

Symulacja stanów przejściowych w przekształtniku Flyback

Streszczenie. W pracy przedstawiono symulacje stanów przejściowych zachodzących w impulsowym przekształtniku napięcia typu Flyback. W szczególności badano symulacyjnie „szybkie” stany przejściowe zachodzące w obrębie pojedynczego okresu przełączania oraz „powolne” stany przejściowe trwające wiele okresów. Przedyskutowano wpływ doboru modelu transformatora na wyniki symulacji szybkich stanów przejściowych. Do symulacji powolnych stanów przejściowych użyto uśrednionego modelu przekształtnika. Pokazano, że użycie modelu uśrednionego pozwala na znaczne skrócenie czasu symulacji.

Abstract. The paper presents simulations of transient states occurring in pulse-type Flyback voltage converters. In particular, simulations of fast transient states occurring within a single switching period and slow transition states containing multiple periods are simulated. The impact of the transformer model selection on the results of rapid transient state simulation is discussed. An averaged converter model has been used to simulate slow transient states. It has been shown that the use of the averaged model allows a significant reduction in simulation time. (**Simulation of transient states in Flyback converters**).

Słowa kluczowe: Flyback, przekształtnik impulsowy, transformator, symulacja stanów przejściowych, Spice

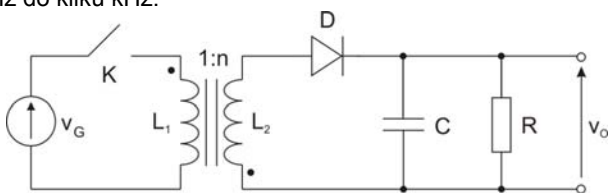
Keywords: Flyback, pulse converter, transformer, simulation of transient states, Spice

Wstęp

Przetwornice transformatorowe stanowią bardzo ważną grupę impulsowych przekształtników napięcia stałego. Najważniejszymi zaletami tej grupy przekształtników są: zapewnienie izolacji galwanicznej między wejściem i wyjściem; możliwość uzyskiwania bardzo szerokiego zakresu napięć wyjściowych zarówno poniżej jak i powyżej napięcia wejściowego oraz łatwość realizacji wariantów przekształtników o wielu wejściach lub wielu wyjściach. Do wad tej grupy przekształtników należy zaliczyć pojawianie się w nich pasożytniczych oscylacji oraz nieco większą trudność w symulacji i projektowaniu w porównaniu z przekształtnikami beztransformatorowymi. Powyższe wady i zalety wynikają w głównej mierze z właściwości transformatorów.

W niniejszej pracy zajmujemy się zagadnieniami symulacji przekształtników transformatorowych na przykładzie najpopularniejszego przedstawiciela tej grupy czyli przekształtnika Flyback [1, 2, 3]. Rozważamy najprostszą wersję tego przekształtnika, którego blok główny zawiera transformator dwuuzwojeniowy o przekładni n , tranzystor (czyli przełącznik sterowany), diodę i kondensator (rys.1). Pełny układ przekształtnika oprócz bloku głównego zawiera blok sterujący, który reguluje współczynnik wypełnienia przebiegu przełączającego stan tranzystora. Projektowanie obu bloków przekształtnika jest przeprowadzane w oparciu o odpowiednio dobraną serię symulacji.

Symulacje przedstawione w pracy dotyczą stanów przejściowych w przekształtniku. Rozważa się osobno tzw. szybkie stany przejściowe w obrębie pojedynczego okresu przełączania oraz powolne stany przejściowe zachodzące w odcinkach czasu wielokrotnie większych od okresu przełączania. Celowość rozróżnienia tych dwóch typów stanów przejściowych wynika ze specyfiki pracy przekształtników impulsowych. Częstotliwości przełączania tych układów są zwykle rzędu kilkuset kHz do kilku MHz zaś częstotliwości własne bloku głównego są rzędu kilkuset Hz do kilku kHz.



