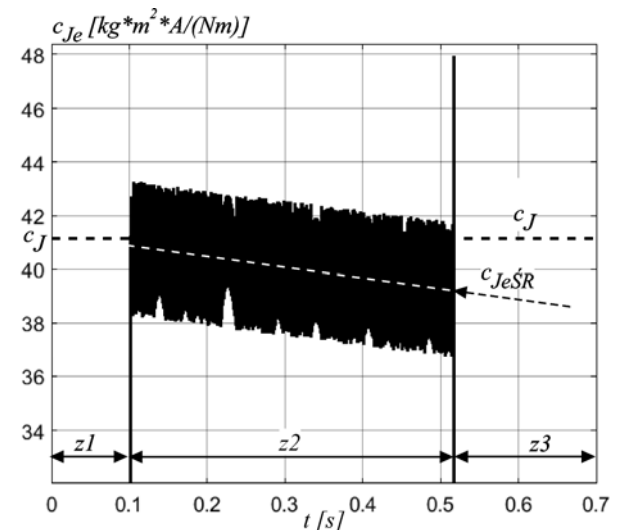
Powyższa równość jest spełniona pod warunkiem, że:

$$(16) \quad c_{Je} = 0,$$

co potwierdza uzyskane wyniki symulacji w przedziałach czasu $z1$ i $z3$.



Rys. 5. Podział procesu estymacji na stany zerowego $z1$, $z3$ oraz silnego przyspieszenia $z2$, dla $k_1=10000$

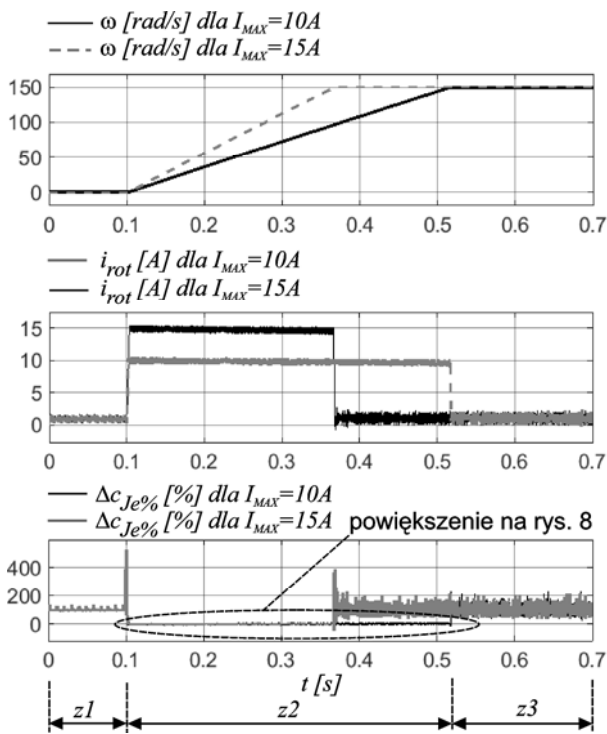


Rys. 6. Powiększenie sygnału estymowanego współczynnika bezwładności c_{Je} w stanie silnego przyspieszenia $z2$, dla $k_1=10000$

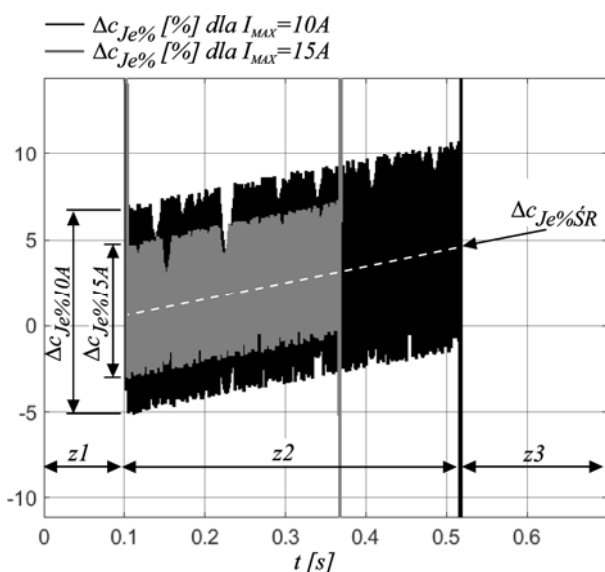
Wyniki symulacji przedstawione na rysunku 5 mogą posłużyć do potwierdzenia zjawiska powstawania różnych wyników estymacji współczynnika bezwładności c_{Je} przy różnych prędkościach silnika. Powiększając sygnał estymowanego współczynnika bezwładności c_{Je} , tak jak to przedstawiono na rysunku 6, można zaobserwować, że wartość średnia c_{JeSR} tego współczynnika c_{Je} coraz bardziej różni się od oczekiwanej wartości c_J wraz ze wzrostem prędkości. Zjawisko to można wyjaśnić wpływem powiększającego się wraz ze wzrostem siły

