

Bogusław GRZESIK

Grzegorz OMBACH

PRZEKSZTAŁNIK ENERGOELEKTRONICZNY DC/DC TYPU SC, MODEL KOMPUTEROWY PWL

Streszczenie. Praca przedstawia wyniki analizy modelu PWL (odcinkami liniowego) przekształtnika energoelektronicznego DC/DC typu SC. Jest to tranzystorowy powielacz napięcia dużej mocy o topologii Fibonacciego (0.5kW). W pracy również zamieszczono wyniki badań przekształtnika laboratoryjnego. Zasadnicze wyniki pracy to: charakterystyki zewnętrzne, charakterystyki odkształcenia napięcia wyjściowego i sprawności oraz przebiegi czasowe prądów i napięć badanego przekształtnika. Charakterystyki te sporządzono na podstawie modelu PWL dla wybranych częstotliwości przełączania, 1kHz do 1MHz. Wraz ze wzrostem częstotliwości rosną: sztywność charakterystyk zewnętrznych i sprawność; odkształcenie napięcia wyjściowego maleje. Wyniki pomiarów różnią się od wyników teoretycznych. Powodem jest brak w modelu teoretycznym przekształtnika indukcyjności pasozytniczych.

SWITCHED CAPACITOR DC/DC CONVERTER PWL COMPUTER MODEL

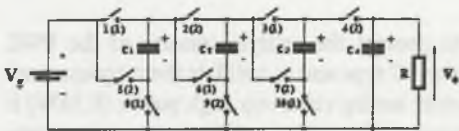
Summary. The main aim of this paper is to present the analysis results of the PWL (piecewise linear) model of DC-DC converter of the SC type and to validate them by comparison with the laboratory measurements. The converter having relatively high power (0.5kW) is the transistor voltage multiplier of Fibonacci topology. The output voltage/current characteristics, characteristics of output voltage distortion and efficiency are presented in the paper. These characteristics are parametrised by the switching frequency of 1kHz to 1MHz. The higher the frequency the higher the stiffness of the output voltage/current characteristics and higher efficiency of the converter but the smaller the distortion of the output voltage. The measurement results are slightly different from the theoretical results. The differences are caused by the parasitic inductances existing in the laboratory converter and neglected in the theoretical model.

1. WSTĘP

Głównym zadaniem energoelektroniki jest poszukiwanie energooszczędnych źródeł napięcia. Jedną z klas przekształtników, które mogą spełniać taki wymóg, są tranzystorowe powielacze napięcia. Powielacze tranzystorowe są przekształtnikami energoelektronicznymi, w których magazynami energii są tylko i wyłącznie kondensatory. Artykuł jest poświęcony analizie właściwości tranzystorowych powielaczy napięcia o mocy kilkuset watów, która przekracza znacznie moc powielaczy spotykanych w praktyce.

1.1. Stan dotychczasowy

W wielu zastosowaniach wymagane jest powielanie napięcia. Przykładem są układy, w których źródłem zasilania jest bateria lub akumulator niskonapięciowy, gdzie nie istnieje potrzeba stosowania transformatora (przyrządy pomiarowe, urządzenia elektryczne aeronautyki). Wymogi, jakie stawia się tym urządzeniom, to: odpowiednio wysoka sprawność, małe gabaryty i mała masa. Wymogom tym odpowiadają w wielu przypadkach powielacze tranzystorowe. Są one naturalnym rozwinięciem powielaczy diodowych [5]. Powielacze tranzystorowe zaliczane są do klasy przekształtników zwanych przekształtnikami z przełączalnymi kondensatorami (switched-capacitor (SC)). Przykładem przekształtnika o współczynniku powielania $M=V_o/V_g=5$ jest struktura z rys. 1. Sterowanie zaworów odbywa się tak, jak pokazuje to rys. 2. Jest to jedna z możliwych topologii/struktur powielaczy. Nazywana jest topologią Fibonacciego [1]. Wielkością charakteryzującą te przekształtniki jest współczynnik powielania $M=V_o/V_g$.



