

Ryszard PORADA*
Adam GULCZYŃSKI*

STEROWANIE ENERGOELEKTRONICZNYM ŹRÓDŁEM NAPIĘCIA Z ZASTOSOWANIEM REGULATORÓW UŁAMKOWYCH

Tradycyjne metody sterowania układów energoelektronicznych nie umożliwiają uzyskania wymaganej obecnie wysokiej jakości sygnałów wyjściowych. W pracy przedstawiono ogólną charakterystykę klasycznych oraz współczesnych metod wykorzystujących w sterowaniu regulatory ułamkowe. Omówiono algorytmy tych regulatorów i opisano możliwości ich zastosowania do sterowania niezależnym energoelektronicznym źródłem napięcia. Przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych takiego układu, dla różnych typów sygnałów zadanych.

SŁOWA KLUCZOWE: energoelektronika, niezależne źródła napięcia, sterowanie ułamkowe

1. WPROWADZENIE

Przekształcanie energii elektrycznej pobieranej z dostępnych technicznie źródeł energii o określonym napięciu/prądzie i częstotliwości, na napięcie/prąd i częstotliwość wymagane przez odbiorniki energii elektrycznej, a także sterowanie przepływem tej energii jest głównym zadaniem układów energoelektronicznych. Przekształtniki te powinny kształtować sygnały wyjściowe napięcia/prądu w sposób optymalny ze względu na zadania realizowane przez odbiornik.

Pracujące jako niezależne źródła napięcia i prądu układy energoelektroniczne znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach specjalnych (m.in. generatory energetycznych przebiegów wzorcowych), układy realizujące np. optymalne sterowanie napędów elektrycznych, jako bloki wykonawcze w układach aktywnej kompensacji [10], a także źródła prądu stosowane w magnetoterapii [9].

Do sterowania takimi układami nadal wykorzystuje się klasyczne regulatory PID (szczególnie w wersji cyfrowej), jako dobrze znane i szeroko stosowane w praktycznych rozwiązaniach ze względu na skuteczność, odporność oraz stosunkowo proste metody strojenia parametrów regulatora dla uzyskania optymalnych odpowiedzi obiektu. Od kilkunastu lat coraz częściej stosowana jest także niekonwencjonalna technika sterowania, znana jako sterowanie rzędu

* Politechnika Poznańska.

ułamkowego [5, 6, 8] ze względu na możliwość zwiększenia jakości sterowania, a tym samym polepszenia jakości sygnałów wyjściowych.

W pracy przedstawiono badania układu zamkniętego niezależnego energoelektronicznego źródła napięcia. Porównanie regulatora klasycznego (dobranego według kryterium modułu) z regulatorem ułamkowym wykonano dla tego samego układu, o tych samych parametrach. Przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych dla różnych typów sygnałów zadanych oraz różnych warunków obciążenia.

2. REGULATORY UŁAMKOWE $PI^{(\nu)}D^{(\mu)}$

Klasyczne regulatory o działaniu proporcjonalno-całkująco-różniczkującym (PID) [1, 2, 3] są od kilkadziesiąt lat stosowane w układach automatycznej regulacji. Idealną postacią tych regulatorów opisuje transmitancja:

$$G_R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_D \right) \quad (1)$$

gdzie: K_p – współczynnik wzmocnienia, T_i – stała całkowania (czas zdwojenia), T_D – stała różniczkowania (czas wyprzedzenia).

Parametry klasycznych regulatorów PID są dobierane według kryteriów jakości regulacji [1, 2], do których należą m.in: kryteria zapasu stabilności, kryteria rozkładu pierwiastków równania charakterystycznego, kryteria czasowe, kryteria częstotliwościowe czy kryteria całkowite.

Obecnie coraz większe zainteresowanie budzą regulatory PID, w których procedury całkowania i różniczkowania odbywają się według algorytmów niecałkowitych rzędów [5, 6, 8]. Takie regulatory opisuje transmitancja niecałkowitego rzędu:

$$G_R^{PI^{\nu}D^{\mu}}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s^{\nu}} + T_D s^{\mu} \right) \quad (2)$$

gdzie oprócz wyżej wymienionych parametrów K_p, T_i oraz T_D dochodzą jeszcze dwa: ν – rząd całkowania oraz μ – rząd różniczkowania. Możliwość tę stwarza uogólnienie operacji całkowania i różniczkowania dla niecałkowitego (ułamkowego) rzędu.

