

Wojciech Jarzyna
Politechnika Lubelska, Lublin

DIAGNOSTYKA NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH W OPARCIU O STRUKTURY OBSERWATORÓW ODSPRZĘGAJĄCYCH

DIAGNOSIS OF ELECTRIC DRIVE SYSTEMS BASED ON DECOUPLED OBSERVERS

Abstract: The paper presents method of diagnosis which make possible fast and precision evaluation of technical state of electrical drive systems in a real-time mode. Inefficiencies are represented by failure signals, whose sources can be input, structure and output faults. The main accent is focused on possible application of observer procedures which can decouple fault signals during estimation of system variables. The calculated products of computed and measured variables determine diagnostic residuals which can precisely indicate a source of failure. Diagnostic observers filter unknown expected signals of selected faults and from the other hand, they taken into account an influence of these faults through implementation of controlled feedback loop.

1. Wprowadzenie

Potrzeba zachowania wysokich parametrów jakościowych oraz wymagania uzyskania dobrych wskaźników efektywności produkcji, stwarzają konieczność wykonywania diagnozy układu napędowego bez jego zatrzymywania. Do najczęściej stosowanych metod diagnostycznych zalicza się:

- układy monitorowania,
- układy ekspertowe,
- specjalistyczne stanowiska badawcze.

Układy monitorowania charakteryzują się dużą liczbą osprzętu pomiarowego i rejestrującego. Sygnały alarmowe generowane są w przypadkach przekroczenia rejestrowanych wielkości a decyzję o kwalifikacji zdarzenia podejmuje człowiek - ekspert. Doposażenie tego typu układów w bazę reguł i system wnioskowania czyni go autonomicznym, klasyfikując taki układ do systemów ekspertowych.

Szczególne znaczenie w napędzie elektrycznym zyskały specjalistyczne stanowiska badawcze wykorzystujące metody analizy częstotliwościowej. Metody te mają szerokie zastosowanie do identyfikacji niesymetrii elektrycznych, magnetycznych i kinetycznych. Bazują one na szczegółowych wynikach badań analityczno-symulacyjnych złożonych modeli matematycznych bądź modeli fizycznych maszyn elektrycznych i maszyn roboczych. Na ich podstawie określane są widma częstotliwościowe wybranych wielkości pomiarowych. Metody te znalazły szerokie zastosowanie w diagnostyce silników elektrycznych [3, 6, 9, 10], układów

maszynowych [9] i przekształtników energoelektrycznych [1].

Wymienione metody są skuteczne do identyfikacji uszkodzeń, których rozpoznanie nie wymaga szybkiej odpowiedzi, tj. odpowiedzi w czasie akceptowalnym przez przekształtniki energoelektryczne oraz układy sterowania i regulacji (z reguły rzędu $\sim 10^0 \div 10^1$ ms). Ponadto, takie rozwiązania są drogie i najczęściej realizowane indywidualnie dla potrzeb konkretnego napędu elektrycznego.

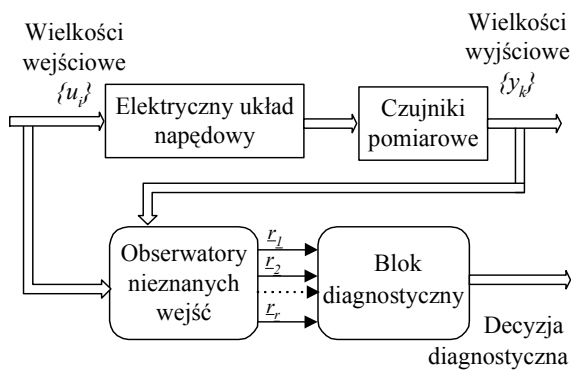
W związku z tym, poszukiwania nowej metody diagnostycznej skierowano w kierunku wykorzystania struktur znanych z układów automatycznej regulacji. Interesujące własności zaobserwowano stosując estymatory i obserwatory z wejściami odsprzęgającymi. Ich wybrane własności przedstawiono w niniejszym artykule.

