

Ryszard PORADA*
Adam GULCZYŃSKI*

STEROWANIE ENERGOELEKTRONICZNYM ŹRÓDŁEM NAPIĘCIA Z ZASTOSOWANIEM REGULATORÓW DYSKRETNYCH

Tradycyjne metody analogowego sterowania pracujących jako niezależne układy energoelektroniczne nie dają możliwości uzyskania wymaganej obecnie wysokiej jakości sygnałów wyjściowych. W pracy przedstawiono ogólną charakterystykę klasycznych oraz współczesnych metod wykorzystujących w sterowaniu regulatory dyskretne. 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, falowniki napięcia, sterowanie dyskretne

1. WPROWADZENIE

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

Układy energoelektroniczne pracujące jako niezależne źródła napięcia i prądu znajdują zastosowanie w elektroakustyce, różnych dziedzinach specjalnych (m.in. generatory energetycznych przebiegów wzorcowych), układy realizujące np. optymalne sterowanie napędów elektrycznych, jako bloki wykonawcze w układach aktywnej kompensacji, a także źródła prądu stosowane w magnetoterapii [4, 6].

Sterowanie układami energoelektronicznymi pracującymi jako układy niezależne jest zagadnieniem trudnym ze względu na wykorzystywanie metod modulacji dyskretnej (np. PWM [6]). Sterowanie takimi układami metodami

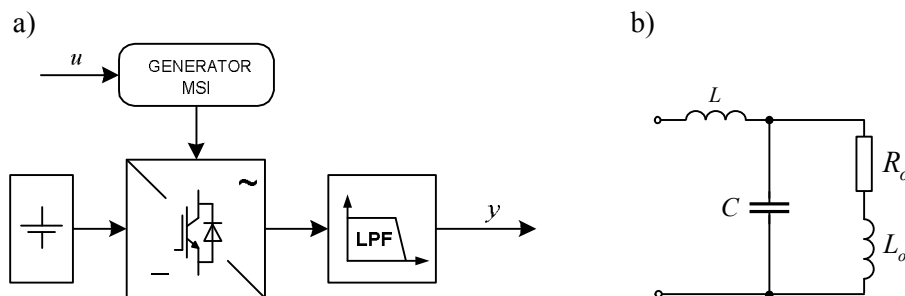
* Politechnika Poznańska.

analogowymi było realizowane z wykorzystaniem klasycznych regulatorów PID jako dobrze znanych i szeroko stosowanych w praktycznych rozwiązaniach ze względu na skuteczność, odporność oraz stosunkowo proste metody strojenia parametrów regulatora. Obecnie do zadań sterowania układów stosowana jest technika cyfrowa, umożliwiająca wykorzystanie różnych narzędzi (m.in. mikroprocesorów) [3, 6], dla uzyskania optymalnych odpowiedzi obiektu.

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

2. STRUKTURA FALOWNIKA NAPIĘCIA

Skuteczność działania regulatorów dyskretnych przetestowano na przykładzie 1-fazowego niezależnego źródła napięcia w środowisku Matlab®/Simulink®. Schemat blokowy energoelektronicznego źródła napięcia pokazano na rysunku 1. Na wyjściu falownika pracującego z modulacją MSI zastosowano filtr dolnoprzepustowy LPF o podstawowej strukturze drugiego rzędu (rys. 1b). 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_oL_o

Badania miały na celu określenie skuteczności odwzorowania sygnału zadanego (napięcia wyjściowego na gałęzi odbiornikowej R_oL_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], parametry odbiornika: $U_N = 230$ [V], $I_N = 10$ [A], $P_o = 2$ [kW], $\cos\varphi_N = 0,85$ [-].

3. REGULATOR CYFROWY

Regulator cyfrowy dobrano zgodnie z określonym modelem regulatora analogowego. Z wielu możliwości przedstawianych w teorii sterowania, przyjęto metodę „prototypowej” transmitancji układu zamkniętego [1, 2]. Oznacza to, że transmitancję analogową regulatora, przy założeniu jednostkowego sprzężenia zwrotnego, określa wyrażenie:

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

Tak zaprojektowany sterownik powinien całkowicie skompensować dynamiczne działanie sterowanego obiektu (odpowiada to zasadzie transmisji bez zniekształceń).

Jako elementarną postać wzorcowej transmitancji często przyjmuje się transmitancję drugiego rzędu wyznaczoną na podstawie kryterium optimum modułu [1, 2] w postaci:

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

gdzie σ jest najmniejszą stałą czasową układu.

Transmitancja układu $G_o(s) = G_M(s)G_F(s)$ składa z transmitancji falownika oraz filtru wyjściowego 2-go rzędu oraz gałęzi odbiornikowej typu $R_o L_o$. Przekształtnik często opisywany jest modelem uśrednionym [1, 2, 3]. W tym przypadku przyjęto jego opis jako członu opóźniającego $e^{-s\tau}$, który po aproksymacji 1-go rzędu wyraża transmitancja:

$$G_M(s) = E e^{-s\tau} \approx \frac{E}{\tau s + 1} \quad (3)$$

gdzie τ jest czasem opóźnienia wnoszonym przez przekształtnik, identyfikowanym jako okres modulacji MSI.