elektromotorycznej uchybu regulacji prądu Δi_r na uchyb estymacji współczynnika bezwładności c_{Je} tak jak to opisano zależnością (11).

Następnie prowadzono badania w kierunku potwierdzenia zjawiska powstawania różnych wyników estymacji współczynnika bezwładności w warunkach różnych wartości prądu dynamicznego. Na rysunku 7 porównano odpowiedzi dwóch systemów regulacji prędkości o identycznych właściwościach i identycznych estymatorach lecz różniących się jedynie inną wartością ograniczenia prądu silnika I_{MAX} . Sygnały uchybów względnych estymowanych współczynników bezwładności $\Delta c_{Je\%}$ porównano na rysunku 8.

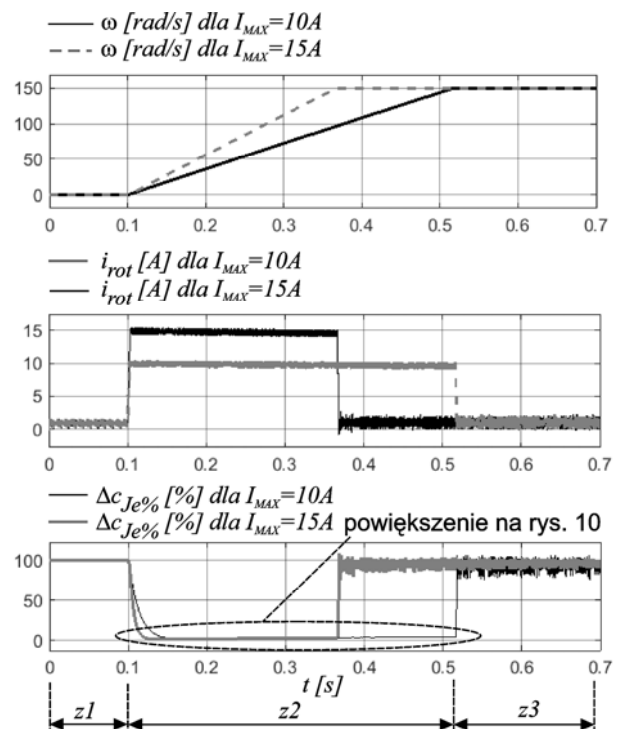


Rys. 7. Wyniki symulacji porównawczej dwóch systemów regulacji prędkości różniących się inną wartością ograniczenia prądu silnika, dla $I_{MAX}=10A$ oraz $I_{MAX}=15A$, dla $k_1=10000$

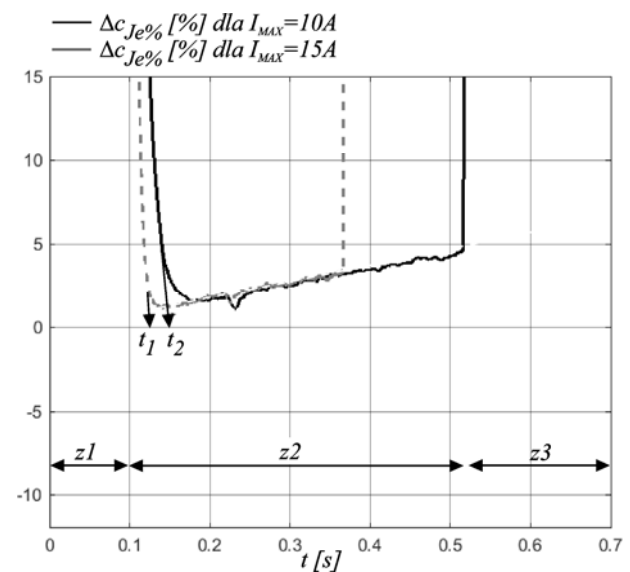


Rys. 8. Porównanie błędów względnych estymacji współczynnika bezwładności dla procesów estymacji przeprowadzonych przy dwóch różnych wartościach ograniczenia prądu silnika, dla $I_{MAX}=10A$ oraz $I_{MAX}=15A$, przy wzmożeniu estymatora $k_1=10000$

