



Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej



Autoreferat Rozprawy Doktorskiej

Tomasz Dziwiński

Wybrane metody cyfrowego przetwarzania
sygnałów w czasie rzeczywistym w układach
sterowania przekształtnikami
energoelektronicznymi

Kraków, 2017

Promotor prof. dr hab. inż. Wojciech Grega
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

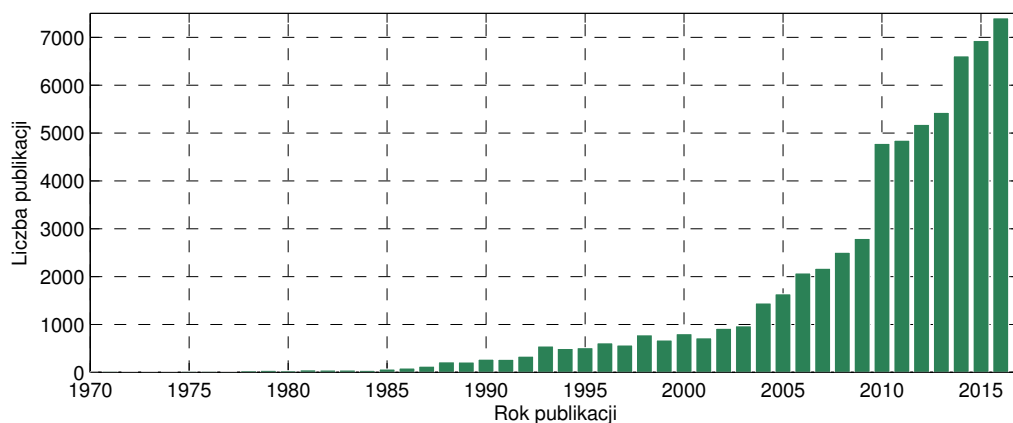
Promotor pomocniczy dr inż. Paweł Piątek
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Tematyka oraz cel pracy doktorskiej

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest analiza metod sterowania cyfrowego układami energoelektronicznymi. Efektywne przetwarzanie energii elektrycznej realizowane jest przy użyciu układów impulsowych. Impulsowe przetwarzanie energii jest stosowane w różnych urządzeniach przemysłowych i komercyjnych, w szczególności w serwonapędach i przemiennikach częstotliwości do maszyn elektrycznych, bezprzerwowych zasilaczach awaryjnych, wysokosprawnych zasilaczach układów elektronicznych, czy przemiennikach częstotliwości dla systemów fotowoltaicznych.

Tematyka układów przekształtnikowych o wysokiej sprawności i niewielkich rozmiarach wydaje się być bardzo aktualna. W ostatnim czasie szczególnie można zaobserwować światowe tendencje do miniaturyzacji i podnoszenia wydajności elektronicznych układów przekształtnikowych. W czerwcu 2014 korporacja Google oraz stowarzyszenie IEEE Power Electronics Society (PELS) ogłosiły konkurs na zaprojektowanie i opracowanie miniaturowego przemiennika częstotliwości o mocy 2 kVA. Specyfikacja układu zawierała szereg ograniczeń, między innymi, gęstość mocy musiała przekraczać 50 W/in^3 . Organizatorzy konkursu byli przekonani, że postęp w miniaturyzacji i ograniczenie strat układów przetwarzania energii znacząco przysłuży się popularności przydomowych farm fotowoltaicznych, rozwojowi mikrosieci elektroenergetycznych oraz dodatkowej funkcjonalności samochodów elektrycznych, które podczas gdy byłyby podłączone do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia, mogłyby być wykorzystane jako lokalny magazyn energii.

O tym, że tematyka przekształtników energoelektronicznych jest bardzo aktualnym tematem prac badawczych świadczy również liczba prac naukowych zarejestrowanych w bazie IEEExplore – przedstawiona na wykresie 1.