Rys.1. Blok główny podstawowej wersji przekształtnika Flyback

Użyteczność wyników symulacji układu zależy w głównym stopniu od tego, jakie modele jego elementów lub podukładów zostaną przyjęte. We wstępnych symulacjach stosuje się możliwie jak najprostsze modele elementów, określane zwykle jako modele idealne, dzięki czemu złożoność obliczeniowa procesu symulacji jest niewielka ale wyznaczane w ten sposób charakterystyki układu są przybliżone. W kolejnych symulacjach stosuje się coraz dokładniejsze ale coraz bardziej złożone modele. Pojęcie idealnego modelu danego typu elementu odnosi się do modelu, który reprezentuje najważniejsze cechy elementu, chociaż nie zapewnia dobrej dokładności symulacji, w których jest wykorzystywany.

Drugi rozdział pracy poświęcono modelom transformatorów używanych w impulsowych przekształtnikach napięcia. Sposób przeprowadzania i przykładowe wyniki symulacji szybkich oraz powolnych stanów przejściowych w bloku głównym przekształtnika Flyback przedstawiono odpowiednio w rozdziałach 3 i 4.

Modele transformatora

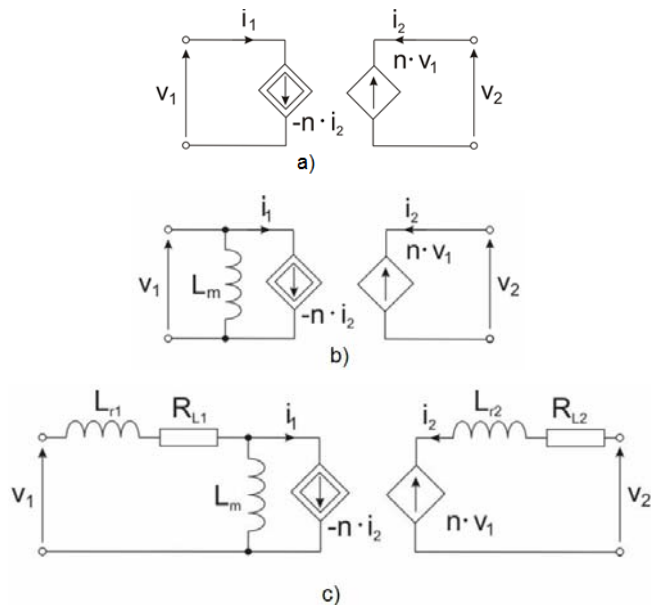
W elektrotechnice jest stosowane szeroko pojęcie transformatora idealnego. Jest to element czwórnikowy (rys.2a) opisany równaniami:

$$(1) \quad v_2 = n \cdot v_1$$

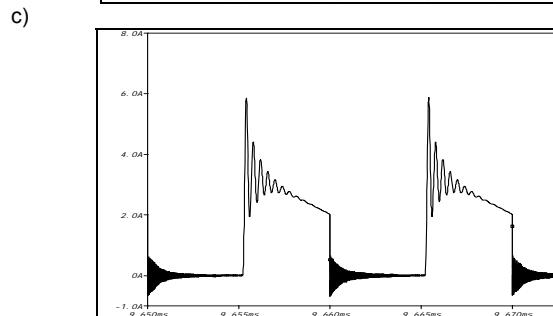
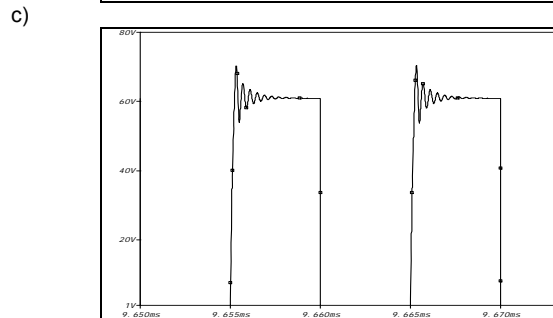
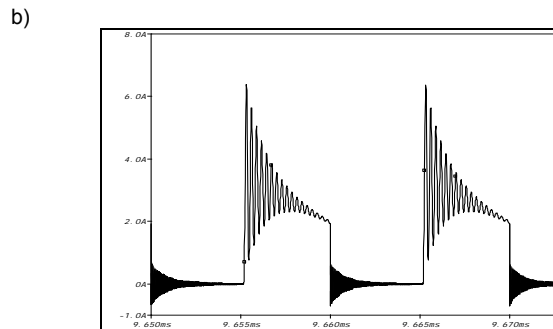
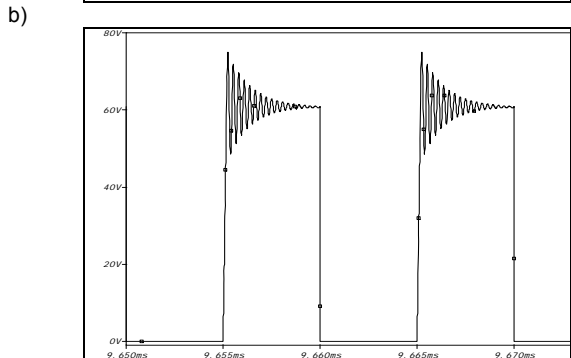
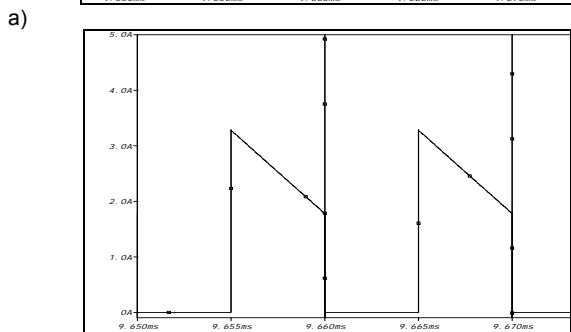
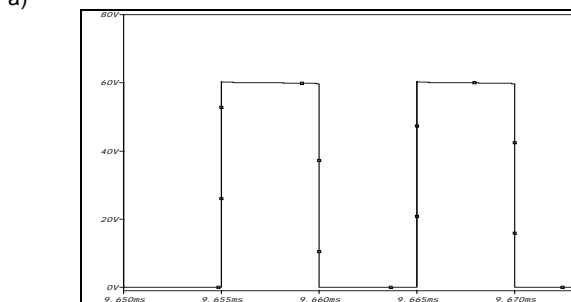
$$(2) \quad i_1 = -n \cdot i_2$$

Przekładnia transformatora n oznacza stosunek liczby zwojów uzwojenia wtórnego i pierwotnego. Łatwo zauważyć, że taki model nie reprezentuje podstawowych cech transformatora w układach impulsowego przetwarzania mocy, na przykład w przekształtniku Flyback. Zgodnie ze schematem i zasadą działania tego przekształtnika, w fazie pracy, w której prąd pierwotnego uzwojenia transformatora jest niezerowy, prąd uzwojenia wtórnego jest właśnie równy zero i odwrotnie: w fazie, gdy i_1 jest równy zero, i_2 jest właśnie niezerowy, przeciwnie niż wynika z równania (2). Z tego powodu, w uproszczonej analizie pracy przekształtnika Flyback [1, 2, 3] przyjmuje się inny model transformatora, pokazany na rysunku 2b), gdzie element oznaczony przez L_m jest czasem nazywany indukcyjnością magnetyzacji. Model ten oddaje podstawowe cechy transformatora w układzie impulsowego przekształtnika transformatorowego (np. Flyback). Nie uwzględnia efektów pasożytniczych takich jak indukcyjności rozproszenia, czy rezystancje uzwojeń, więc powinien być

zaliczony do grupy modeli idealnych. Uwzględnienie wybranych efektów pasożytniczych prowadzi do modeli rozbudowanych. Przykład takiego modelu pokazano na rysunku 2c. Modele pokazane na rysunkach 2b i 2c wykorzystano w symulacjach opisanych w następnym rozdziale.



Rys.2. Modele transformatora: a) „transformator idealny”; b) model uwzględniający indukcyjność magnetyzacji; c) model rozbudowany



Rys.3. Symulacje szybkich stanów przejściowych napięcia na przełączniku (po lewej) oraz prądu diody (po prawej) – objaśnienia w tekście

Symulacja szybkich stanów przejściowych w przekształtniku Flyback

Symulacje opisane w tym i następnym punkcie pracy przeprowadzono za pomocą programu Spice. Odnoszą się one do układu pokazanego na rysunku 1, w którym transformator zastąpiono modelem z rysunku 2b lub 2c. Dla wszystkich symulacji przyjęto następujące wartości parametrów: $V_G = 30$ V, częstotliwość przełączania $f_s = 100$ kHz, wartość spoczynkowa współczynnika wypełnienia $D_A = 0,5$, $R_O = 2$ Ω , $C = 330$ μ F, $n = 0,1$, $L_l = 1$ mH. W przypadku symulacji układu opartego na rozbudowanym modelu transformatora dodatkowo przyjęto $L_{rl} = 1$ μ H, $L_{r2} = 10$ nH oraz pojemność przełącznika $C_k = 1$ nF.