Tak jak to przedstawiono na rysunku 8, estymator pracujący w układzie regulacji prędkości z prądem maksymalnym I_{MAX} równym 15A wykazuje mniejszą wartość uchybu względnego $\Delta c_{Je\%15A}$ niż estymator pracujący w układzie regulacji prędkości, w którym dopuszcza się prąd maksymalny I_{MAX} równy 10A. Mniejszą wartość uchybu $\Delta c_{Je\%15A}$ od wartości $\Delta c_{Je\%10A}$ można wyjaśnić przy wykorzystaniu zależności (11). Występujący w mianowniku zależności (11) prąd dynamiczny i_{dm} o większej wartości przyczynia się do zmniejszania względnego błędu estymacji współczynnika bezwładności $\Delta c_{Je\%}$. Można zatem przedstawić wniosek praktyczny, że estymacja współczynnika bezwładności jest tym bardziej dokładniejsza



Rys. 9. Wyniki symulacji porównawczej dwóch systemów regulacji prędkości różniących się inną wartością ograniczenia prądu silnika, dla $I_{MAX}=10A$ oraz $I_{MAX}=15A$, dla $k_1=1$



Rys. 10. Porównanie błędów względnych estymacji współczynnika bezwładności dla procesów estymacji przeprowadzonych przy dwóch różnych wartościach ograniczenia prądu silnika, dla $I_{MAX}=10A$ oraz $I_{MAX}=15A$, przy wzmożeniu estymatora $k_1=1$

im przeprowadzona jest w warunkach silniejszego przyspieszenia ruchu, to jest przy większej wartości prądu dynamicznego i_{dm} .

Wartym zauważenia na rysunku 8 jest negatywne zjawisko silnego oscylowania błędu estymacji współczynnika bezwładności. Wielkość oscylacji błędu względnego estymacji współczynnika bezwładności $\Delta C_{Je\%10A}$ może sięgać aż 10%.

Sposobem na uśrednienie przebiegu współczynnika bezwładności c_{Je} wydaje się być wykorzystanie dolnoprzepustowych właściwości filtracyjnych estymatora poprzez zastosowanie współczynnika k_1 o małej wartości równej jeden. Tak jak to przedstawiono na rysunku 9 i rysunku 10, w wyniku zastosowania współczynnika $k_1=1$, zjawisko oscylowania błędu $\Delta C_{Je\%}$ uległo znacznemu wytłumieniu, ale ujawnił się wyraźny problem powstawania niezerowej wartości błędu. Błąd względny estymacji współczynnika bezwładności wyraźnie wzrasta wraz ze wzrostem prędkości i siły elektromotorycznej silnika.

Na rysunku 10, można również zaobserwować, że czas estymacji t_1 lub t_2 zależy wyraźnie od wartości prądu dynamicznego i_{dm} i jest tym krótszy im większa jest jego wartość. Krótszą wartość czasu estymacji t_1 można wytłumaczyć specyficzną konstrukcją estymatora, którą przedstawiono na rysunku 3, polegającą na tym, że w pętli estymacji występuje dwukrotne mnożenie przez prąd dynamiczny i_{dm} . W efekcie czas estymacji jest odwrotnie proporcjonalny do wartości kwadratu prądu dynamicznego i_{dm} .

Podsumowując, uzyskane wyniki symulacji potwierdzają powstawanie różnych wyników estymacji współczynnika bezwładności w warunkach przy różnych prędkościach lub różnych wartościach prądu dynamicznego. Chęć do zmniejszania błędu estymacji współczynnika bezwładności skłoniła autora do opracowania estymatora zmodyfikowanego.