Dla zastosowań praktycznych w automatyce stosowane są metody transformaty Laplace'a. Transformata ułamkowa Laplace'a w sensie definicji pochodnych i całek niecałkowitego rzędu, wymaga zastosowania odpowiednich metod aproksymacji [7, 8]. Proponowane są różne metody aproksymacji takiego wyrażenia w czasie ciągłym oraz dyskretnym [8, 10, 11].

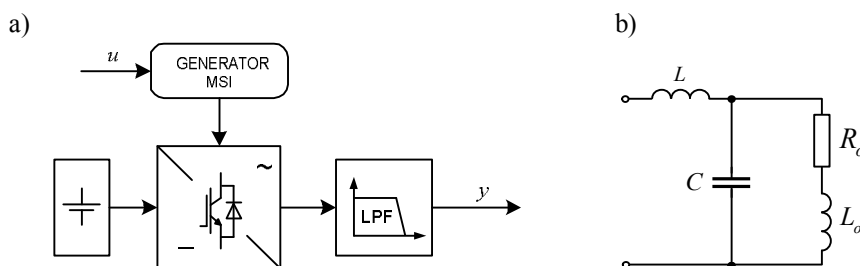
Dla takich regulatorów nie opracowano jeszcze jednoznacznych reguł strojenia. Najczęściej dla ilościowej oceny właściwości dynamicznych układu bada się

odpowieź na skok jednostkowy przy uwzględnieniu różnych wskaźników, m.in. zerowego błędu regulacji, zapasu fazy i wzmocnienia, odporności na zmiany wzmocnienia obiektu, odporności na szумы wysokiej częstotliwości czy minimalnego odkształcenia sygnału wyjściowego [6, 7, 9].

3. STRUKTURA FALOWNIKA NAPIĘCIA

Możliwość zastosowania regulatorów ułamkowych przetestowano na przykładzie 1-fazowego niezależnego źródła napięcia w środowisku Matlab®/Simulink®.

Części składowe energoelektronicznego źródła napięcia pokazano na rysunku 1. Na wyjściu falownika zastosowano filtr dolnoprzepustowy LPF. Sygnał sterujący u jest generowany przez regulator; sygnał y jest sygnałem na wyjściu energetycznym falownika.



Rys. 1. Struktura blokowa: a) części energetycznej niezależnego źródła napięcia oraz b) filtr wyjściowy (LPF) 2-go rzędu z gałęzią odbiornikową $R_o L_o$

Badania miały na celu określenie skuteczności odwzorowania sygnału zadanego (napięcia wyjściowego na gałęzi odbiornikowej $R_o L_o$) dla następujących parametrów układu: napięcie zasilania falownika 400 [V], częstotliwość nośna modulacji MSI , $f_{PWM} = 12,5$ kHz, modulacja MSI unipolarna. Przyjęte parametry dolnoprzepustowego filtra wyjściowego (Rys. 1b) wynoszą: $L = 250$ [μ H], $C = 15$ [μ F], natomiast parametry odbiornika: $U_N = 230$ [V], $I_N = 10$ [A], $P_o = 2$ [kW], $\cos\varphi_N = 0,85$ [-].

4. WYZNACZENIE STRUKTURY REGULATORA

Przedmiotem badań będzie przekształtnik przedstawiony blokowo na rysunku 1. Dobór regulatora struktury regulatora przeprowadzono na podstawie typowego kryterium optimum modułu [1, 2], dla którego transmitancja układu zamkniętego ma postać:

$$G_z(s) = \frac{1}{2\sigma^2 s^2 + 2\sigma s + 1} \quad (3)$$

gdzie σ jest najmniejszą stałą czasową układu. Transmitancję obiektu składającego się z filtra wyjściowego 2-go rzędu oraz gałęzi odbiornikowej typu R_oL_o przedstawia wyrażenie:

$$G_F(s) = \frac{\omega_0^2(s + \alpha_o)}{s^3 + \alpha_o s^2 + \beta_o \omega_0^2 s + \alpha_o \omega_0^2} \quad (4)$$

przy czym:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad \alpha_o = \frac{R_o}{L_o}, \quad \beta_o = \frac{L + L_o}{L_o}$$