2. Idea układów diagnostycznych z obserwatorami odsprzęgającymi

Struktury obliczeniowe obserwatorów zmiennych stanu pozwalają odtworzyć niedostępne pomiarowo wielkości lub skontrolować poprawność wybranych przebiegów przejściowych. Zastosowanie ich w układach diagnostycznych ogranicza konieczność stosowania specjalistycznej aparatury pomiarowej, zwiększając tym samym niezawodność funkcjonowania układu.

W odróżnieniu od sprzętowych systemów monitorowania, obliczeniowe układy diagnostyczne wykorzystują liczne procedury matematyczne i różnorodne narzędzia przetwarzania

nia. Sposób realizacji tych procedur zależy w dużej mierze od wymagań w zakresie szybkości przetwarzania danych. W wielu przypadkach zmienne obliczeniowe konstruuje się z uwzględnieniem potrzeb układu sterowania. Układy takie muszą wówczas spełniać ostre wymagania pracy w czasie rzeczywistym oraz wymagania obsługi algorytmów regulacji i procedur wnioskowania. Trudne do spełnienia warunki czasowe, układy takie realizują w oparciu o systemy procesorów sygnałowych oraz poprzez zastosowanie metod równoległego przetwarzania danych w sieciach neuronowych [12].



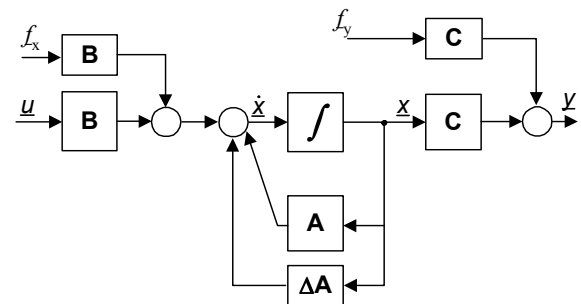
Rys.1. Ogólna struktura układu diagnostycznego z analitycznym odtwarzaniem wybranych zmiennych za pomocą algorytmów obserwatorów odsprzęgających

Szczególną właściwością tych układów jest możliwość odsprzęgania ich względem wybranych cech odtwarzanego systemu. Ogranicza się w ten sposób wrażliwość układu obliczeniowego na określone typy uszkodzeń zewnętrznych lub wewnętrznych. Uzyskanie takich właściwości zależy od wzajemnej struktury macierzy transpozycji wejść lub wyjść oraz macierzy sterowań i macierzy stanu.

Formuły matematyczne zastosowanych obserwatorów oparte są o algorytmy zmiennych stanu. Niezmiernie istotną sprawą jest reprezentacja uszkodzeń diagnozowanego obiektu. Biorąc pod uwagę wpływ badanego uszkodzenia na model matematyczny, wyróżnia się uszkodzenia proste – addytywne i uszkodzenia złożone – multiplikatywne.

Uszkodzenia addytywne przedstawia się jako dodatkowe sygnały na sumatorach wejść lub wyjść. Pod względem fizycznym mogą one obejmować między innymi uszkodzenia układów zasilania oraz uszkodzenia czujników pomiarowych.

Uszkodzenia multiplikatywne mają złożony wpływ na postać matematyczną. Jedną z form reprezentacji tych uszkodzeń jest zmiana struktury macierzy stanu. Równoznaczne jest to z pojawieniem się dodatkowych nieliniowych oddziaływań względem wybranych zmiennych stanu. Graficzne reprezentacje przedstawianych opisów ilustruje rys.2.



Rys.2. Sygnałowa reprezentacja uszkodzeń układu napędowego modelowanego układem równań stanu.

Do modelowania stanów przejściowych, w prezentowanej metodzie, wykorzystuje się modele matematyczne układu napędowego bazujące na równaniach różniczkowych zmiennych stanu. Warunkiem ograniczającym złożoność modeli jest czas wykonywania obliczeń symulacyjnych.