Rys. 1. Powielacz napięcia stałego z czterema kondensatorami o współczynniku powielania $M=V_o/V_g=5$ i topologii Fibonacciego

Rys. 2. Schemat sterowania zaworów
Fig. 2. Switching gate signals for two phases *(1) and *(2)

Fig. 1. SC converter with 5 capacitors and the step-up conversion ratio $M=V_o/V_g=5$

Stan dotychczasowy w zakresie tematu przedstawiono w pracach [1], [4]. Literatura tam podana obejmuje wyniki prac teoretycznych i laboratoryjnych. Praca [4] jest poświęcona syntezy powielaczy napięcia. Prace [2], [3] są ukierunkowane na powielacze o wyższej mocy. Podano w nich teoretycznie i symulacyjnie wyniki badań powielacza napięcia pracującego w układzie otwartym oraz ze stabilizacją napięcia wyjściowego o mocy przewyższającej moce

znanych z literatury rozwiązań. Niniejsza praca jest kontynuacją pracy [3]. Rozszerzeniem są tu wyniki pomiarów przekształtnika laboratoryjnego.

1.2. Motywacja

Powodem podjęcia badań nad tranzystorowymi powielaczami napięcia stałego była potrzeba realizacji powielacza o znacznie większej mocy od mocy powielaczy dotychczas opisywanych. Praca niniejsza ma na celu przedstawienie właściwości przekształtnika poprzez jego zasadę działania i charakterystyki główne, które stanowią podstawę do jego oceny. Praca jest jednocześnie punktem wyjścia do badań laboratoryjnych.

1.3. Założenia

Tematem analizy są powielacze tranzystorowe napięcia stałego (SC), zbudowane na podstawie struktury Fibonacciego. Wszystkie obliczenia i badania wykonywane są przy stałym współczynniku wypełnienia $D=0.5$. Przykładowym modelem, na którym przeprowadzono badania, jest model powielacza napięcia stałego DC-DC o współczynniku powielania $M=2$.

1.4. Model

Przy modelowaniu zaworów przyjęto następujące założenia:

- tranzystor MOSFET zamodelowano jako przełączaną natychmiastowo rezystancję R_{ON}/R_{OFF} ; nazwany zaworem prostym,
- diodę opisano za pomocą modelu odcinkowo liniowego.

1.5. Metodyka

Badania zostały przeprowadzone w następujący sposób:

- za pomocą programu TCAD 4.2 przeprowadzono symulację dla stanów przejściowych i ustalonych, przy zmianach prądu obciążenia, częstotliwości pracy oraz pojemności,
- wykorzystując model analityczny zbudowany za pomocą programu Mathematica wykonano obliczenia dla stanu ustalonego przy takich warunkach jak w punkcie 1.3,
- wykonano i przebadano model laboratoryjny i przeprowadzono jego badanie.

1.6. Wyniki

Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci następujących charakterystyk:

- charakterystyki zewnętrzne,
- charakterystyki odkształcenia napięcia wyjściowego (jest to wartość międzyszczytowa składowej zmiennej napięcia wyjściowego),
sprawności, wyrażone jako funkcje: prądu obciążenia, częstotliwości pracy $1/T_i$, pojemności kondensatorów.
- przebiegów czasowych badanego układu laboratoryjnego.

1.7. Struktura pracy

W pracy przyjęto następującą strukturę:

- praca dzieli się na dwie części; pierwsza z nich to model powielacza S.C , w którym zastosowano zawory proste i diody,
- druga część to model symulacyjny dla programu TCAD i eksperyment laboratoryjny,
- cała praca jest podsumowana wynikami i ich omówieniem,
- na podstawie wyników zostały opracowane wnioski końcowe.

