ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1998
Seria: ELEKTRYKA z.160 Nr kol.1373

Bogusław GRZESIK
Tomasz STENZEL

MODEL PRZEKSZTAŁTNIKA ELEKTRONOWEGO PRACUJĄCEGO W UKŁADZIE GENERATORA MEISSNERA - REALIZACJA TCAD™

Streszczenie. Przedmiotem pracy jest przekształtnik elektronowy, zwany generatorem rezonansowym klasy C [2], [3], [5], [7], [8]. Jest on najczęściej opisywany za pomocą zależności uproszczonych (4.35) [3], które są podstawą do analizy i syntezy jego parametrów. Zależności te nie umożliwiają analizy przebiegów chwilowych i stanów nieustalonych, które mogą być wykonywane tylko za pomocą symulacji komputerowej, wymagającej odpowiedniego modelu.

Zasadniczym elementem modelu analizowanego przekształtnika jest model lampy elektronowej, którego struktura jest podobna do modelu tranzystora MOSFET. Zaproponowano model typu PWL, opisując go odpowiednimi zależnościami oraz za pomocą języka TCAD™. Model komputerowy TCAD™ zbudowano wykorzystując jego standardowe elementy, ponieważ symulator ten nie zawiera w swojej bibliotece lampy elektronowej. Podano algorytm identyfikacji jego parametrów.

Model lampy wykorzystano w modelu przekształtnika elektronowego pracującego w układzie generatora Meissnera. Model przekształtnika został poddany testowi symulacyjnemu. Wybrane wyniki zamieszczono jako ilustrację jego funkcjonowania.

TCAD™ MODEL OF MEISSNER CONVERTER BASED ON ELECTRONIC TUBE

Summary. The electronic tube converter, which is called class C resonant generator [2], [3], [5], [7], [8] is presented in this paper. The resonant generator has usually been described by the simplified formulae which are the basis for its analysis and the synthesis.

These formulae cannot be use for analysis of voltage/current waveforms and for transient analysis. Such an analysis could be realised by computer simulation with the help of the proper model of a tube.

The main part of a converter model is the electronic tube model. The structure of electronic tube model is similar to the model of MOSFET. The model is of PWL type.It is described by means of analytic formulae and also expressed in the language of the TCAD™ simulator. As this simulator does not have of library model of the electronic tube the relevant

model has been constructed using TCAD standard elements. The identification algorithm of its parameters is delivered.

The proposed model of the electronic tube has been used in the model of the electronic converter operating as a Maissner generator. The model of the converter has been tested by computer simulation. The selected results of the simulation are presented as an example of the model operation.

1. WPROWADZENIE

Współczesna technologia musi cechować się energooszczędnością i spełniać wymagania ekologii.

Jedną z takich technologii jest nagrzewanie pojemnościowe, w którym jako źródło napięcia wysokiej częstotliwości może być użyty przekształtnik elektronowy, pracujący w układzie generatora Meissnera.

Analiza i projektowanie tego typu urządzeń muszą być wspomagane komputerowo. Potrzeba ta była przyczyną podjęcia przez autora badań w zakresie modelowania i symulacji przekształtników elektronowych przeznaczonych do nagrzewania pojemnościowego.

Praca niniejsza poświęcona jest modelowi przekształtnika elektronowego (lampowego), pracującemu w układzie generatora Meissnera, opracowanemu w języku symulatora TCAD™ [1]. Jest to generator klasy C. Zasadniczym elementem modelu przekształtnika jest model lampy, który jest modelem odcinkami liniowym (PWL).

1.1. Motywacja

Pomimo znacznego rozwoju energoelektroniki półprzewodnikowej przekształtniki energoelektroniczne przełączane mogą pracować przy częstotliwościach nie przekraczających zwykle kilkunastu MHz.

Przekształcanie przy wyższych częstotliwościach realizowane jest za pomocą lamp elektronowych i to stanowiło motywację do podjęcia pracy nad ich odpowiednimi modelami komputerowymi.

Modele te mogą być wykorzystywane do analizy przekształtników elektronowych jak i do ich porównania z przekształtnikami energoelektronicznymi (np. z tranzystorowymi falownikami klasy E).