Zapewnienie działania systemu diagnostycznego układu napędowego w warunkach czasu rzeczywistego jest jednym z podstawowych wymagań badanych struktur diagnostycznych. Powoduje to konieczność stosowania takich procedur modelujących, które nie będą powodować opóźnień w działaniu układu przekształtnikowego oraz układu automatycznej regulacji. Z konieczności operują one ograniczoną liczbą zmiennych. Ich charakterystyczną cechą jest wykorzystywanie metod i technik obliczeniowych stosowanych w teorii sterowania.

Biorąc pod uwagę wymienione względy, opis matematyczny nie może być zbyt rozbudowany a zjawiska drugorzędne, dla badanych własności diagnostycznych, są pomijane. Ponadto, dzięki problemowemu ukierunkowaniu badań tylko dla określonych typów uszkodzeń, modele diagnostyczne zachowują dużą selektywność na wyróżnione awarie. Ich charakterystyczną cechą, wynikającą z doboru układów równań, jest mała wrażliwość na zakłócenia i efekty dodatkowe związane ze złożonym oddziaływaniem elektromagnetycznym stojana i wirnika.

Zapis równań stanu dla tego modelu uwzględnia:

- zmianę wielkości wymuszających wyrażoną przez iloczyn $\mathbf{B}f_x$, gdzie f_x określa uszkodzenia wejścia, które względem układu napędowego mają addytywny charakter. Na uszkodzenia te składają się uszkodzenia torów zewnętrznych f_{xa} lub uszkodzenia struktur wejścia $\Delta\mathbf{B}$ (1):

$$\mathbf{B}f_x(t) = \mathbf{B}f_{xa}(t) + \Delta\mathbf{B}u(t) \quad (1)$$

- zmianę struktury układu zapisywaną jako dodatkową macierz stanu $\Delta\mathbf{A}$, reprezentującą uszkodzenia struktury diagnozowanych elementów układu napędowego.

Równania stanu diagnozowanego obiektu wyrazić można zależnościami (2).

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}}(t) = (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\underline{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{B}f_x(t) \\ \underline{y}(t) = \mathbf{C}\underline{x}(t) + \mathbf{C}f_y(t) \end{cases} \quad (2)$$

Uszkodzenia wyjścia (3) określa się podobnie jak wcześniej zdefiniowane uszkodzenia wejściowe:

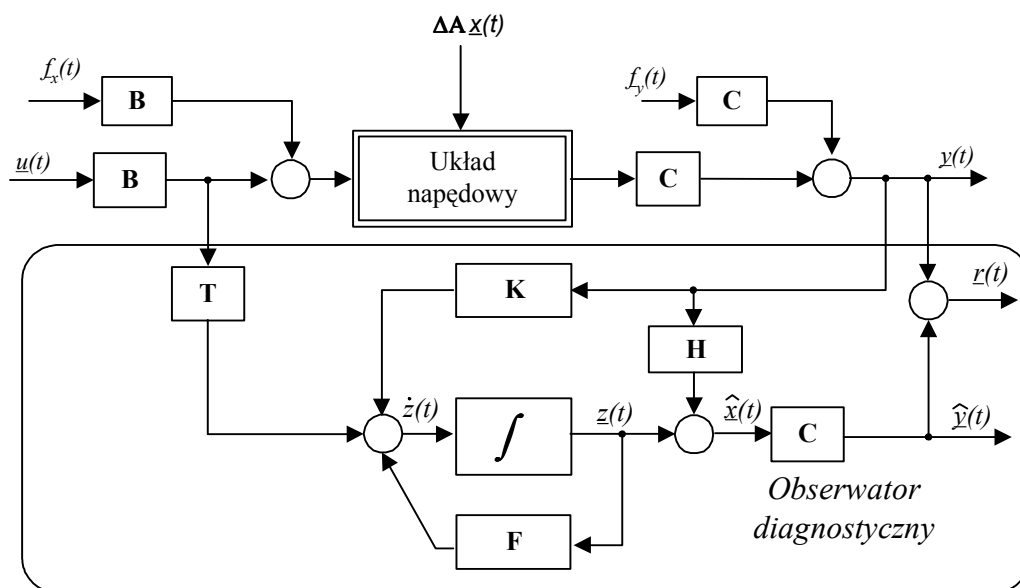
$$\mathbf{C}f_y(t) = \mathbf{C}f_{ya}(t) + \Delta\mathbf{C}\underline{x}(t) \quad (3)$$