2. ZAŁOŻENIA

Założenia ogólne:

- Przedmiotem analizy są powielacze tranzystorowe napięcia stałego zbudowane na podstawie struktury Fibonacciego.
- Przykładowym modelem, na którym przeprowadzono badania, jest model powielacza napięcia stałego DC-DC o współczynniku powielania $M=2$.
- Badania symulacyjne prowadzono za pomocą program TCAD 4.2 , a badania analityczne przy zastosowaniu programu Mathematica.

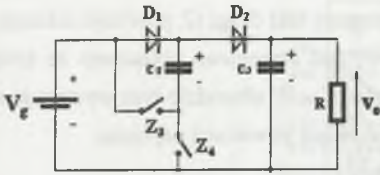
Założenia szczegółowe :

- Jako model tranzystora MOSFET przyjęto rezystancję R_{ON}/R_{OFF} , która jest przełączana natchmiastowo. Model nazwano zaworem prostym ($R_{DON}=0.3\Omega$, $R_{OFF}=10k\Omega$).
- Przyjęto następujące wartości odniesienia: $I_{odn}=10A$, $P_{odn}=1000W$ (odpowiada to $I_{odn}\approx 0.03 E/R_{ON}$).
- Diodę opisano za pomocą modelu dwuodcinkowo liniowego ($U_{TH}=0.6V$, $R_F=0.175\Omega$).
- Analiza wykonywana jest przy stałym współczynniku wypełnienia $D=0.5$.
- Napięcie zasilania, DC ($100V=const$).
- Moc wyjściowa $P_o=V_o I_o$ ($\approx 500W$).
- Częstotliwość jest traktowana jako parametr (do 1000kHz).
- Pojemności kondensatorów są traktowane jako parametry.

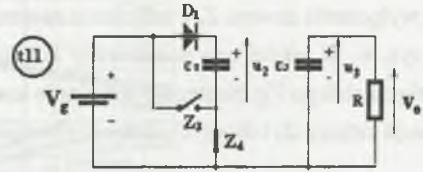
3. MODEL PWL

3.1. Schematy zastępcze

Model analityczny PWL powielacza napięcia z zaworami prostymi i diodami powstał na podstawie układu z rys. 3. Sterowanie zaworów odbywa się tak jak pokazano na rys. 2.



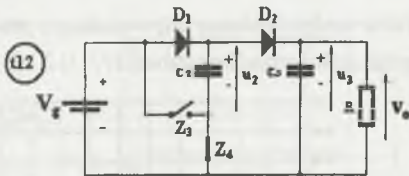
Rys. 3. Schemat powielacza napięcia, $M=2$
Fig. 3. DC-DC multiplier, $M=2$



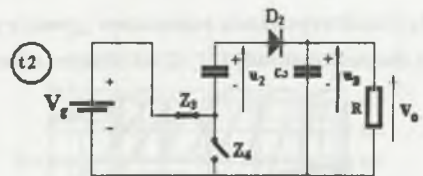
Rys. 4. Pierwszy schemat zastępczy powielacza z rys. 3 w pierwszym takcie pracy, $t11$ (dioda D_2 nie przewodzi)
Fig. 4. Equivalent circuit $t11$, Z_4 and diodes D_1 are on

Model ten opisuje stan ustalony za pomocą trzech schematów zastępczych, przy czym w takcie pierwszym wystąpić mogą dwa schematy.

Schemat zastępczy w pierwszym takcie pracy $t11$ dla włączonego zaworu Z_4 pokazano na rys. 4. W takcie pierwszym załączony jest zawór Z_4 i przewodzi dioda D_1 , następuje ładowanie kondensatora C_2 ze źródła V_g . W obwodzie tym zawarte są rezystancje zaworu Z_4 i diody D_1 , poprzez które ładuje się kondensator C_2 . W tym czasie następuje rozładowanie kondensatora C_3 połączonego z rezystancją obciążenia R .



