

Koszalin 10.04.2017r.

mgr inż. Jacek Kaczmarek
ul. Holenderska 20E
75-430 Koszalin

Uaktualniona koncepcja przygotowywanej dysertacji

„Analiza porównawcza cyfrowych metod sterowania przetwornicą DC/DC”

Wprowadzenie

1. Czym są przetwornice DC/DC, dlaczego się je stosuje?
2. Zalety i wady przetwornic DC/DC.
3. Rozwój konstrukcji przetwornic DC/DC (nowoczesne elementy elektroniczne o ulepszonych parametrach, nowe metody działania układu sterowania).
4. Obszar zainteresowania zawężono do przetwornic DC/DC wykorzystujących w układach sterowania modulację PWM, wyjście bez izolacji galwanicznej, a w rozważaniach posłużono się przykładem przetwornicy Buck.
5. Nowe rozwiązania przetwornic wymuszone są rosnącymi wymaganiami stawianymi ich parametrom. Problemy konstrukcyjne skłaniają konstruktorów do poszukiwania nowych sposobów sterowania.

W każdym urządzeniu elektronicznym występuje układ zasilania, którego zadaniem jest dostosowanie napięcia wyjściowego do potrzeb zasilanego urządzenia. Rozwój techniki oraz świadomości ekologicznej wymusza postęp w dziedzinie budowy układów zasilania. Muszą one spełnić szereg wymagań, szczególnie istotne są między innymi: wysoka sprawność energetyczna, małe wymiary i ciężar układu zasilania. Bardzo często w układach zasilania konieczna jest zamiana wartości stałego napięcia zasilającego urządzenie, do tego celu służy przetwornica prądu stałego (DC/DC). Przetwornica prądu stałego składa się z dwóch elementów: bloku głównego przetwornicy oraz układu sterującego pracą bloku głównego. Budowa bloku głównego zapewnia spełnienie wszystkich wyżej wymienionych wymagań stawianych układom zasilania. Wadą bloku głównego przetwornicy jest wrażliwość napięcia wyjściowego na zmiany punktu pracy przetwornicy. Głównym zadaniem układu sterującego pracą bloku głównego jest zapewnienie stałej wartości napięcia wyjściowego bloku głównego niezależnie od zmian punktu pracy. Największy wpływ na zmianę napięcia wyjściowego bloku głównego przetwornicy mają zmiany napięcia zasilającego blok główny oraz zmiany obciążenia przetwornicy. Choć przetwornice prądu stałego znane są od początku lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku to nadal rozwijane są techniki budowy bloku głównego oraz sposoby sterowania jego pracą. Rozwój urządzeń mobilnych, procesorów, źródeł odnawialnych, sprawia, że zmieniają się i rosną wymagania stawiane przetwornicom prądu stałego. Powszechnie stosowaną grupą przetwornic są podstawowe przetwornice prądu stałego (Buck, Boost, Buck-Boost) bez izolacji galwanicznej napięcia zasilającego, wykorzystujące modulację PWM. Przetwornice prądu stałego były do niedawna sterowane

wyłącznie przez układy analogowe, obecnie coraz bardziej powszechnie wykorzystuje się cyfrowe układy sterujące pracą bloku głównego. Bardzo poważnym ograniczeniem możliwości wykorzystania najnowszych i zaawansowanych cyfrowych metod sterowania, stosowanych w automatyce, jest koszt układu cyfrowego. Z tego względu np. nowoczesne metody adaptacyjne nie są wykorzystywane w komercyjnych zastosowaniach przetwornic DC/DC.

Sformułowanie problemu

1. Ocena różnych konstrukcji przetwornic DC/DC pod kątem efektywności układu sterowania oraz parametrów stabilizacji napięcia wyjściowego.
2. Propozycje poprawy parametrów pracy za pomocą:
 - a) lepszego doboru transmitancji układu sterowania (klasyczne rozwiązanie – sterowanie napięciowe i prądowe),
 - b) zastosowanie algorytmów SARA do przejścia z dziedziny s na z ,
 - c) autorski pomysł wykorzystujący zasadę zachowania energii – *Trzmiel*.