1.2. Cel

Celem pracy jest zaprezentowanie opracowanego modelu przekształtnika elektronowego, pracującego w układzie generatora Meissnera i zapisanego za pomocą języka symulatora TCAD™.

1.3. Założenia

W pracy przyjęto następujące założenia:

1. Model lampy i model przekształtnika są modelami odcinkami liniowymi/dwuliniowymi.
2. Poza lampą wszystkie elementy przekształtnika są liniowe.

Właściwości modelu przedstawia się na przykładzie przekształtnika elektronowego pracującego w układzie generatora Meissnera, bazującego na lampie elektronowej T-04/21[4] i przeznaczonego do nagrzewania pojemnościowego przy częstotliwości 29.4 MHz.

2. OPIS PRZEKSZTAŁTNIKA

Schemat przekształtnika przedstawiono na rys.1. Jest to generator Meissnera (ze sprzężeniem transformatorowym) [2], [3].

Przekształtnik złożony jest z lampy V i kondensatora blokującego C_b. Odbiornikiem jest obwód C_1R. Przekształtnik zasilany jest ze źródła E poprzez filtr C_dL_d. Sterowanie realizowane jest w obwodzie $L_2C_sR_s$.

Drgania generowane są w obwodzie L_1C_1R poprzez doładowywanie go odpowiednim prądem i_a ,kształtowanym przez lampę V. Prąd ten dostarczany jest do obwodu rezonansowego przez kondensator blokujący C_b. Przekształtnik zasilany jest prądowo, przy czym prąd dławika L_d jest dobrze wygładzony.

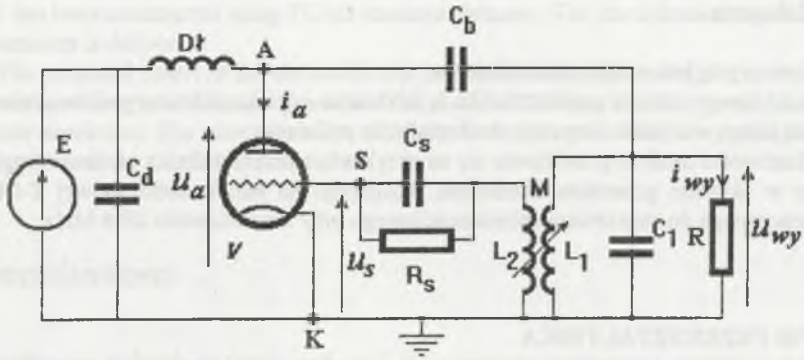
Generator może pracować właściwie, jeżeli spełnione są trzy warunki: 1) warunek amplitudy, 2) warunek fazy oraz 3) warunek kąta przewodzenia.

Warunek pierwszy wynika z tego, że przy właściwiej fazie napięcia siatkowego względem napięcia anodowego u_a niezbędna jest odpowiednia amplituda napięcia siatkowego u_s, które oprócz składowej zmiennej zawiera składową stałą. Uzyskuje się to przez odpowiedni dobór wartości indukcyjności wzajemnej M pomiędzy cewką L_1 obwodu głównego, a cewką L_2 obwodu siatkowego lampy i odpowiedni dobór opornika R_s, przy czym w rozwiązaniach technicznych istnieje możliwość płynnej zmiany współczynnika M.

Warunek fazy, przy właściwej wartości amplitudy napięcia siatkowego, wynika z konieczności zapewnienia odpowiedniego przesunięcia fazowego napięcia siatki u_s względem napięcia anody u_a,.

Przesunięcie to ($\approx n\pi$) zapewnione jest przez właściwe połączenie cewki L_2 z obwodem siatkowym - rys. 1.

Warunek trzeci, kąta przewodzenia, narzuca wymóg, aby kąt ten zawarty był w granicach (60-75°) [3] w przypadku generatorów pracujących w głębokiej klasie C.



Rys. 1. Układ generatora Meisssnera o sprzężeniu zwrotnym transformatorowym
Fig. 1. The Meisssner's generator with a transformer's feedback

3. MODEL PRZEKSZTAŁTNIKA

Zaproponowany statyczny model odwzorowuje ilościowo wszystkie istotne właściwości przekształtnika (generatora rezonansowego klasy C), takie jak: wysoka sprawność, praca przy różnej głębokości wysterowania, wpływ parametrów na przebiegi napięć i prądów (i ich odkształcenie). Najistotniejszym jego elementem jest model lampy-triody.