Rys. 5. Drugi schemat zastępczy powielacza z rys. 3 w pierwszym takcie pracy, $t12$, przy przewodzącej diodzie D_1 i D_2
Fig. 5. Equivalent circuit $t12$, Z_4 and diodes D_1 , D_2 are on



Rys. 6. Schemat zastępczy powielacza w drugim takcie pracy, $t2$, powielacza z rys. 3
Fig. 6. Equivalent circuit $t2$, Z_3 and diodes D_2 are on

Jeżeli prąd odbiornika jest odpowiednio duży, to w takcie tym nastąpi rozładowanie kondensatora C_3 zanim skończy się wysterowanie zaworu Z_4 i zacznie przewodzić dioda D_2 . Spowoduje to powstanie nowego schematu zastępczego $t12$ podczas pierwszego taktu pracy. Schemat ten przedstawiono na rys. 5. W schemacie przewodzi zawór Z_4 oraz diody D_1 i D_2 . Kondensator C_2 jest ładowany, poprzez rezystancję diody D_1 , ze źródła napięcia stałego V_g , natomiast kondensator C_3 jest przyłączony do źródła napięcia V_g poprzez rezystancje diod D_1 i D_2 . Napięcie przyłożone do kondensatora C_3 spowoduje przepływ prądu w odbiorniku R .

Po wyłączeniu zaworu Z_4 i załączeniu zaworu Z_3 następuje takt drugi t_2 , powstaje schemat jak na rys. 6. W takcie tym naładowany kondensator C_2 jest szeregowo połączony ze źródłem napięcia stałego V_G . Następuje ładowanie kondensatora C_3 . W obwodzie tym występuje rezystancja zaworu Z_3 i diody D_2 oraz rezystancja R , obciążająca powielacz napięcia.

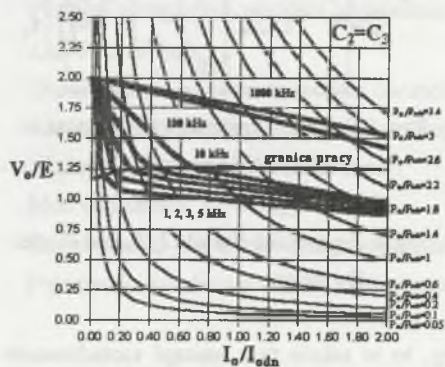
4. WYNIKI

Zasadnicze wyniki, to wyniki teoretyczne i symulacyjne. Dla celów weryfikacji zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych.

4.1. Charakterystyki główne

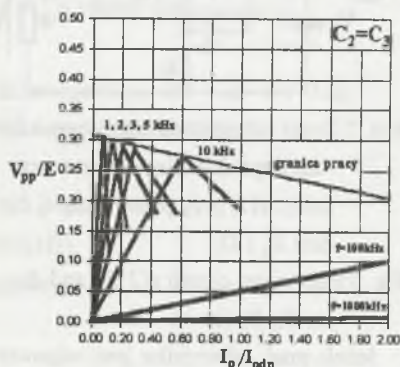
Charakterystyki główne to charakterystyki zewnętrzne $V_o/E = f(I_o/I_{odn})$ - rys. 7, charakterystyki odkształcenia napięcia wyjściowego $V_{pp}/E = f(I_o/I_{odn})$ - rys. 8 oraz charakterystyki sprawności $\eta = f(I_o/I_{odn})$ - rys. 9. Charakterystyki zostały sporządzone na podstawie modelu PWL za pomocą programu Mathematica. Na właściwości przekształtnika wyraźny wpływ ma częstotliwość pracy. Zwiększenie częstotliwości powoduje usztywnienie charakterystyk, zmniejszenie odkształcenia napięcia wyjściowego oraz zwiększenie się sprawności przekształtnika.

Na charakterystykach zaznaczono „granicę pracy”, która rozdziela obszar odpowiadający pracy dwuschematowej $t11$, $t2$ od obszaru odpowiadającego pracy trójschematowej $t11$, $t12$, $t2$.