Przekształtnik opisano jako człon opóźniający $e^{-s\tau}$, który po aproksymacji 1-go rzędu wyraża wzór:

$$G_M(s) = E e^{-s\tau} \approx \frac{E}{\tau s + 1} \quad (5)$$

gdzie τ jest czasem opóźnienia wnoszonym przez przekształtnik. Ostatecznie obiekt sterowania ma transmitancję:

$$G_o(s) = \frac{E\omega_0^2}{\tau} \frac{1}{(s + 1/\tau)} \frac{(s + \alpha_o)}{(s^3 + \alpha_o s^2 + \beta_o \omega_0^2 s + \alpha_o \omega_0^2)} \quad (6)$$

Transmitancję regulatora, dla jednostkowego sprzężenia zwrotnego, wyznaczono na podstawie wyrażenia:

$$G_R(s) = \frac{G_z(s)}{(1 - G_z(s))G_o(s)} \quad (7)$$

skąd po uwzględnieniu (3) i (6) uzyskano:

$$G_R(s) = W_1 s + W_0 + (W_{-1} + W_{-2}) \frac{1}{s} + \frac{W_{-3}}{s - s_1} + \frac{W_{-4}}{s - s_2} \quad (8)$$

gdzie współczynniki ($W_1 \div W_{-4}$) oraz s_1, s_2 są wyrażone przez odpowiednie parametry obiektu.

Wyrażenie (8) jest podstawą do uzyskania postaci ułamkowej regulatora zgodnie z zasadami aproksymacji przedstawionymi w [7, 8].

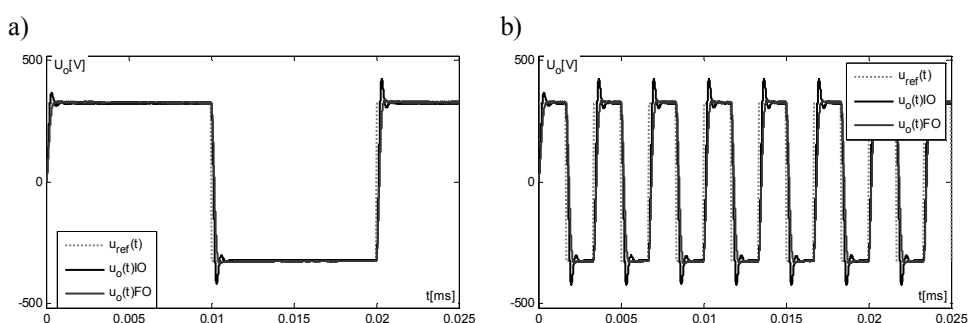
5. BADANIA SYMULACYJNE

Wyniki symulacji dla układu zamkniętego z regulatorem opisanym transmitancją $G_{R(IO)}(s)$ oznaczono jako $I_o(IO)$ gdzie IO oznacza całkowity rząd regulatora (ang. *Integer Order*). Wyniki symulacji oznaczone przez $I_o(FO)$ uzyskano w układzie zamkniętym z regulatorem niecałkowitego rzędu (FO – ang. *Fractional Order*) w którym rząd różniczkowania przyjęto $\nu_i = 1,08$.

Badania przeprowadzono dla różnych kształtów i parametrów sygnału zadanego. Na wszystkich rysunkach zastosowano jednakowe oznaczenia: linia