Transmitancję filtru wyjściowego łącznie z gałęzią odbiornikową opisuje można przedstawić jako:

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

przy czym:

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

Po uwzględnieniu wyrażień (2), (3) oraz (4) transmitancja regulatora analogowego ma postać:

$$G_R(s) = a_1 s + a_0 + a_{-1} \frac{1}{s} + \frac{a_{-2}}{s + \lambda_1} + \frac{a_{-3}}{s + \lambda_2} \quad (5)$$

gdzie współczynniki ($a_1 \div a_{-3}$) oraz λ_1, λ_2 są wyrażone przez odpowiednie

parametry obiektu.

W literaturze [1, 3] podawanych jest wiele wzorów na algorytmy regulatorów cyfrowych różniących się ze względu na dużą liczbę możliwości: zastosowanie lub nie członu ZOH różnego rzędu, różne aproksymacje funkcji ciągłej, człony różniczkujący i całkujący idealne lub rzeczywiste, wersja pozycyjna lub przyrostowa i wiele innych.

W prezentowanych badaniach dla uzyskania postaci cyfrowej regulatora przyjęto często stosowaną aproksymację Tustina [1, 3]. Ostatecznie regulator dyskretny uzyskany na podstawie regulatora analogowego (5) ma postać:

$$G_r(z) = \frac{b_0 - b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{(1 - z^{-1})} + b_3 \frac{1 - z^{-1}}{(1 + \gamma_1 z^{-1})} + b_4 \frac{1 - z^{-1}}{(1 + \gamma_2 z^{-1})} \quad (6)$$

Postać cyfrowa regulatora może być łatwo przedstawiona jako dyskretny algorytm sterowania i wykorzystana np. w mikroprocesorowym sterowaniu układu.

W zadaniach sterowania cyfrowego bardzo istotny jest właściwy dobór okresu dyskretyzacji [1, 2, 3]. Ogólnie, wybór okresu próbkowania sygnału analogowego zależy od wielu czynników, m.in. pożądanej jakości sterowania, założonej dynamiki procesu, dopuszczalnego widma zakłóceń, a także właściwości dynamicznych sterowanego obiektu. Dodatkowe trudności z określeniem tego okresu występują w przypadku sterowania obiektów z modulacją. W badaniach symulacyjnych analizowanego układu energoelektronicznego źródła napięcia przyjęto okres próbkowania 10-krotnie mniejszy od okresu modulacji (ze względu na możliwość wystąpienia w napięciu wyjściowym drgań o częstotliwości nośnej modulacji MSI).

4. BADANIA SYMULACYJNE

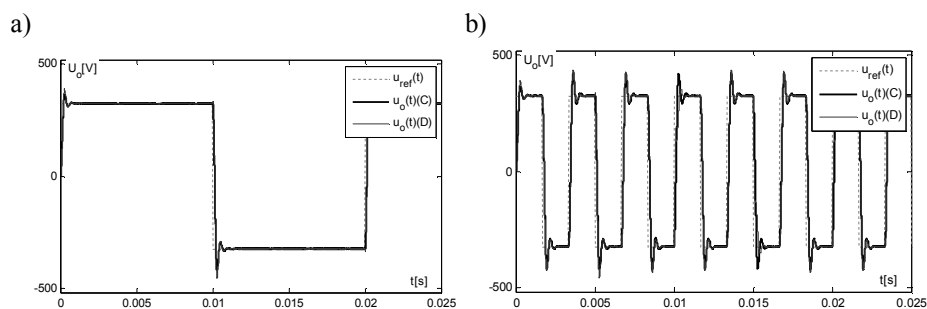
Wyniki symulacji dla układu zamkniętego z regulatorem analogowym oznaczono jako $u_o(C)$, natomiast z regulatorem dyskretnym – $u_o(D)$.

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 analogowym; linia czerwona ciągła – napięcie wyjściowe w układzie z regulatorem dyskretnym.

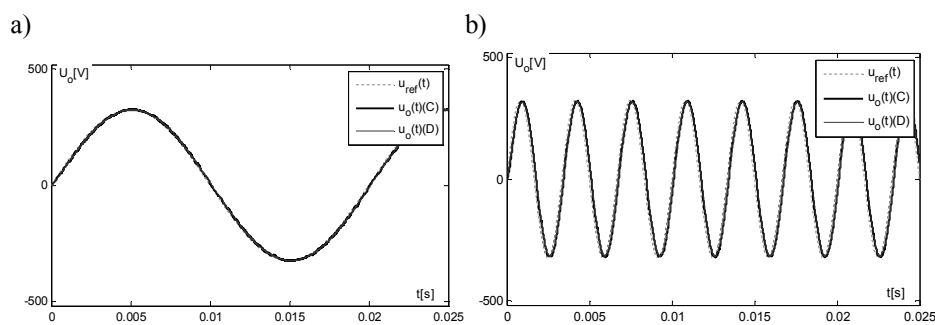
Na rysunkach 2, 3 i 4 pokazano wybrane przebiegi napięcia wyjściowego układu dla przypadku sygnałów zadanych, odpowiednio: prostokątnego o amplitudzie $U_m = 325$ [V] oraz częstotliwości 50 Hz i 300 Hz, a także sinusoidalnego o parametrach $U_m = 325$ [V], $f = 50$ Hz oraz 300 Hz, a także odkształconego sygnału zadanego (1-sza i 17-ta harmoniczne).