Każdy sposób sterowania przetwornicą DC/DC powinien zapewnić stabilność i skuteczne tłumienie wpływu zmian punktu pracy przetwornicy na stabilizowane napięcie wyjściowe bloku głównego. Pomimo nieustannego rozwoju metod sterowania i układów elektronicznych, zarówno sterowanie w technice analogowej jak i cyfrowej, jest w praktyce realizowane za pomocą klasycznej metody sprzężenia zwrotnego. Powszechnie stosowanym sposobem doboru transmitancji analogowego układu sterowania jest wykorzystanie wykresów Bodego transmitancji otwartej pętli sprzężenia zwrotnego. Najczęściej stosowanym sposobem kształtowania transmitancji cyfrowego układu sterowania jest wykorzystanie tzw. prototypu analogowego. Najpierw, wykorzystując w identyczny sposób wykresy Bodego kształtuje się transmitancję analogowego układu sterującego pracą przetwornicy, następnie dokonuje się transformacji opisu z dziedziny s w dziedzinę z . W ten sposób otrzymuje się dyskretną transmitancję układu sterującego pracą przetwornicy. Kształtując w ten sposób transmitancję cyfrowego układu sterującego pracą przetwornicy istotne stają się dwa zagadnienia:

- doboru transmitancji prototypu analogowego,
- sposobu przejścia z dziedziny s na z .

Coraz szersze zastosowanie procesorów w powszechnie stosowanych urządzeniach elektronicznych wymusza poprawę jakości stabilizowanego napięcia wyjściowego w przypadku gwałtownych zmian poboru mocy. Bardzo istotny staje się dobór transmitancji układu sterowania tak, by zapewnić skuteczne tłumienie wpływu zmian obciążenia przetwornicy na stabilizowane napięcie wyjściowe. Wykorzystując tzw. prototyp analogowy cyfrowego układu sterowanie bardzo ważnym zagadnieniem jest przejście z dziedziny s na z . Przekształcenia to powinno zapewnić jak najdokładniejsze odwzorowanie pierwowzoru analogowej transmitancji i jak najmniejszą złożoność numeryczną otrzymanej dyskretniej transmitancji układu sterowania. Powszechnie wykorzystuje się do tego celu przekształcenie *matched*, choć lepszą dokładność zapewnia przekształcenie *biliniowe*. Powodem jest to, że transmitancja dyskretna układu sterowania otrzymana za pomocą metody *matched* jest mniej

złożona numerycznie w porównaniu do cyfrowej transmitancji otrzymanej za pomocą przekształcenia *biliniowego*. Dla szeroko stosowanej metody tzw. prototypu analogowego poprawę właściwości stabilizowanego napięcia wyjściowego dla cyfrowego układu sterowania można osiągnąć poprzez:

- zmianę kryterium kształtowania transmitancji prototypu analogowego układu sterowania za pomocą wykresów Bodego,
- wykorzystanie półanalitycznych algorytmów splotowych SARA do transformacji opisu z dziedziny s w dziedzinę z .

Na podstawie literatury naukowej poświęconej sterowaniu przetwornic DC/DC można stwierdzić, że proponowane ulepszenia nie rozwiązują problemu stabilizacji napięcia wyjściowego przy dużych zmianach obciążenia przetwornicy. By uzyskać dalszą poprawę stabilizacji napięcia wyjściowego przetwornicy niezbędne jest uwzględnienie zmian obciążenia przetwornicy w sposobie działania układu sterowania. W obecnie stosowanych rozwiązaniach zmiana obciążenia przetwornicy jest traktowana jak zakłócenie. Układ sterowania reaguje dopiero na zmianę napięcia wyjściowego spowodowaną zmianą obciążenia przetwornicy. Ujęcie w opisie matematycznym układu sterowania obciążenia przetwornicy pozwoli na skrócenie czasu reakcji układu sterowania i zmniejszy zmiany napięcia wyjściowego pod wpływem zmian obciążenia przetwornicy. W tym celu autor opracował sposób sterowania pracą przetwornicy oparty o zasadę zachowania energii. Wykorzystując zasadę zachowania energii do stabilizacji napięcia wyjściowego przetwornicy w opisie matematycznym układu sterowania uwzględnia się praktycznie wszystkie czynniki wpływające na zmiany napięcia wyjściowego. Przeprowadzone badania symulacyjne oraz testy pierwszego prototypu wstępnie potwierdziły zalety proponowanego rozwiązania. W publikacjach autora proponowane rozwiązanie otrzymało nazwę Trzmiel.