Przedstawiony model uwzględnia zmianę warunków działania układu napędowego. Zmienione warunki odpowiadać mogą awaryjnym stanom pracy jego podzespołów. Celem obliczeń numerycznych jest określenie, które z modelowanych źródeł jest aktywne, a które nie zmieniło swoich parametrów początkowych. Problemy te można rozwiązać między innymi stosując obserwatory odsprzęgające, których zasady konstruowania przedstawiono poniżej.

3. Warunki odsprzęgania od wybranych uszkodzeń

Istotną własnością takich układów jest możliwość odsprzęgania obliczanych estymat od niedokładności parametrycznej modelu spowodowanej nieliniowością układu, błędną identyfikacją obiektu czy nawet powstałą awarią jednego z diagnozowanych elementów.

Podstawą do realizacji wyżej wymienionych wymagań jest ogólny schemat obliczeń obserwatora Luenbergera [7, 8, 11]. Szczegółowe własności, odpowiadające za odsprzęganie zakłóceń, uzyskano dzięki technikom obserwatorów nieznanych wejść i obserwatorów odpornych na fluktuacje parametrów układu [2, 4, 5]. Jedną z metod uzyskiwania informacji nadmiarowej (redundancyjnej) jest numeryczne jej odtwarzanie. Odtwarzanie takie można zrealizować w strukturze obserwatora odsprzężonego. Jego struktura przedstawiona jest na rys.3.



Rys.3. Układ napędowy z obserwatorem nieznanych wejść

W przypadku braku zakłóceń i niewystępowania awarii, projektowany obserwator reprezentowany przez wektor $\underline{z}(t)$, a obliczony na podstawie tego wektora uchyb diagnostyczny (residuum diagnostyczne) $\underline{r}(t)$ powinien być zbieżny do zera.

Własność taka jest możliwa do uzyskania dzięki wprowadzeniu dodatkowych macierzy transpozycji dla wielkości wejściowych \mathbf{T} i dla wielkości wyjściowych \mathbf{H} , które umożliwiają odsprzężenie obserwatora od nieznanymi zakłóceń. Przyjmując, że wektorem stanu obserwatora jest wektor $\underline{z}(t)$, równania przedstawić można za pomocą zapisu (4) [2].

$$\begin{cases} \dot{\underline{z}}(t) = \mathbf{F}(t)\underline{z}(t) + \mathbf{K}\underline{y}(t) + \mathbf{T}\mathbf{B}\underline{u}(t) \\ \hat{\underline{x}}(t) = \underline{z}(t) + \mathbf{H}\underline{y}(t) \\ \hat{\underline{y}}(t) = \mathbf{C}\hat{\underline{x}}(t) \\ \underline{r}(t) = \underline{y}(t) - \hat{\underline{y}}(t) \end{cases} \quad (4)$$

Wielkością wyjściową obserwatora jest wektor residuum diagnostycznego $\underline{r}(t)$ należące do przestrzeni stanów awaryjnych R^k , który określa aktualny stan diagnozowanych cech układu napędowego.

3.1. Zasady rozpoznawania uszkodzeń

Wyznaczając wektor obserwatora diagnostycznego $\underline{z}(t)$ oraz estymatę wektora wyjścia $\hat{\underline{y}}(t)$ zakłada się, że dla sprawnego układu napędowego różnica wektorów zmiennych stanu i estymaty zmiennych stanu, jak również różnica wektorów wyjścia i estymaty wyjścia, są zbieżne do zera. Definiuje je zależność (5).

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \underline{e}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (\underline{x}(t) - \hat{\underline{x}}(t)) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \underline{r}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (\underline{y}(t) - \hat{\underline{y}}(t)) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Analizując uzyskane wyniki, ze względu na warunki diagnozowania, wyróżnia się trzy przypadki, dla których uchyb diagnostyczny $\underline{r}(t)$ jest zbieżny do zera (6).