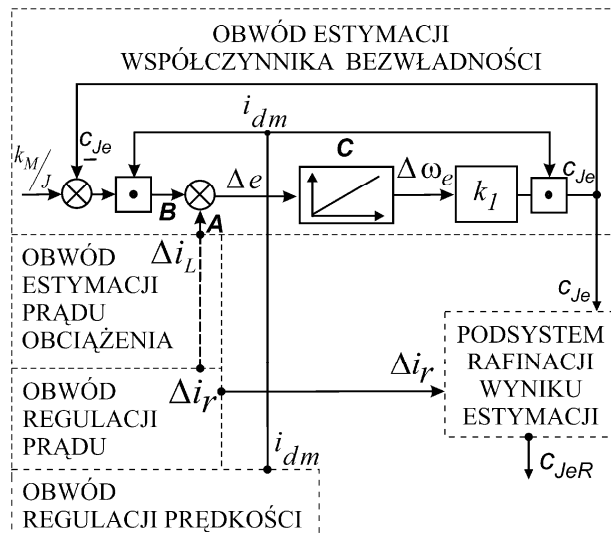
Modyfikacja obwodu estymacji współczynnika bezwładności

Wyniki symulacji, przedstawione na rysunkach 5 – 10 ujawniły silny wpływ uchybu regulacji prądu Δi_r na uchyb względny estymacji współczynnika bezwładności $\Delta C_{Je\%}$. Wydawałoby się, że dobrym rozwiązaniem tego problemu jest zmniejszenie oscylacji prądu silnika poprzez zmniejszenie czasu opóźnienia DELAY w regulatorze prądu, który przedstawiono na rysunku 2. Jednakże, zmniejszenie tego czasu DELAY prowadzi nieuchronnie do negatywnego zwiększenia częstotliwości przełączeń przekształtnika oraz wzrostu strat energii w wyniku przełączania tranzystorów przekształtnika i grzanie się przekształtnika.

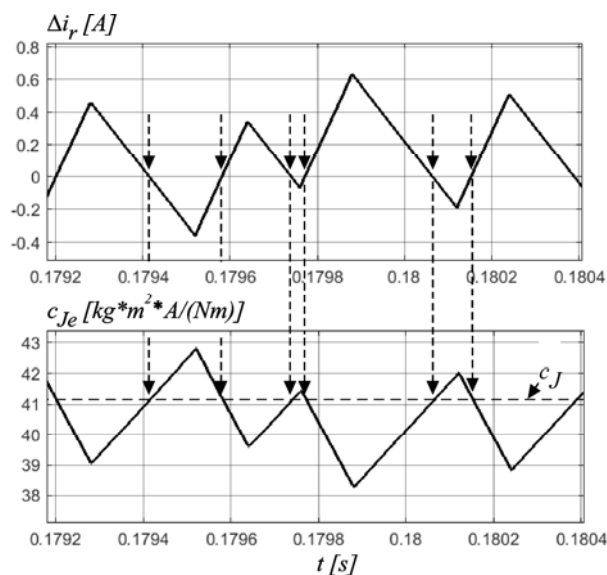
W artykule zaproponowano inne rozwiązanie, polegające na rafinacji wyników estymacji, przy zachowaniu dużego opóźnienia i małych strat energii w przekształtniku. Sposób podłączenia opracowanego podsystemu rafinacji wyników estymacji do estymatora przedstawiono na rysunku 11. Do rafinacji danych wykorzystano zjawisko, które przedstawiono na rysunku 12, polegające na tym, że estymowany współczynnik bezwładności c_{Je} jest równy wartości oczekiwanej c_J w chwilach, kiedy uchyb regulacji prądu Δi_r jest równy zero. Chwile zapamiętywania (wyzwalania procesu próbkowania) sygnału estymowanego współczynnika bezwładności oznaczono strzałkami, na rysunku 12. Zjawisko to można wyjaśnić przy pomocy zależności (11) wykazującej, że względny uchyb estymacji współczynnika bezwładności $\Delta C_{Je\%}$ będzie najmniejszy, gdy uchyb regulacji prądu Δi_r będzie równy zero.