3.1. Model lampy

Chociaż istnieje możliwość wykorzystania modelu wielomianowego triody [5], zależność (1-55), to w niniejszej pracy proponuje się model odcinkowo liniowy (PWL), który jest wygodniejszy ze względu na przejrzystość i możliwość rozdzielenia procesu przekształcania na ciąg procesów opisanych równaniami liniowymi.

Model jest modelem statycznym, opisywanym zależnościami (1) i (2). Zależność (1) opisuje model w obszarze aktywnym dla $u_a \geq U_{ag} \,|\, U_s$:

$$i_a = \frac{1}{1 + K_{21} K_{22} u_S R_{PD8}} \left[\frac{1}{R_{PD8} + R_6} u_a + K_1 u_S + K_{21} K_{22} u_S u_a \right]. \tag{1}$$

Zależność (2) opisuje model w obszarze nasycenia dla $u_a \leq U_{ag} \,|\, U_s$:

$$i_a = \frac{u_a}{R_{PD8}} . \tag{2}$$

Napięcie U_{ag} określone jest zależnością (3):

$$U_{ag} \Leftarrow (1); (2) \,|\, U_s = const. \tag{3}$$

Model ten może być wyrażony za pomocą języka TCAD i przedstawiony w postaci schematu - rys.4.Dioda D4 w modelu TCAD jest diodą idealną, natomiast D8 i D16 są diodami doskonałymi. Model lampy ma dwa sterowane źródła prądu, J5, J7. Źródło J5 sterowane jest

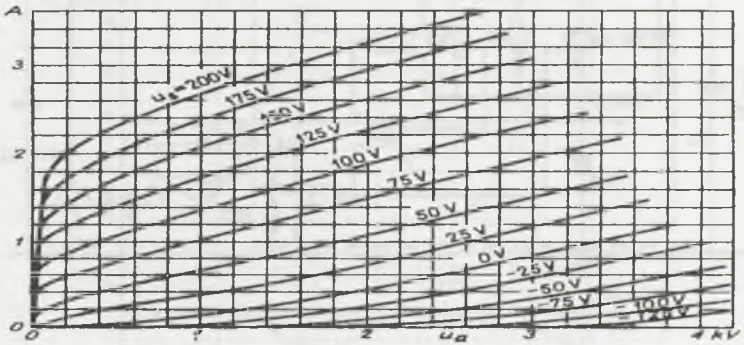
za pomocą napięcia U_s ze współczynnikiem K_1. Źródło J7 jest sterowane iloczynem napięć $K_{21}\,U_s$ i $K_{22}\,U_1$.

Przejście od równania (1) do (2) oznacza przełączanie diody D4. W stanie nasycenia lampy dioda przewodzi.

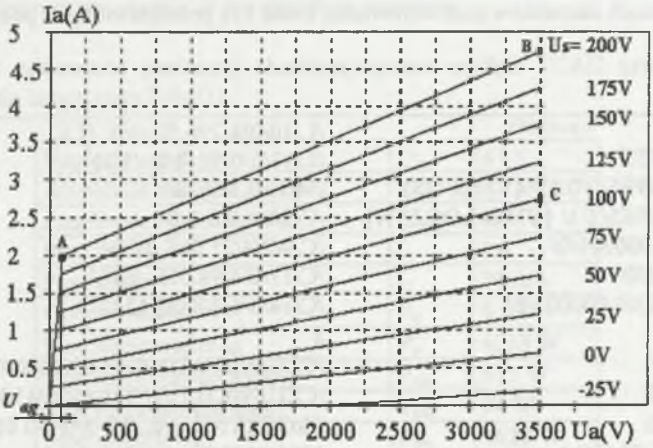
Parametry ustala się na podstawie katalogowej statycznej charakterystyki anodowej lampy. Odpowiedni algorytm zaprezentowano na przykładzie triody T-04/21.