Przebieg prostokątny jako sygnał o dużej dynamice jest dobrym narzędziem testowania dynamiki sterowania oraz jakości odwzorowania sygnału zadanego. W analizowanym przypadku oba typy regulatorów umożliwiają uzyskanie

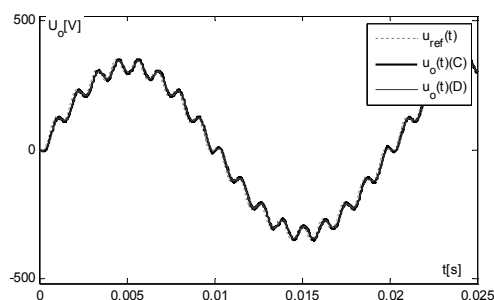
dobrej dynamiki odpowiedzi (niewielkie przeregulowanie oraz oscylacje, praktycznie takie same dla regulatorów analogowego i cyfrowego).



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



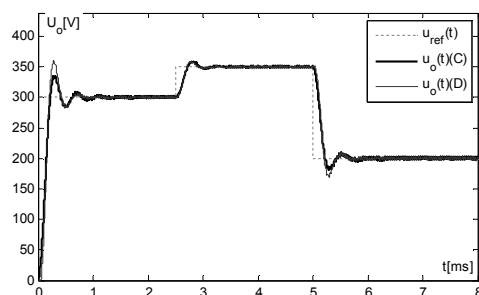
Rys. 3. Przebiegi napięcia wyjściowego dla sinusoidalnego sygnału zadanego: a) $U_m = 325$ V, $f = 50$ Hz; b) dodatkowo z 17-tą harmoniczną



Rys. 4. Przebiegi napięcia wyjściowego dla sinusoidalnego sygnału zadanego o parametrach: $U_m = 325$ V, $f = 50$ Hz z dodatkową 17-tą harmoniczną

Dla przebiegu sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz oraz 300 Hz działanie układu z obydwoima typami regulatorów (analogowego i dyskretnego) jest zbliżone. Również sygnał wieloharmoniczny jest odwzorowany z dobrą dynamiką.

Uzyskana podobna jakość sterowania dla obu typów sterowania w tym przypadku jest związana z mniejszą dynamiką sygnału zadanego.



Rys. 5. Odpowiedź układu na skoki sygnału zadanego

Na rysunku 5 pokazano reakcję układu zamkniętego na skokowe zmiany sygnału zadanego. Również w tym przypadku obydwa typy regulatorów zapewniają dobrą i zbliżoną do siebie dynamikę odpowiedzi.

6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono badania niezależnego energoelektronicznego źródła napięcia z napięciowym sprzężeniem zwrotnym. Porównanie skuteczności działania regulatorów analogowego i dyskretnego (określonych według kryterium modułu) wykonano dla tego samego układu, o tych samych parametrach. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można potwierdzić skuteczność działania regulatora dyskretnego zbudowanego na podstawie wzorca analogowego, gwarantującego dobrą jakość procesów dynamicznych zachodzących w układzie. Różnorodność algorytmów regulatorów cyfrowych oraz metod ich strojenia utrudnia jednak skuteczny wybór optymalnego algorytmu cyfrowego. Uzyskane wyniki wskazują na potrzebę dalszych badań, związanych innymi typami modulacji, wykorzystaniem innych aproksymacji dyskretnych, a także doбором okresu dyskretyzacji, szczególnie dla bardziej złożonych obiektów sterowania.

LITERATURA

- [1] J. Brzózka, Regulatory i układy automatyki. MIKOM, Warszawa 2004.
- [2] W. Byrski, Obserwacja i sterowanie w systemach dynamicznych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2007.
- [3] W. Grega, Metody i algorytmy sterowania cyfrowego w układach scentralizowanych i rozproszonych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2004.

-
- [4] M. Gwóźdź M., R. Porada, Utilization of Wideband Power Electronics Current Sources in Generator of Spatial Magnetic Field. 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] T. Kaczorek, Teoria sterowania i systemów. PWN, Warszawa 1999.
 - [6] N.Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins, Power Electronics: Converters, Application and Design. John Wiley&Sons, New York 2001.

THE CONTROL OF POWER ELECTRONICS VOLTAGE SOURCE WITH APPLICATION OF DIGITAL CONTROLLER

Traditional methods of analog control for systems working as independent power electronics systems do not enable to obtain required nowadays high-quality output signals. The article provides general characteristics of classical and modern methods with application of digital regulators in control. It presents algorithms of these regulators and description of possibility of their use to the control with independent power electronics voltage source. Selected simulation results of such system for different type of reference signals are also included.