Cele pracy doktorskiej:

1. Wykazanie, iż możliwe jest zmniejszenie zmian v_o pod wpływem zmian R_O dla metody napięciowej oraz prądowej, poprzez:
 - a) dobór transmitancji sterowania,
 - b) zastosowanie w procesie projektowania przetwornicy DC/DC algorytmów SARA do przejścia z dziedziny s (prototyp analogowy) na dziedzinę z (układ cyfrowy).
2. Opracowanie prototypu przetwornicy DC/DC zbudowanej wg autorskiego pomysłu wykorzystującego zasadę zachowania energii. Zweryfikowanie tego rozwiązania za pomocą badań symulacyjnych oraz pomiarów rzeczywistych parametrów pracy prototypu przetwornicy DC/DC.

Pierwszym celem pracy jest sprawdzenie czy proponowane zmiany w tzw. metodzie prototypu analogowego zapewnią:

- lepszą skuteczność tłumienia wpływu zmian obciążenia przetwornicy na napięcie wyjściowe cyfrowo sterowanej przetwornicy,
- nie zwiększając złożoności numerycznej dyskretnego układu sterowania.

Drugim celem pracy jest weryfikacja idei stabilizacji napięcia wyjściowego przetwornicy pośrednio, za pomocą wykorzystania zasady zachowania energii. Proponowany sposób działania układu sterującego pracą przetwornicy planuje się zbadać symulacyjnie oraz poprzez rzeczywiste pomiary właściwości prototypu przetwornicy Buck. Na zakończenie prac przewiduje się porównanie właściwości obu metod sterowania pracą przetwornicy.

Tezy dysertacji

1. Można poprawić tłumienie wpływu R_O na v_o za pomocą:
 - a) wykorzystanie metod efektywniejszego doboru H_s ,
 - b) zastosowanie algorytmów SARA.
2. Przetwornica DC/DC zbudowana wg autorskiego pomysłu wykorzystującego zasadę zachowania energii może stanowić alternatywę do obecnie stosowanych metod sterowania napięciowego i prądowego.

W powszechnie stosowanej metodzie doboru transmitancji układu cyfrowego sterującego pracą przetwornicy DC/DC za pomocą tzw. prototypu analogowego wprowadzenie:

- zmian w kryterium kształtowania transmitancji otwartej pętli sprzężenia zwrotnego przetwornicy za pomocą wykresów Bodego,
- algorytmów SARA do transformacji opisu z dziedziny s w dziedzinę z ,

pozwoli na:

- zwiększenie skuteczności tłumienia wpływu zmian obciążenia przetwornicy na stabilizowane napięcie wyjściowe przetwornicy,
- dokładniejsze odwzorowywanie przez dyskretną funkcję transmitancji układu cyfrowego wzorcowej transmitancji analogowego prototypu układu sterującego pracą przetwornicy,
- zachowanie lub redukcję złożoności numerycznej dyskretniej funkcji transmitancji układu sterowania.

Wykorzystanie zasady zachowania energii do stabilizacji napięcia wyjściowego przetwornicy DC/DC może stanowić alternatywę dla obecnie powszechnie stosowanych technik stabilizacji napięcia wyjściowego przetwornicy.

Koncepcja autorskiego rozwiązania układu sterowania

- 1) Można poprawić tłumienie wpływu R_O na v_o za pomocą:
 - a. Lepszego doboru H_S – określenie wymagań dla H_S na podstawie np. impedancji wyjściowej przetwornicy lub transmitancji H_g modelu opracowanego przez prof. W. Janke.
 - b. Algorytmów SARA – dokładniejsze odwzorowanie transmitancji analogowej przez otrzymaną dyskretną funkcję transmitancji. Nie spowoduje to zwiększenia złożoności numerycznej otrzymanej funkcji w porównaniu do np. metody *bilinear*
- 2) Wykorzystanie do sterowania zasady zachowania energii pozwala na całościowe ujęcie w sposobie działania regulatora wszystkich czynników wpływających na przetwornicę. Żadna inna metoda tego nie robi. Wiąże się to z koniecznością większej ilości obliczeń, dodatkowego układu pomiarowego itp.

Zmniejszenie wrażliwości napięcia wyjściowego przetwornicy DC/DC sterowanej cyfrowo na zmianę obciążenia przetwornicy jest możliwe poprzez:

- Uwzględnienie właściwości impedancji wyjściowej przetwornicy w czasie kształtowania transmitancji otwartej pętli sprzężenia zwrotnego przetwornicy za pomocą wykresów Bodego. By wykorzystać wykresy Bodego do kształtowania transmitancji układu sterującego pracą bloku głównego niezbędne jest wykorzystanie modelu małosygnałowego bloku głównego przetwornicy. Powszechnie stosowane modele małosygnałowe bloku głównego przetwornicy nie uwzględniają wpływu zmiany obciążenia przetwornicy na napięcie wyjściowe bloku głównego. Z tego powodu zostanie wykorzystany model małosygnałowy bloku głównego opracowany przez prof. W. Janke. Stworzony przez prof. W. Janke model małosygnałowy bloku głównego uwzględnia wpływ zmian konduktancji obciążenia przetwornicy na zmienne stanu bloku głównego.
- Wykorzystanie półanalitycznych algorytmów splotowych SARA do przekształcenia prototypu transmitancji analogowej układu sterowania w dyskretną transmitancję.