W oparciu o zjawisko zaobserwowane i zarejestrowane na rysunku 12 skonstruowano podsystem rafinacji wyników

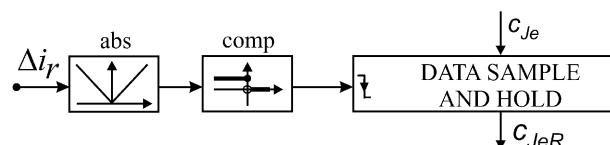
estymacji, który przedstawiono na rysunku 13. Sygnałem wejściowym podsystemu jest uchyb regulacji prądu Δi_r , który podlega operacji detekcji przejścia przez zero za pomocą dwóch układów: układu obliczania wartości bezwzględnej abs oraz układu komparatora comp z progiem przełączania równego w przybliżeniu zero. Sygnał wyjściowy komparatora comp podawany jest na wejście wyzwalania zbczem opadającym układu próbkującego DATA SAMPLE AND HOLD.



Rys. 11. Sposób podłączenia do estymatora podsystemu rafinacji wyników estymacji



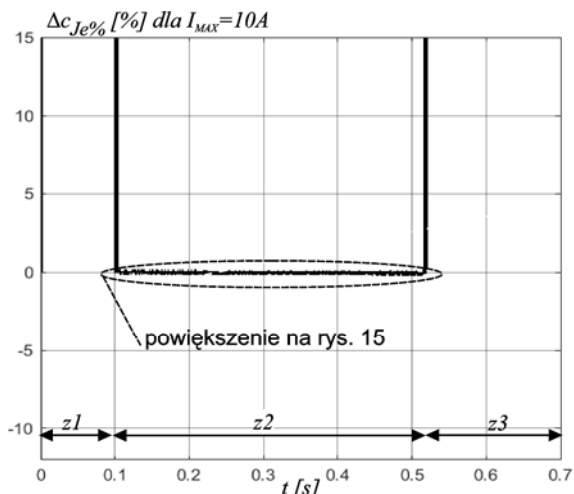
Rys. 12. Porównanie sygnałów uchybu regulacji prądu i sygnału estymowanego współczynnika bezwładności c_{Je} , dla $k_1=10000$



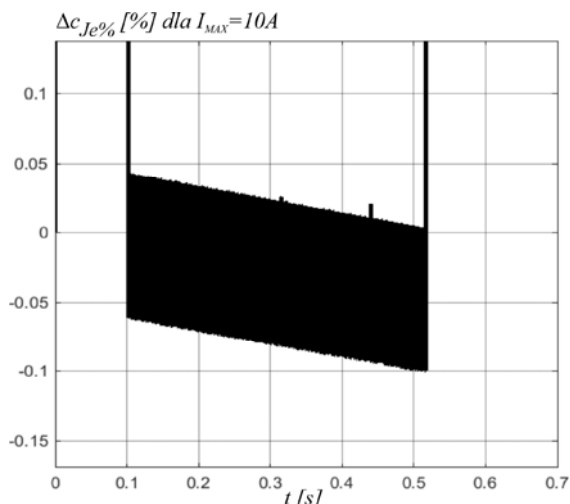
Rys. 13. Schemat blokowy podsystemu rafinacji wyników estymacji

Rezultat działania podsystemu rafinacji danych przedstawiono na rysunku 14 w postaci sygnału uchybu względnego estymacji, jednakże obliczonego na podstawie jego sygnału wyjściowego C_{JeR} . Z rysunku wynika, że uchyb uległ znacznemu zmniejszeniu w porównaniu w wynikami przedstawionymi na rysunku 8 oraz rysunku 10. Powiększając sygnał uchybu $\Delta C_{Je\%}$, na rysunku 15, można

zaobserwować, że uległ on znacznemu zmniejszeniu, bo aż 100 krotnemu.



Rys. 14. Błąd względną estymacji współczynnika bezwładności obliczony z sygnału wyjściowego podsystemu rafinacji danych, przy wzmacnieniu estymatora $k_1=10000$



Rys. 15. Błąd względną estymacji współczynnika bezwładności, przy wzmacnieniu estymatora $k_1=10000$

Nie mniej jednak, uchyb $\Delta c_{Je\%}$ nie jest równy zero, tak jak to przedstawiono na rysunku 15. Niezerowa wartość uchybu wynika z tego, że sygnał uchybu wspólnego Δe , przedstawiony na rysunku 11, podlega operacji czasowo – zależnej w integratorze C i jest nieznacznie opóźniony w fazie z sygnałem uchybu regulacji prądu Δi_r . Opóźnienie to jest tym mniejsze im większe jest wzmacnienie estymatora k_1 (mniejsza stała czasowa), co uzasadnia przyjęcie tak dużej wartości również aż 10000 w badaniach symulacyjnych.