Rys. 7. Charakterystyka zewnętrzna powielacza napięcia, $V_o/E = f(I_o/I_{odn})$

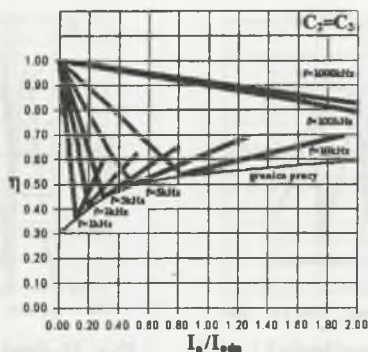
Fig. 7. Output characteristic $V_o/E = f(I_o/I_{odn})$



Rys. 8. Charakterystyka powielacza $V_{pp}/E = f(I_o/I_{odn})$

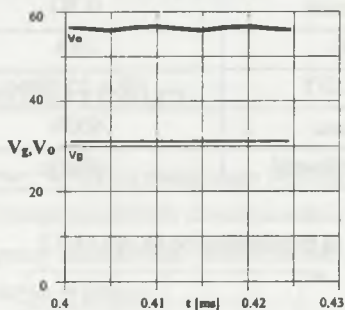
Fig. 8. Characteristic of output voltage deformation

$V_{pp}/E = f(I_o/I_{odn})$

Rys. 9. Sprawność powielacza napięcia $\eta = f(I_{\sigma}/I_{odn})$ Fig. 9. Efficiency characteristic $\eta = f(I_{\sigma}/I_{odn})$

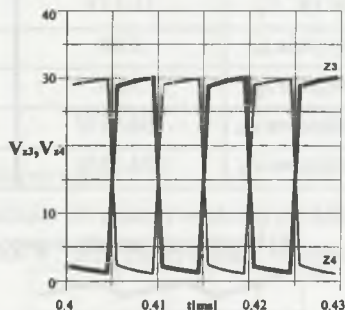
4.2. Wyniki symulacji TCAD

Symulację przeprowadzono przy takich samych założeniach, jakie przyjęto w modelu PWL. Przebiegi czasowe z symulacji (TCAD) przedstawiają prądy i napięcia badanego powielacza. Z analizowanych przebiegów wynika, że obwód przekształtnika nie zawiera indukcyjności, a jedynie pojemności i rezystancję.



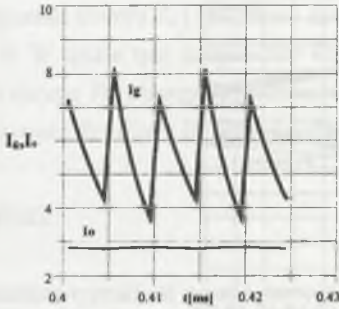
Rys. 10. Napięcie wejściowe i wyjściowe

Fig. 10. Input and output voltages

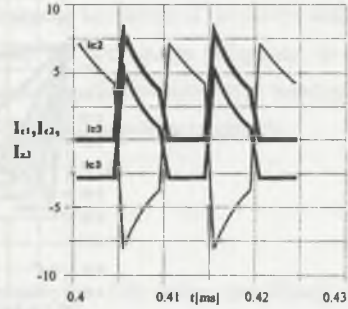


Rys. 11. Napięcie na zaworach

Fig. 11. Switch voltages



Rys. 12. Prąd wejściowy i wyjściowy
Fig. 12. Input and output currents



Rys. 13. Prąd zaworów i kondensatorów
Fig. 13. Switch and capacitors currents

4.3. Wyniki badań laboratoryjnych

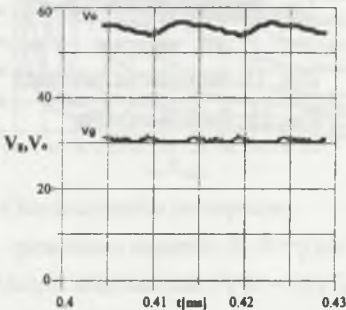
Przedmiotem badań jest powielacz DC-DC o $M=2$ o danych przedstawionych w tabeli 1. Wybrane oscylogramy napięć i prądów zamieszczono na rys. 14 do 17. Odpowiadają one przebiegom uzyskanym symulacyjnie, przedstawionym na rys. 10 do 13.