Wykorzystanie zasady zachowania energii do opisu matematycznego sposobu działania układu sterującego pracą przetwornicy DC/DC pozwala między innymi na uwzględnienie wpływu zmian obciążenia przetwornicy na napięcie wyjściowe bloku głównego przetwornicy. Dzięki temu układ sterowania może wcześniej reagować na zmiany punktu pracy bloku głównego przetwornicy w porównaniu do powszechnie stosowanych sposobów stabilizacji napięcia wyjściowego przetwornicy. Powinno to przełożyć się na zmniejszenie wpływu zmian punktu pracy bloku głównego na stabilizowane napięcie wyjściowe blok głównego przetwornicy.

Postępy w pracy doktorskiej

Prace zakończone:

1. Zebranie i przegląd literatury naukowej omawiającej zagadnienia związane ze sterowaniem przetwornicami DC/DC.
2. Opis pracy bloku głównego przetwornicy z uwzględnieniem kształtu prądu cewki w stanie ustalonym (CCM, DCM).
3. Analiza technik sterowania pracą bloku głównego:
 - technika napięciowa (VCM),
 - technika prądowa (CCM).
4. Zalety i wady różnych typów modulacji np.: PWM, stały czas fazy ON stosowanych do przełączania elementów aktywnych bloku głównego przetwornicy.
5. Właściwości metod projektowania układu sterowania:
 - Klasyczne – wykorzystujące w opisie matematycznym zmienne stanu lub transmitancję do doboru pętli sprzężenia zwrotnego. Dobór parametrów transmitancji układu sterowania:
 - w dziedzinie częstotliwości za pomocą wykresów Bodego,
 - w dziedzinie Laplace'a – root locus technicue,
 - w dziedzinie czasu.
 - Nowoczesne:
 - optymalne
 - adaptacyjne
 - regulatory odporne (robust)
 - algorytmy genetyczne
 - sieci neuronowe
 - logika rozmyta
6. Dobór transmitancji dyskretnego układu sterowania dla przetwornicy sterowanej metodą napięciowej za pomocą tzw. prototypu analogowego dla przetwornicy sterowanej techniką napięciową (VCM).
7. Wykorzystanie klasycznych sposobów przekształcenia transmitancji analogowej w dyskretną transmitancję – przekształcenia *zoh*, *foh*, *mathed*, *bilinar*.
8. Wykorzystanie algorytmów SARA do przekształcenia transmitancji analogowej w dyskretną transmitancję.
9. Wykorzystanie zasady zachowania energii do stabilizacji napięcia wyjściowego przetwornicy Buck.
10. Badania symulacyjne (pakiet Matlab Simulink) przetwornicy DC/DC wykorzystującej zasadę zachowania energii do stabilizacji napięcia wyjściowego.
11. Zbudowano pierwszy prototyp przetwornicy Buck sterowanej według pomysłu autora - projekt Trzmiel.

Obecnie trwają prace nad:

- Kształtowaniem transmitancji układu sterującego pracą bloku głównego przetwornicy realizowaną w technice prądowej (CCM).

- Potwierdzeniem zmniejszenia wrażliwości napięcia wyjściowego przetwornicy sterowanej cyfrowo na zmianę obciążenia przetwornicy poprzez wykorzystanie:
 - zmodyfikowanego kryterium kształtowania transmitancji prototypu analogowego układu sterowania
 - stosując algorytm SARA przekształcenia transmitancji prototypu analogowego do otrzymania dyskretnej transmitancji układu sterowania.
- Rozwój projektu Trzmiel:
 - udoskonalenie opisu matematycznego,
 - adaptację metody pod kątem implementacji w technice: analogowej, cyfrowej oraz mieszanej,
 - budowę nowego prototypu przetwornicy DC/DC (Buck) sterowanej metodą Trzmiel

Termin ukończenia pracy doktorskiej

Z uwagi na zmodyfikowany cel i tezy pracy doktorskiej, które m.in. wymagają zbudowania i przebadania prototypu autorskiego rozwiązania przetwornicy DC/DC przewidywany termin zamknięcia przewodu doktorskiego: 2020 r.