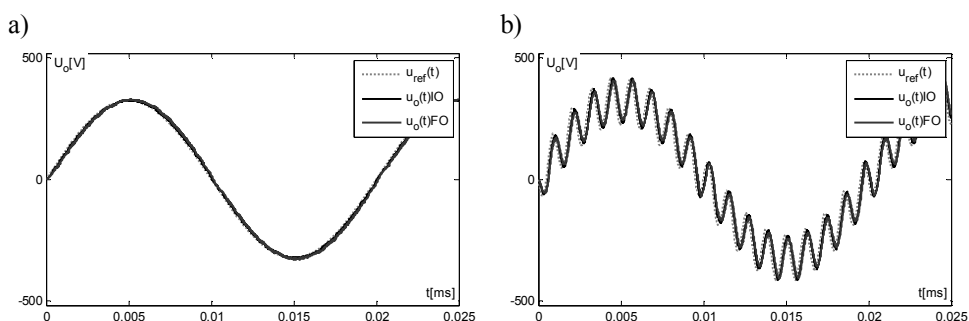
czarna kropkowana – sygnał zadany; linia czarna ciągła – napięcie wyjściowe w układzie z regulatorem ciągłym; linia czerwona ciągła – napięcie wyjściowe w układzie z regulatorem ułamkowym.

Na rysunkach 2 i 3 pokazano wybrane przebiegi napięcia wyjściowego układu dla przypadku sygnałów zadanych, odpowiednio: prostokątnego o amplitudzie $U_m = 325$ [V] oraz częstotliwości 50 Hz i 300 Hz, a także sinusoidalnego o parametrach $U_m = 325$ [V], $f = 50$ Hz oraz odkształconego sygnału zadanego (1-sza i 17-ta harmoniczne).



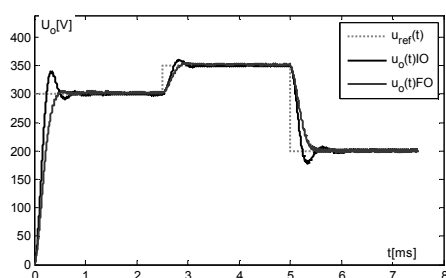
Rys. 2. Przebiegi napięcia wyjściowego dla prostokątnego sygnału zadanego: amplituda napięcia $U_m = 325$ A; a) częstotliwość $f = 50$ Hz, b) częstotliwość $f = 300$ Hz

Przebieg prostokątny jako sygnał o dużej dynamice jest dobrym narzędziem testowania dynamiki sterowania oraz jakości odwzorowania sygnału zadanego. W analizowanym przypadku, dla zadanego przebiegu prostokątnego, zarówno z regulatorem całkowitym, jaki i niecałkowitego rzędu, odpowiedź układu wskazuje na uzyskanie dobrej dynamiki. W przypadku regulatora ułamkowego odpowiedź ma nieco mniejszą dynamikę, zbliżony uchyb ustalony oraz większe tłumienie składowych o wyższych częstotliwościach jest (brak oscylacji oraz mniejsze przeregulowanie).

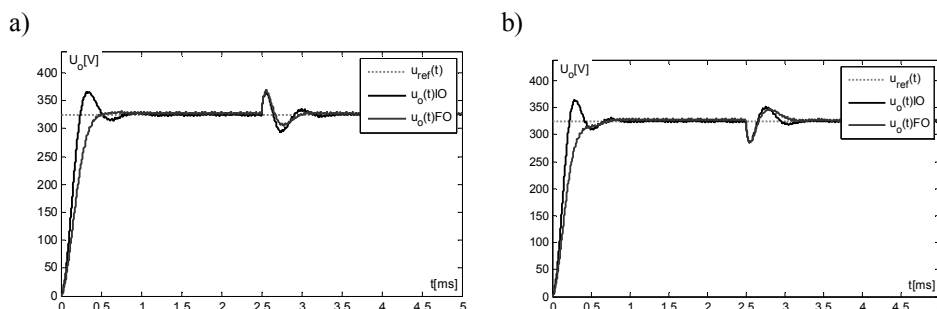


Rys. 3. Przebiegi napięcia wyjściowego dla sinusoidalnego sygnału zadanego: a) $U_m = 325$ V, $f = 50$ Hz; b) dodatkowo z 17-tą harmoniczną

Dla przebiegu sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz działanie układu z obydwoma typami regulatorów (całkowitego i ułamkowego rzędu) jest zbliżone. Również sygnał wieloharmoniczny jest odwzorowany z dobrą dynamiką. Uzyskana podobna jakość sterowania dla obu typów sterowania jest związana z mniejszą dynamiką sygnału zadanego. Na rysunku 4 pokazano reakcję układu zamkniętego na skokowe zmiany sygnału zadanego. W tym przypadku regulator ułamkowy zapewnia lepsze tłumienie odpowiedzi układu niż regulator ciągły.