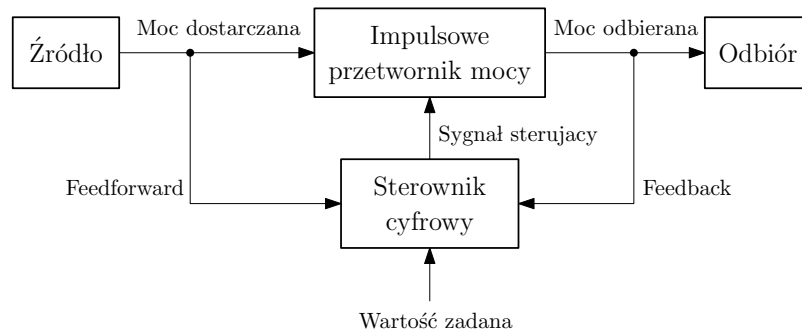


Rysunek 1: Liczba publikacji naukowych dot. zagadnienia przetworzenia energii w latach 1970–2016 i zarejestrowanych w bazie IEEExplore

Tematyka elektronicznych układów przetwarzania energii jest interesująca nie tylko

z perspektywy topologii łączników, czy rozwoju półprzewodnikowych elementów mocy, lecz również z perspektywy systemów sterowania i automatyki. Możliwe jest dokładne modelowanie i opis matematyczny układów energoelektronicznych (w przeciwieństwie np. do układów elektromechanicznych, w których występuje bardzo trudne do modelowania tarcie). Pomiar wartości zmiennych stanu (prądów i napięć w układzie) jest możliwy z dużą dokładnością oraz częstotliwością. Dlatego rezultaty uzyskane na podstawie modeli symulacyjnych nie odbiegają tak bardzo od wyników eksperymentalnych na rzeczywistym obiekcie, jak ma to miejsce w wielu innych aplikacjach inżynierii sterowania.

Uogólniony schemat blokowy układu sterowania cyfrowego dla systemu przetwarzania energii przedstawiony został na rysunku 2. Sterownik dysponuje pomiarami wartości napięcia i/lub prądu wejściowego i wyjściowego z układu energoelektronicznego oraz oddziałuje na układ przetwarzania sygnałem sterującym. Wartość zadana informuje regulator o pożądanych wartościach napięcia i/lub prądu zasilającego odbiór. Prawidłowo zaprojektowany system sterowania pozwala na śledzenie zmian wartości zadanej i utrzymywaniu uchybu regulacji w określonym zakresie. Zakłócenia procesu związane są przede wszystkim ze zmianą parametrów źródła zasilającego przekształtnik oraz parametrów odbioru obciążającego przekształtnik.

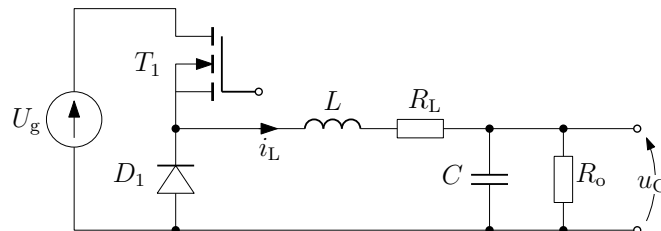


Rysunek 2: Uogólniony schemat blokowy systemu przetwarzania energii z zastosowaniem układu sterowania cyfrowego

Praca doktorska skupia się na zagadnieniach opracowania i implementacji algorytmów sterowania w czasie rzeczywistym na potrzeby systemów impulsowego przetwarzania energii. Poruszana problematyka jest bardzo obszerna i interdyscyplinarna (dotyka dyscypliny energoelektroniki, elektrotechniki, elektroniki, informatyki i automatyki), dlatego jedynie wybrane metody i przypadki zostały opisane w rozprawie. Autor skupił swoje rozważania na konkretnej strukturze przekształtnika, jakim jest konwerter typu „Buck”. Schemat układu energoelektronicznego przedstawiony został na rysunku 3. Układ taki można opisać za pomocą następujących równań stanu:

$$\begin{cases} \frac{d\langle i_L(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \frac{1}{L} (D U_g - \langle i_L(t) \rangle_{T_s} R_L - \langle u_C(t) \rangle_{T_s}) \\ \frac{d\langle u_C(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \frac{1}{C} \left(\langle i_L(t) \rangle_{T_s} - \frac{\langle u_C(t) \rangle_{T_s}}{R_o} \right) \end{cases} \quad (1)$$

gdzie T_s oznacza okres sterowania, D oznacza współczynnik wypełnienia sygnału otwierającego klucz T_1 a operator $\langle \cdot \rangle_{T_s}$ wartość uśrednioną w okresie T_s . Pozostałe zmienne wyjaśnia rysunek 3.