W pierwszej części symulacji przyjęto model transformatora z rysunku 2b. Przełącznik aktywny (tranzystor) opisano jako element dwustanowy, który w fazie pracy określonej jako ON przyjmuje rezystancję $R_{on} = 20$ m Ω , natomiast w fazie OFF stanowi rozwarcie. Diode opisano modelem z biblioteki programu SPICE odpowiadającym elementowi MBR340.

Wyniki tych symulacji pokazane na rysunku 3a) nie odzwierciedlają oscylacji obserwowanych w rzeczywistym układzie, a które można zaobserwować symulacyjnie wykorzystując rozbudowany model transformatora co pokazano na rysunku 3b). Jak wiadomo [4], pasożytnicze oscylacje w przekształtniku Flyback można ograniczyć przez zastosowanie odpowiedniego układu tłumiącego (z ang. snubber). Przebiegi na rysunku 3c) otrzymano symulacyjnie dla układu przekształtnika zawierającego przykładowy snubber. Sposób doboru snubbera nie jest obiektem rozważań w tej pracy.

Symulacja powolnych stanów przejściowych w przekształtniku Flyback

Do symulacji powolnych stanów przejściowych, obejmujących odcinki czasu znacznie większe od okresu przełączania, stosuje się modele uśrednione. Opisują one związki między wartościami prądów i napięć w przekształtniku uśrednionym na okres przełączania. Sposoby tworzenia modeli uśrednionych są opisane w literaturze (np. [1, 2, 5]). Model przyjęty w tej pracy jest otrzymany metodą separacji zmiennych [6]. Zastosowanie tej metody do bloku głównego przekształtnika Flyback pokazanego na rysunku 1 prowadzi do zależności podanych w p. 6.3.2 monografii [3].

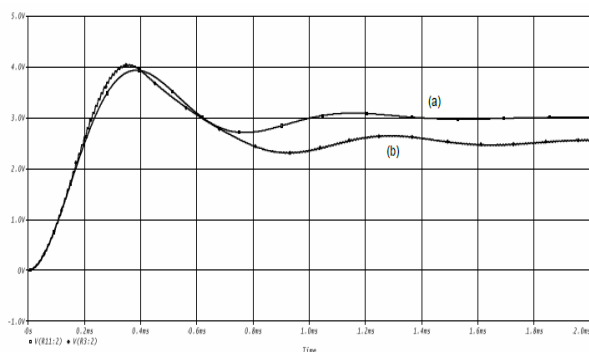
Zależności te można doprowadzić do postaci:

$$(3) \quad L_m \cdot \frac{di_L}{dt} = d_A \cdot v_G - \frac{1-d_A}{n} \cdot v_O$$

$$(4) \quad \frac{1-d_A}{n} \cdot i_L = G \cdot v_O + C \cdot \frac{dv_O}{dt}$$

gdzie symbol G oznacza odwrotność rezystancji obciążenia.

Przykładowe symulacje przeprowadzone w oparciu o powyższe równania obejmowały wyznaczenie przebiegu napięcia v_O na obciążeniu w stanie przejściowym po skokowej zmianie napięcia wejściowego v_G przy ustalonej wartości współczynnika wypełnienia d_A przebiegu przełączającego (rys.4, krzywa a). Dla porównania, na rysunku 4(b) pokazano wynik symulacji opartej na pełnych przebiegach (bez uśredniania). Różnice w przebiegach wynikają z faktu, że model uśredniony wyprowadzono przy założeniu idealnych przełączników, natomiast w symulacjach dla pełnych przebiegów przyjęto biblioteczny model diody, który przewiduje spadek napięcia około 0,5 V w stanie przewodzenia. Korzyść z użycia modelu uśrednionego polega na tym, że oparta na nim symulacja trwa znacznie krócej niż symulacja oparta na pełnych przebiegach. Przykładowo dla symulacji obejmujących odcinek czasu od 0-100 ms w przypadku wykorzystania modelu uśrednionego czas wykonania symulacji wynosił 90 ms natomiast dla modelu bez uśredniania czas ten wyniósł 30,16 s.