Rys. 4. Odpowiedź układu na skok sygnału zadanego



Rys. 5. Odpowiedź układu na skok obciążenia: a) z obciążenia znamionowego do stanu jałowego; b) od stanu jałowego do obciążenia znamionowego

Rysunek 5 przedstawia reakcję układu zamkniętego na skokowe zmiany parametrów odbiornika. Również w tym przypadku przypadku regulator ułamkowy zapewnia lepsze tłumienie odpowiedzi układu.

6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono badania układu zamkniętego niezależnego energoelektronicznego źródła napięcia. Porównanie skuteczności działania regulatora klasycznego z regulatorem ułamkowym (określonego według kryterium modułu) wykonano dla tego samego układu, o tych samych parametrach. Wyniki badań symulacyjnych potwierdzają możliwość skutecznego wpływu regulatora ułamkowego na jakość procesów dynamicznych zachodzących w układzie przez polepszenie jego

dynamiki. Brak jednoznacznych reguł strojenia regulatorów ułamkowych znacząco utrudnia prawidłowy dobór rzędu operatorów skutkujący polepszeniem wskaźników dynamicznych odpowiedzi. Uzyskane wyniki wskazują także na potrzebę dalszych badań zastosowanego regulatora całkowitego oraz jego wersji ułamkowej, szczególnie dla bardziej złożonych transmitancji obiektu sterowania.

LITERATURA

- [1] Brzózka J., Regulatory i układy automatyki. MIKOM, Warszawa 2004.
- [2] Byrski W., Obserwacja i sterowanie w systemach dynamicznych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2007.
- [3] Grega W., Metody i algorytmy sterowania cyfrowego w układach scentralizowanych i rozproszonych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2004.
- [4] Gwóźdź M., Porada R.: Utilization of Wideband Power Electronics Current Sources in Generator of Spatial Magnetic Field. Proc. of 15th International Power Electronics & Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC'12 ECCE Europe, Novi Sad, Serbia, 1-3 September 2012, INVITED SPECIAL SESSION: "Power electronics in biomedical applications", LS5a (ISS-16)-666_EPE_2012.pdf, LS5a.2.1-5, (full paper on Conference CD-ROM).
- [5] Kosztołowicz T., Zastosowanie równań różniczkowych z pochodnymi ułamkowymi do opisu subdyfuzji. Wydawnictwo UH-P, Kielce 2008.
- [6] Ostalczyk P., Zarys rachunku różniczkowo-całkowego ułamkowych rzędów. Teoria i zastosowanie w automatyce. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2008.
- [7] Petráš I. Fractional-order feedback control of a dc motor. Journal of Electrical Engineering, vol. 60, no. 3, 2009, 117-128.
- [8] Podlubny I., Fractional Differential Equations, Academic Press, San Diego, 1999.
- [9] Porada R., Gulczyński A.: Badania porównawcze regulatorów klasycznych i ułamkowych w sterowaniu obiektów z opóźnieniem. Mat. XV Konf. „Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice”, ZKwE'12, PUT Academic Journal, Electrical Engineering, Poznań 2012, No. 71, ss. 109-116.
- [10] Monje C.A., Vinagre B.M., Feliu V., Chen Y.Q., Tuning and Auto-Tuning of Fractional Order Controllers for Industry Application, Control Engineering Practice 16 (2008), 798-812.
- [11] Vinagre B.M., Podlubny I., Hernandez A., Fe-Liu V., Some Approximations of Fractional Order Operators used in Control Theory and Applications, Fractional Calculus and Applied Analysis 3 No. 3 (2000), 231-248.

THE CONTROL OF POWER ELECTRONICS VOLTAGE SOURCE WITH APPLICATION OF FRACTIONAL REGULATORS

Traditional methods of control of power electronics systems do not enable to obtain required nowadays qualities of output signals. The work presents a general characteristics of classical and modern methods using in control discrete fractional regulators. We discussed algorithms of these regulators and described possibilities of their use to control independent power electronics voltage source. Selected simulation results of the system for different reference signals are also included.