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \underline{r}(t) = 0 \Rightarrow \begin{cases} 1) \text{ brak uszkodzeń } \{\Delta\mathbf{A}, f_x, f_y\} = 0 \\ 2) \text{ znane są rzeczywiste wartości } \\ \quad \{\Delta\mathbf{A}, f_x, f_y\} \\ 3) \text{ obserwator jest niezależny od } \\ \quad \text{nieznanymi wartości } \{\Delta\mathbf{A}, f_x, f_y\}, \\ \quad \text{ale znany jest wpływ uszkodzeń} \\ \quad \text{na podstawie wyników pomiarów} \end{cases} \quad (6)$$

W pierwszym przypadku diagnozowany układ jest wolny od uszkodzeń i istotnych zakłóceń, które mogą wpłynąć na wynik obliczeń modelu. W przypadku różnych sygnałów zadających na wejściu układu napędowego i układu obserwatora oraz dysponowania nieadekwatnym modelem, uchyby $\underline{e}(t)$ i $\underline{r}(t)$ wskażą niezerowe wartości. Wyjątkiem jest przypadek drugi, w którym założono istnienie dobrze zidentyfikowanych, popartych szczegółowymi informacjami, uszkodzeń. W konsekwencji diagnostyka takiego układu jest już zbędna.

Trzeci przypadek wykorzystywany jest w modelach z odsprzężaniem uszkodzeń. Nie dysponując informacją o zaistniałych uszkodzeniach, można uzyskać zbieżny do zera uchyb diagnostyczny poprzez selektywną filtrację wejść i sprzężeń zwrotnych.

Wyznaczając wektor obserwatora diagnostycznego $\underline{z}(t)$ oraz estymatę wektora wyjścia $\hat{\underline{y}}(t)$ zakłada się, że dla sprawnego układu napędowego różnica wektorów zmiennych stanu i estymaty zmiennych stanu, jak również różnica wektorów wyjścia i estymaty wyjścia, są zbieżne do zera.

3.2. Zasady odsprzęgnięcia obserwatora

Jedną z metod stosowaną przy poszukiwaniu możliwości selektywnej identyfikacji uszkodzeń jest konstrukcja obserwatora odpornego na określone typy zakłóceń i awarii. Cechą takiego obserwatora jest brak wrażliwości na określone zmiany sygnałów addytywnych i błędy modelowania.

Realizacja schematu obliczeniowego obserwatora diagnostycznego, zgodnie z wzorami (4.2) oraz rys.4.1, umożliwi uzyskanie takich własności. Uszkodzenia toru wejściowego mogą być odsprężone, jeżeli odpowiednie wiersze macierzy transpozycji \mathbf{T} lub iloczynu macierzy \mathbf{CT} będą ortogonalne względem kolumn macierzy sterowań \mathbf{B} (7).

$$\mathbf{CTB} = 0 \quad (7)$$

Macierz transpozycji wejścia \mathbf{T} , w takim przypadku, pełni rolę filtru dla określonej pozycji wektora wymuszeń a macierz sprzężeń zwrotnych \mathbf{K} dostarcza wymaganych informacji o rzeczywistych cechach układu napędowego. Należy zwrócić uwagę, że poprzez sprzężenie zwrotne przekazywana jest informacja o rzeczywistym układzie wraz ze wszystkimi zakłóceniami i uszkodzeniami. Ponadto, sprzę-

żenie zwrotne \mathbf{K} kierunkowo wzmacnia lub osłabia niektóre z cech układu, znacząco wpływając na dynamikę i amplitudę uchybu diagnostycznego.