Rysunek 3: Schemat ideowy przekształtnika typu „Buck”

Autor sformułował i postawił sobie za zadanie udowodnienie następujących tez:

1. Dostosowanie algorytmów sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi do warunków realizacji na dedykowanych platformach sprzętowych może poprawić jakość i pewność dostarczanej energii elektrycznej.

2. Pomimo złożonego charakteru algorytmów sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi jest możliwa efektywna implementacja w czasie rzeczywistym w środowisku FPGA / DSP.

Celem rozprawy doktorskiej jest opracowanie i weryfikacja takich algorytmów sterowania cyfrowego działających w czasie rzeczywistym, które wykazywałyby korzystne właściwości pod względem wybranych wskaźników jakości – w szczególności parametrów dotyczących jakości napięcia wyjściowego układu przetwarzającego. Realizacja zadania sterowania w czasie rzeczywistym z bardzo krótkim cyklem wymaga zastosowania wydajnej jednostki obliczeniowej. Największe możliwości związane z szybkim przetwarzaniem sygnałów dają układy konfigurowalne, np. układy FPGA. Sprzętowa realizacja algorytmu sterowania w układach FPGA jest zadaniem trudnym i wymaga od projektanta przestrzegania wielu ograniczeń, w szczególności ograniczeń związanych z czasem propagacji sygnałów wewnątrz układu, ograniczoną liczbą konfigurowalnych komórek (macrocells), długim czasem syntezy i implementacji konfiguracji układu FPGA oraz problemy związane z integracją systemu.

W 2016 roku wciąż przeważająca jest liczba impulsowych układów zasilania, które stosują analogowy układ sterowania (zbudowane z wykorzystaniem wzmacniaczy operacyjnych i dyskretnych elementów pasywnych lub zintegrowanych układów scalonych działających w technice analogowej). Analogowe układy sterowania mają wiele zalet, jak np. szerokie pasmo przenoszenia, algorytm sterowania opracowany w dziedzinie czasu ciągłego, szybki czas reakcji i relatywnie niska cena. Niestety, układy analogowe są podatne na szum i zakłócenia elektromagnetyczne a ich punkt pracy zmienia się wraz ze zmianą temperatury. Ponadto, dużo trudniejsze jest strojenie regulatora analogowego i re-

alizacja systemów adaptacyjnych. Realizacja złożonych struktur sterowania, regulatorów wysokiego rzędu w technice analogowej nie jest zadaniem łatwym. Dlatego, analogowe systemy sterowania zdominowane są przez proste struktury regulacyjne, takie jak regulatory typu PI czy regulatory opóźniająco-wyprzedzające fazę. Gdyby możliwe okazało się opracowanie takiego systemu sterowania cyfrowego, który z jednej strony konkurował cenowo z obecnymi rozwiązaniami, a z drugiej strony implementował algorytmy gwarantujące odporne sterowanie na zmieniające się parametry obiektu, wówczas popularne w układach energoelektronicznych sterowniki analogowe mogłyby w przyszłości zostać zastąpione przez ich cyfrowe odpowiedniki.

Struktura pracy

Pierwsza część pracy przybliży rozwiązania stosowane historycznie oraz współcześnie w elektronicznych układach impulsowego przetwarzania energii. Przedstawione zostały podstawy działania przekształtników impulsowych i wyszczególniono podstawowe topologie i typy układów. Przedstawione zostały realizacje elektroniczne wybranych układów przetwarzania energii elektrycznej oraz ich modele matematyczne. Zaproponowane zostały również wskaźniki i kryteria oceny jakości prądu i napięcia wyjściowego.

Następna część pracy skupia się na sposobie projektowania układów sterowania, począwszy od przetwarzania analogowo-cyfrowego, poprzez dostosowanie cyfrowego filtra uśredniającego, dobór regulatora i zaprojektowanie modulatora sygnału sterującego łącznikami. Przy doborze regulatora szczególny nacisk położony został na analizę niepewności parametrycznej modelu obiektu i zapewnienie stabilności systemu dla całego zbioru obiektów znajdujących się w przedziale niepewności.