Koszalin 10.04.2017r.

mgr inż. Jacek Kaczmarek
ul. Holenderska 20E
75-430 Koszalin

Wykaz publikacji

- [1] J. Kaczmarek, „Przetwornica Buck sterowana metodą napięciową - dobór transmitancji analogowego układu sterowania”, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej*, t. 10. ss. 95–118, 2016.
- [2] J. Kaczmarek, „Small-signal model of BumbleBee output voltage controller for DC/DC Converter. Stability analysis of BumbleBee method”, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. R.86, nr 11a, ss. 232–236, 2010.
- [3] J. Kaczmarek, „Small-signal model of bumbleBee output voltage controller for DC/DC converter”, w *2009 MIXDES-16th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems*, 2009, ss. 571–576.
- [4] J. Kaczmarek i A. Mazurek, „Measurement results of buck converter prototype digitally controlled by algorithm using law of conservation of energy - project Bumblebee”, w *2008 15th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, 2008, ss. 525–530.
- [5] J. Kaczmarek i A. Mazurek, „Badanie prototypu cyfrowo sterowanej przetwornicy DC/DC z wykorzystaniem algorytmu „Bumblebee””, w *VII Krajowa Konferencja Elektroniki*, 2008, ss. 58–62.
- [6] J. Kaczmarek i A. Mazurek, „Porównanie nowej metody sterowania przetwornicami DC/DC z metodą sterowania wykorzystującą kontrolę prądu cewki”, *Elektron. Konstr. Technol. ...*, t. 48, nr 11, ss. 84–86, 2007.
- [7] J. Kaczmarek i A. Mazurek, „Comparison of classic DC/DC converters with converters equipped with analog-digital regulator based on law of conservation of energy (bumblebee type)”, w *2007 14th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, 2007, ss. 564–569.
- [8] J. Kaczmarek i A. Mazurek, „Compensation of Calculations Duration on Converters Output Voltage in Digitally Controlled Converters Based on Law of Conservation of Energy - Project Bumblebee”, w *2007 14th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, 2007, ss. 412–417.
- [9] J. Kaczmarek i A. Mazurek, „New Concept of DC/DC Converters Digital Control Based on Law of Conservation of Energy - Project «Bumblebee»”, w *2007 14th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, 2007, ss. 586–591.

- [10] J. Kaczmarek i A. Mazurek, „Wpływ czasu obliczeń algorytmu w nowej metodzie sterowania napięciem wyjściowym przetwornicy DC/DC”, w *VI Krajowa Konferencja Elektroniki*, 2007.
- [11] J. Kaczmarek i A. Mazurek, „Nowa koncepcja cyfrowego sterowania przetwornicami DC/DC”, w *VI Krajowa Konferencja Elektroniki*, 2007.
- [12] J. Kaczmarek i A. Mazurek, „Nowa idea sterowania przetwornicami DC/DC”, *Elektron. Konstr. Technol. ...*, t. 48, nr 11, ss. 114–117, 2007.
- [13] J. Kaczmarek i A. Mazurek, „Porównanie nowej metody sterowania przetwornicami DC/DC z metodą sterowania wykorzystującą kontrolę prądu cewki”, w *VI Krajowa Konferencja Elektroniki*, 2007.
- [14] T. Borowski, J. Kaczmarek, J. Kraśniewski, M. Oleksy, i T. Hryniewicz, „Synthesis of, and electrochemical studies on conductances in rubber + NaClO₄ + activated carbon systems”, *Przem. Chem.*, t. 8, ss. 607–610, 2005.
- [15] T. Borowski, J. Kaczmarek, J. Kraśniewski, i M. Oleksy, „Conductance of solid polymeric electrolytes in the system: butadiene rubber + NaClO₄ + active carbon”, *Stowarzyszenia Inżynierów i Tech. Przem. Chem. „CHEMIK”*, t. 11, ss. 447–450, 2004.
- [16] J. Kaczmarek i Z. Ociepa, „Projekt sterownika programowalnego do pomiaru zużycia energii elektrycznej i wody”, *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Elektryka*. ss. 389–396, 2001.

Stypendium dla doktorantów na badania naukowe:

- [1] Projekt „*Inwestycja w wiedzę motorem rozwoju innowacyjności w regionie - II edycja*” współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego i Budżetu Państwa Poddziałanie 8.2.2 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki 2007-2013.

Jacek Kaczmarek