Parametry eksperymentu laboratoryjnego

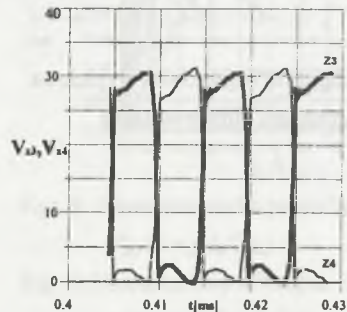
Tabela 1

Moc powielacza P_o	0-500W	MOSFET	IRFP 460
wyjście DC V_o	56.04V	V_{DSS}	500V
wejście DC V_g	31.17V	$R_{DS(ON)}$	0.3 Ω
Prąd wyjścia I_o	2.8A	I_D	20A
Prąd wejścia I_g	5.6A	DIODY	HFA 25 PB60
Moc wyjściowa P_o	156.91 W	V_{RWM}	600V
Moc wejściowa P_g	174.55W	Częstotliwość	100kHz

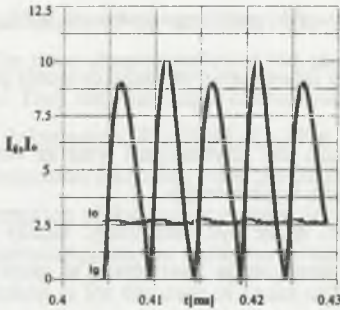
Wybrane oscylogramy napięcia i prądu są przedstawione na rys.14-17.



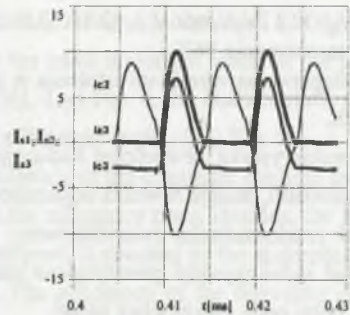
Rys. 14. Napięcie wejściowe i wyjściowe
Fig. 14. Input and output voltages



Rys. 15. Napięcie na zaworach
Fig. 15. Switch voltages



Rys. 16. Prąd wejściowy i wyjściowy
Fig. 16. Input and output currents



Rys. 17. Prąd zaworów i kondensatorów
Fig. 17. Switch and capacitors currents

Właściwości przełącznika eksperymentalnego wyrażone za pomocą charakterystyk głównych są zbliżone do właściwości charakterystyk modelu PWL. Na właściwości przełącznika wyraźny wpływ ma częstotliwość pracy. Zwiększenie częstotliwości powoduje usztywnienie charakterystyk we wszystkich analizowanych przypadkach. Zwiększenie częstotliwości powoduje w przełączniku zmniejszenie odkształcenia napięcia wyjściowego oraz zwiększenie się sprawności. Sprawność powielacza wraz ze wzrostem prądu obciążenia maleje. Z analizy powielacza napięcia wynika, że optymalne jest stosowanie kondensatorów o zbliżonych wartościach pojemności.

5. WNIOSKI I UWAGI

A. Z pracy wynikają następujące wnioski i uwagi teoretyczne:

1. Istnieje możliwość skonstruowania przełącznika SC o mocy większej niż kilka watów (w pracy analizowano przełącznik o mocy 500W, przy tranzystorach polowych takich jak użyto w pracy).
2. Sprawność przełącznika rośnie wraz z częstotliwością, np. przy prądzie obciążenia 5A wynosi około 72% przy częstotliwości 10 kHz i 90% przy częstotliwości 100kHz.
3. Sprawność powielacza maleje wraz ze wzrostem prądu obciążenia.
4. Pojemności kondensatorów wpływają na sztywność charakterystyki zewnętrznej i odkształcenia napięcia wyjściowego. Kompromisem są równe wartości obydwu pojemności.
5. Nie jest wskazane wykorzystywanie przełącznika tranzystorowo - diodowego do drugiego rodzaju pracy, tj. przy trzech schematach zastępczych.