Wnioski

W pracy zaproponowano nową wersję estymatora podsystemu elektromechanicznego z obwodem pierwszego rzędu do estymacji zastępczego momentu bezwładności układu mechanicznego składającego się z silnika i układu mechanicznego sprzężonego z silnikiem. Wyjaśniono, że głównym źródłem powstawania błędów w oszacowaniu momentu bezwładności są niezerowy uchyb regulacji prądu wywołany zmianami siły elektromotorycznej silnika oraz oscylacyjny charakter prądu silnika wywołany przełączanym charakterem pracy przekształtnika tranzystorowego. Zdefiniowano względną uchyb estymacji współczynnika bezwładności oraz uzależniono go formalnie od uchybu

regulacji prądu oraz wartości prądu dynamicznego (wartości przyspieszenia ruchu). Słuszność tej zależności potwierdzono za pomocą wyników symulacji przeprowadzonych w warunkach zmieniającej się siły elektromotorycznej (prędkości) oraz przy dwóch wartościach prądu dynamicznego i_{dm} .

W wyniku badań symulacyjnych, na rysunku 12 ujawniono chwile, w których błąd estymacji współczynnika bezwładności jest najmniejszy. Informację tę wykorzystano praktycznie do modyfikacji estymatora poprzez dodanie do jego konstrukcji podsystemu rafinacji danych. Wykazano, że tak zmodyfikowany estymator charakteryzuje się stukrotnie mniejszym błędem względną współczynnika bezwładności, niż estymator bez tej modyfikacji.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy statutowej nr S/WE/1/2018 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.

Autor: dr inż. Andrzej Andrzejewski, Politechnika Białostocka, Katedra Energoelektroniki i Napędów Elektrycznych, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok, E-mail: a.andrzejewski@pb.edu.pl

LITERATURA

- [1] Pajchrowski T., Kogut W., Adaptacyjne sterowanie neuronowym regulatorem prędkości dla napędu bezpośredniego z silnikiem PMSM, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr.5, 34-39
- [2] Drożdż K., Zastosowanie rozmytego bezładowego filtra Kalmana w adaptacyjnej strukturze sterowania układu dwumasowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr.5, 150-155
- [3] Kamiński M., Adaptacyjny regulator neuronowy dla układu dwumasowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr.4, 175-180
- [4] Kamiński M., Zastosowanie algorytmu BAT w optymalizacji obliczeń adaptacyjnego regulatora stanu układu dwumasowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr.1, 300-304
- [5] Colombo R., Bianchi M., Sensor-less Estimation of Frictions and Moment of Inertia of a Stepper Motor in a Machining Device, *IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*, (2017), 1-5
- [6] Drożdż K., Zastosowanie bezładowego filtra Kalmana w sterowaniu adaptacyjnym układu dwumasowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr.5, 191-196
- [7] Popenda A., Mathematical modelling of induction motor with a saturated magnetic circuit during changes in moment of inertia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr.12, 201-204
- [8] Lee K. B., Song J. H., Choy I., Yoo J. Y., An Inertia Identification Using ROELO for Low Speed Control of Electric Machine, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '03*, (2003), vol. 2, 1052 - 1055
- [9] Zarringhalam R., Rezaeian, A., Melek W., Khajepour A., Chen S., Moshchuk N., A Comparative Study on Identification of Vehicle Inertial Parameters, *IEEE American Control Conference Fairmont Queen Elizabeth, Montreal, Canada*, (2012), 3599 - 3604
- [10] Liu K., Zhu Z., Fast Determination of Moment of Inertia of Permanent Magnet Synchronous Machine Drives for Design of Speed Loop Regulator, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 25, n. 5, (2017), 1816 - 1824
- [11] Andrzejewski A., The modified electromechanical subsystem estimator, *XIII Konferencja Wybrane zagadnienia elektrotechniki i elektroniki, WZEE'2016, Rzeszów*, (2016), CDROM
- [12] Kaczmarczyk Z., Zellner M., Frania K., Straty mocy i rezystancja zastępcza związane z przeładowywaniem nieliniowej pojemności wyjściowej tranzystora MOSFET, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), nr.3, 55-59