Rys.4. Odpowiedź napięcia wyjściowego na uskok napięcia wejściowego: symulacja w oparciu o model uśredniony (a), symulacja na pełnych przebiegach (b)

Podsumowanie

Projektowanie impulsowych przekształtników napięcia, zarówno ich bloków głównych jak i podukładów sterujących opiera się zwykle na serii symulacji. Pożądane jest aby symulacje były dokładne, a z drugiej strony – by były

przeprowadzane szybko. Cechy procesu symulacji zależą w głównej mierze od zastosowanych modeli elementów i podukładów. Impulsowe przekształtniki napięcia są obiektami nieliniowymi i występują w nich zarówno szybkie stany przejściowe związane z przełączaniem oraz inercją przełączników półprzewodnikowych oraz stany powolne scharakteryzowane przez stałe czasowe odpowiadające kombinacji wartości pojemności użytych kondensatorów i indukcyjności cewek. Charakter stanów przejściowych w przekształtnikach transformatorowych, takich jak Flyback, wiąże się ze specyficznymi cechami transformatorów impulsowych. Modele transformatorów używanych w przekształtnikach impulsowych omówiono w rozdziale drugim. Symulacje stanów przejściowych zachodzących w obrębie pojedynczego okresu przełączania wykonywane z pomocą programu Spice, przy wykorzystaniu różnych modeli transformatorów zaprezentowano w rozdziale trzecim. Symulacje pokazują między innymi występowanie pasożytniczych oscylacji w układzie przekształtnika i pozwalają ocenić wpływ różnych parametrów na przebieg tych oscylacji, a także ocenić skuteczność ich tłumienia przez zastosowanie tzw. snubberów.

W czwartym rozdziale pracy omówiono symulacje powolnych stanów przejściowych w przekształtniku Flyback, zachodzących w przedziałach czasu znacznie większych od okresu przełączania. Takie symulacje są potrzebne przede wszystkim w trakcie projektowania układu sterującego. Można je przeprowadzać wyznaczając pełne przebiegi prądów i napięć w układzie, łącznie ze szczegółami w obrębie poszczególnych okresów, ale takie symulacje są bardzo czasochłonne, zwłaszcza w przypadku, gdy rozważamy przekształtnik jako część większego systemu. Korzystniej jest w takim przypadku użyć odpowiednich modeli uśrednionych. Przykład symulacji opartej na uśrednionym modelu przekształtnika zaprezentowano w rozdziale 4 i pokazano, że czas trwania przykładowej symulacji jest wielokrotnie krótszy niż czas symulacji pełnych przebiegów.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Włodzimierz Janke, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. JJ Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, E-mail: wlodzimierz.janke@tu.koszalin.pl;
mgr inż. Maciej Bączek, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. JJ Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, E-mail: maciej.baczek@tu.koszalin.pl.

LITERATURA

- [1] Erickson R.W. and Maksimovic D., Fundamentals of Power Electronics, 2-nd Edition, Kluwer, 2002
- [2] Kazimierczuk M.K., Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters, J. Wiley, 2008
- [3] Janke W., Impulsowe przetwornice napięcia stałego, Monografia nr 269, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, ISBN 978-83-7365-341-2, Koszalin 2014
- [4] Application Note AN4147 – Design Guidelines for RCD Snubber of Flyback, FAIRCHILD SEMICONDUCTOR, Rev. 1.00 6/3/05
- [5] Janke W., Averaged models of pulse-modulated DC-DC converters. Part I: Discussion of standard methods, Archives of Electrical Engineering 61(4) (2012), 609-631
- [6] Janke W., Averaged Models of Pulse-Modulated DC-DC Converters, Part II. Models Based on the Separation of Variables, Archives of Electrical Engineering 61(4) (2012), 633-654