W kolejne części pracy, Autor projektuje regulator dla konkretnego obiektu – fizycznego modelu laboratoryjnego przekształtnika typu „buck”. Dokonano identyfikacji obiektu w oparciu o odpowiedź częstotliwościową a wynik porównano z symulacyjną charakterystyką Bodego dla modelu numerycznego. Wysoki poziom zgodności odpowiedzi w paśmie od 1 Hz do 10 kHz umożliwił przeprowadzenie doboru i strojenia regulatora w środowisku do symulacji numerycznych MATLAB/Simulink. Autor wybrał dwa typy regulatorów, które miały spełniać określone wcześniej parametry specyfikacji: błąd ustalony, pasmo przenoszenia, zapas fazy, zapas amplitudy oraz wskaźniki oparte na normie L^∞ funkcji wrażliwości. Autor zaproponował syntezę regulatora \mathcal{H}_∞ 4-go rzędu oraz porównanie go z regulatorem typu Lead-Lag. Uzyskane prototypy zostały poddane analizie w dziedzinie częstotliwości. Po weryfikacji prototypów regulatorów opisanych w dziedzinie czasu ciągłego, regulatory zostały zdyskretyzowane z okresem próbkowania 20 μ s i zrealizowane w postaci równań przestrzeni stanów.

Uzyskane dyskretnie realizacje regulatorów oraz kompletny opis algorytmu sterowania uwzględniający sprzężenie „feedforward” od wartości napięcia wejściowego, układ modu-

latora sygnału sterującego tranzystorami oraz cyfrowe filtry uśredniające zostały zaimplementowane w układzie FPGA. Weryfikacja działania obu regulatorów oraz całego algorytmu sterowania została wykonana na podstawie analizy szeregu badań eksperymentalnych, zrealizowanych w dedykowanych stanowiskach badawczych. Zweryfikowana została odpowiedź częstotliwościowa układu zamkniętego i porównana z odpowiedzią modelu symulacyjnego. Poddane analizie zostało widmo napięcia wyjściowego i porównane z widmem napięcia zasilającego obiekt, które celowo zostało zniekształcone tętniącym prądem o częstotliwości podstawowej 100 Hz wytworzonym przez pasywny prostownik diodowy. Analizowane również zostały przebiegi przejściowe – odpowiedź na skok wartości zadanej oraz odpowiedź na skokową zmianę prądu wyjściowego obiektu.

Najważniejsze oryginalne wyniki badawcze

Autor rozprawy za najważniejsze oryginalne wyniki badawcze uważa:

1. Porównanie wybranych cyfrowych algorytmów modulacji i ich ocena według wybranych wskaźników jakości (rozdz. 3.6).
2. Opracowanie odpowiednich modeli modułów przekształtnika oraz środowiska symulacyjnego (rozdz. 4.1).
3. Opracowanie dwóch alternatywnych liniowych regulatorów dla wybranego przypadku badawczego: regulatora typu Lead-Lag oraz regulatora \mathcal{H}_∞ (rozdz 4.2.2).
4. Symulacyjna i praktyczna weryfikacja opracowanych algorytmów sterowania (rozdz. 4.2.2, 4.6).
5. Projekt, opracowanie i realizacja rekonfigurowalnego, cyfrowego elektronicznego systemu sterowania dedykowanego do pracy z energoelektronicznymi układami impulsowymi w oparciu o układy FPGA (rozdz. 4.3).
6. Badania porównawcze wybranych, odpornych algorytmów sterowania i określenie ich stosowności dla wybranej topologii przekształtnika energoelektronicznego (rozdz. 4.6).
7. Projekt, opracowanie i realizacja impulsowego przekształtnika energoelektronicznego typu „Buck” służącego jako rzeczywisty obiekt dla układu sterowania.
8. Implementacja wybranych algorytmów przetwarzania sygnałów w układzie FPGA i ocena ich właściwości.
9. Opracowanie dedykowanego stanowiska laboratoryjnego do analizy jakości sterowania.