Analogicznie, odsprężenie od określonych uszkodzeń typu strukturalnego może być wyeliminowane, jeżeli spełniona będzie zależność (8).

$$\mathbf{CT}\Delta\mathbf{A} = 0 \quad (8)$$

Aby wyeliminować wpływ określonych wyjść na odtwarzany wektor wyjścia, macierz sprzężeń zwrotnych \mathbf{K} wyraża się jako sumę $\mathbf{K}=\mathbf{K}_1+\mathbf{K}_2$, przy czym warunek macierzy stanu obserwatora określa się na podstawie zależności (9),

$$\mathbf{F} = \mathbf{TA} - \mathbf{K}_1\mathbf{C} \quad (9)$$

a warunek odsprężenia od błędów pomiarowych warunek (10).

$$\mathbf{C}(\mathbf{FH} - \mathbf{K}_2) = 0 \quad (10)$$

Warunki odsprężenia układu obliczeniowego od błędów dynamicznych toru pomiarowego określa natomiast formuła (11).

$$(\mathbf{I} - \mathbf{CH})\mathbf{C} = 0 \quad (11)$$

Należy zwrócić uwagę, że wymienione cechy eliminujące wpływ poszczególnych źródeł zakłóceń projektuje się indywidualnie dla różnych obserwatorów. Tym samym uzyskuje się wymaganą selektywność i wrażliwość na uszkodzenia.

5. Podsumowanie

Badania eksperymentalne przeprowadzono w układzie ze zmiennoprzecinkowym procesorem TMS320C31. Ich realizacja wymagała zastosowania modeli matematycznych spełniających funkcje estymatorów i obserwatorów odsprężających. Uzyskane rezultaty dały obiecujące perspektywy dla dalszych prac badawczych, które mogą być zastosowane w praktyce.

6. Literatura

- [1]. Bolopion A., Rognon J.P., Roye D.: *The use of microprocessors for control and fault detection of electronic power converters. Contribution to safety and maintainability*. IFAC Control in Power Electronics and Electrical Drives. Lausanne, Switzerland 1983.
- [2]. Chen Jie, Patton R.J.: *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [3]. Dierżanowski A., Hickiewicz J., Szymaniec S., Wach P.: *Diagnostyka układów napędowych wspomagana komputerowo*. Z.N. WSI w Opolu, Seria Elektryka z.32, 1991.
- [4]. Isermann R., Balle P.: *Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes*. Control Engineering Practice, Vol.5. 1997 Pergamon.
- [5]. Jarzyna W.: *Diagnostyka w czasie rzeczywistym układu napędowego*. Komitet Elektrotechniki PAN. Seria Postępy Napędu Elektrycznego I Energoelektroniki. Z.50. 2003
- [6]. Jarzyna W.: *Diagnostic characteristics of axial flux in an induction machine*. IEE Int. Conference on Electric Machines and Drives. U.K., September 1995. IEE Publication No. 412.
- [7]. Luenberger D.G.: *An introduction to observers*. IEEE Trans. On Autom. Control. V.16, No.6,1971.
- [8]. Orłowska-Kowalska T.: *Obserwatory zmiennych stanu i parametrów w układach sterowania silników indukcyjnych klatkowych*. Prace Instytutu Układów Elektromaszynowych Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1990.
- [9]. Penman J., Dey M.N., Tait A.J., Bryan W.E.: *Condition monitoring of electrical drives*. IEE Proceedings, vol.133, Pt.B, No.3, 1986.
- [10]. Sobczyk T., Weinreb K.: *A general approach to on-line current-based diagnostics of induction motors*. XXXII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Kraków 1996.
- [11]. Tarantino Rocco, Szigeti Ferenc, Colina_Morles Eliezer: *Generalized Luenberger Observer-Based Fault-Detection Filter Design: An Industrial Application*. Control Engineering Practice 8. 2000. Pergamon.
- [12]. Yasuhiko Dote, Hoft R.G.: *Control and diagnosis for ac drives and UPS systems using soft computing*. Proceedings of PCC Nagaoka'97.

Prezentowane wyniki opracowane zostały w znacznej mierze podczas realizacji projektu badawczego KBN 8T10A 027 19 pt.: Szczegółowe opracowanie metod identyfikacji cech diagnostycznych w układzie napędowym z silnikiem indukcyjnym.