B. Pomiary laboratoryjne wykazały względnie duże odstępstwa w stosunku do wyników uzyskanych teoretycznie, co można podsumować następująco.

1. Sprawność badanego powielacza laboratoryjnego jest niższa od sprawności powielacza - modelu teoretycznego dla następujących wartości napięć i prądów zasilających.

Przy $V_g=32.17V, V_o=56V, I_o=2.8A$ (156.91W) sprawność pomierzona wynosi 90%, a obliczona teoretycznie 96%.

1. Odstępstwa są wynikiem istnienia w powielaczu laboratoryjnym indukcyjności pasożytniczych.
2. Charakterystyka zewnętrzna badanego powielacza jest sztywniejsza wraz ze wzrostem częstotliwości, maleje również odkształcenie napięcia wyjściowego.

C. Model przekształtnika zweryfikowany pomiarowo może być stosowany, należy jednak uwzględnić indukcyjności pasożytnicze oraz straty przełączania zaworów. Tak poprawiony model w pełni odraza rzeczywisty układ.

D. W kontynuacji pracy należy przeprowadzić badania modelu teoretycznego przekształtnika zawierającego indukcyjności.

LITERATURA

1. Cheong S.V., Chung H.: Inductorless DC-to-DC converter with high power density, IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 41, No. 2, April 1994.
2. Ombach G.: Analiza tranzystorowych powielaczy napięcia stałego. Praca dyplomowa Politechniki Łódzkiej, filia w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, czerwiec 1996.
3. Grzesik B., Ombach G.: Przekształtnik energoelektroniczny DC/DC typu SC - charakterystyki główne. Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektrotechniki PPEE'97- Ustroń Jaszowiec Marzec 1997, materiały konferencyjne, s. 205-210.
4. Makowski M.: On topological synthesis of PWM DC-DC power converters, Praca doktorska Politechniki Gdańskiej, 4, pp. 34-63, Gdańsk, kwiecień 1995.
5. Lin P.M., Chua L.O.: Topological generation and analysis of voltage multiplier circuits, IEEE Transactions on circuits and systems, Vol. Cas-24, No. 10, October 1977.

Recenzent: Dr hab.inż.Marian Pasko, Prof.Politechniki Śląskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 lipca 1997 r.

Abstract

A PWL (piecewise linear) model of the switched-capacitor DC-DC converter is the subject of the papers [1] and [2]. It is the converter of considerable high power ($\approx 500W$). It has Fibonacci topology [4]. The model of the converter is based on the perfect switches and the perfect diodes. The analysis is carried out by means of piecewise linear method for which computations were done by Mathematica package. The simulator TCAD 4.2 was used for the prelimi-

nary simulations of the converter. The conversion ratio $M=2$ was assumed for the calculations. The main characteristics of the converter are the most important result of the presented research. They are: the output characteristic $V_o/E = f(I_o/I_{odn})$ Fig. 7, the characteristic of output voltage deformation, $V_{pp}/E = f(I_o/I_{odn})$ Fig. 8 and the efficiency $\eta = f(I_o/I_{odn})$ Fig. 9.

As the operation frequency rises the output characteristics of the converter become more stiff, its deformation of the output voltage decreases and the efficiency rises. Besides, the influence of the capacitance on the converter features was analysed. It resulted in the statement that the best solution is for the case of equal capacitances. The efficiency of the converter decreases when the load current rises. As the switching was assumed to be instantaneous, the obtained results do not include switching losses. The measurement results are slightly different from those obtained by means of PWL model. The measured output characteristics are not as stiff as theoretical ones the output voltage deformation decreases and the efficiency rises when the operation frequency rises.