W pierwszym kroku określa się na podstawie katalogowej statycznej charakterystyki anodowej triody, takiej jak na rys.2, przybliżoną charakterystykę anodową PWL - rys.3.Rezystancja przewodzenia R_{PD8} diody D8 odpowiada nachyleniu charakterystyki na odcinku 0A - rys. 3.Suma rezystancji przewodzenia R_{PD8} diody D8 i rezystora $R6$ odwzorowuje nachylenie charakterystyki anodowej przy napięciu siatki U_s = 0V.

Współczynniki K_1, K_{21} i K_{22} określa się na podstawie układu trzech równań, podstawiając do równania (1) wartości napięcia U_a i prądu I_a oraz napięcia siatki U_s dla punktów A, B i C, zaznaczonych na statycznej charakterystyce anodowej - rys.3.



Rys. 2. Statyczna charakterystyka anodowa triody T-04/21
Fig. 2. Anode characteristic of triode T-04/21



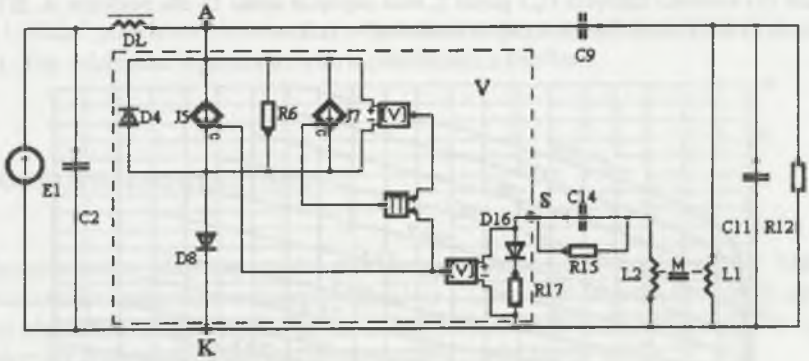
Rys. 3. Statyczna charakterystyka anodowa modelu PWL TCAD triody T-04/21
Fig. 3. Anode characteristic of PWL TCAD model triode T-04/21

3.2. Model przekształtnika TCAD

Model TCAD przekształtnika (generatora mocy W.CZ, nazywany generatorem Meissnera) pokazano na rys.4.

Przekształtnik jest obciążony odbiornikiem reprezentowanym przez równoległy układ elementów C11 R12. Indukcyjności L10 i L13 wraz ze sprzężeniem indukcyjnym M realizują ujemne sprzężenie zwrotne, zapewniające warunek amplitudy drgań generatora. Indukcyjność L10 uzwojenia pierwotnego transformatora stanowi integralną część obwodu rezonansowego, w który wchodzi pojemność C11.

Obwód składający się z elementów R15;C14 zapewnia odpowiednią ujemną składową napięcia siatki.



Rys.4. Schemat modelu TCAD przekształtnika elektronowego
Fig. 4. TCAD converter model of the electronic converter

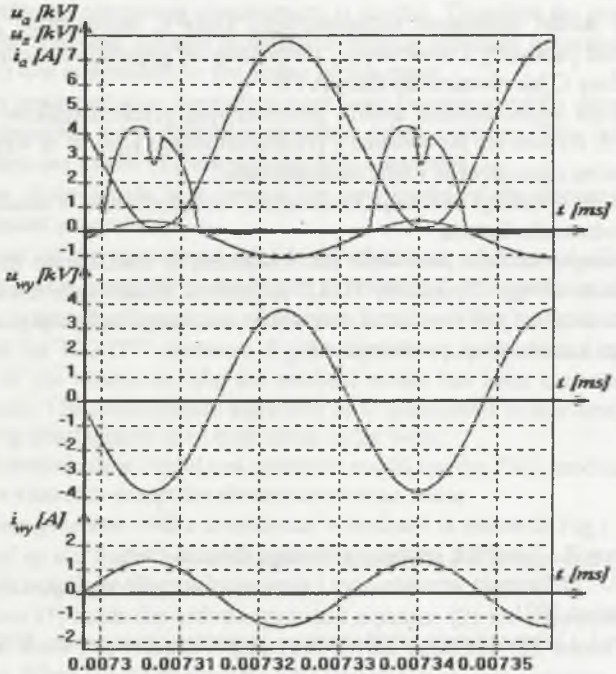
Model TCAD przekształtnika elektronowego, zawierający informacje o topologii z rys. 4 i parametrach elementów oraz sterowaniu, może być przedstawiony w postaci listingu:

Tablica 1

!/17/8/	/L/10/0/4/296.5E-9/0/ {L1}
/E/1/0/1/1E-3/4E3/	/L/13/5/0/9E-9/0/ {L2}
/J(STER)/5/2/3/9E5/0/0.01/ {STER US}	/M/10/13/3E-8/
/J(STER)/7/2/3/9E5/2/1/ {STER LOCZYN}	/C/2/0/1/1E-7/0/
/D/4/3/2/9E5/0.000001/0/	/C/9/2/4/25.06E-12/0/
/D/8/3/0/9E5/45/0/	/C/11/0/4/98.01E-12/0/
/D/16/6/7/6.99E3/0.000001/0/	/C/14/5/6/1000E-12/0/
/R/6/2/3/5E3/	$
/R/12/0/4/5500/	/CZUJNIK/0/U/6/0/1/-600/600/0/ {US}
/R/15/5/6/4.3E3/	/CZUJNIK/1/U/2/3/1/-4500/4500/0/ {U1}
/R/17/0/7/0.7E3/	/ILOCZYN/2/2/0.21E-3/0/0/0.015/0/1/-
/L/3/1/2/200E-6/0/ {DL}	1000/1000/0/

4. WYNIKI SYMULACJI

Zaproponowany model przetestowano symulacyjnie. Reprezentatywny wynik symulacji przedstawiono na rys. 5.



Rys.5. Przebiegi napięć i prądów modelu przekształtnika elektronowego
Fig. 5. Voltage/current waveforms of the electronic converter

W tablicy 2 zestawiono parametry charakterystyczne modelu TCAD generatora kl. C (f=29.4 MHz) dla lampy typu T-04/21

Tablica 2

Napięcie anody	U_{ao}	4 kV
Amplituda napięcia anody	U_{al}	3.8 kV
Amplituda napięcia siatki	U_{sl}	470 V
Prąd anody	I_a	1A
Prąd siatki	I_s	78 mA
Opornik siatkowy	R_s	4.3 kΩ
Moc doprowadzona	P_o	4253 W
Moc rozproszenia anody	P_{astr}	615 W
Moc rozproszenia siatki	P_{sstr}	94 W
Moc wyjściowa	P_{wy}	3628 W
Sprawność	η_a	85 %

5. WNIOSKI

1. Opracowany model lampy elektronowej, będący zasadniczym elementem modelu przekształtnika, odwzorowuje w sposób odcinkowo liniowy statyczną charakterystykę rzeczywistej triody.
2. Przedstawiony model generatora rezonansowego klasy C reprezentuje poprawnie jego wszystkie istotne parametry i właściwości, niezależnie od głębokości wysterowania lampy, zarówno dla klasy C jak również dla klasy A i B.
3. Model umożliwia wszechstronną analizę porównawczą przekształtników elektronowych (np.: klasy A, B, C) oraz ich porównanie z przekształtnikiem klasy E ze względu na sprawność, maksymalną częstotliwość i moc zainstalowaną.
4. Analiza wyników symulacji wskazuje konieczność uwzględnienia w modelu lampy nieliniowości obwodu siatka-katoda.
5. W zaproponowanym modelu sterowanie jest klasyczne, tj. realizowane za pomocą sprzężenia transformatorowego. Symulator TCAD umożliwia zbudowanie modelu przekształtnika, w którym możliwe jest niezależne sterowanie fazą i amplitudą napięcia siatkowego u_s przy innym jego kształcie (np. prostokątnym).

LITERATURA

1.Iwan K., Szczęsny R.: Tcad 6.2, Instrukcja obsługi, Gdańsk 1995.
2.Ebert J. , Fiok A. : Obliczenia wzmacniaczy i generatorów mocy wielkiej częstotliwości.WNT, Warszawa 1971.
3.Ryżko S. , Ebert J. : Wzmacniacze rezonansowe i generatory mocy w.cz. WNT, Warszawa 1968.
4.UNITRA LAMINA Electronic Tubes Catalogue, Piaseczno, Poland 1973.
5.Seely S.: Electronic Circuits, Holt, Rinchart and Winston, Inc., 1968.
6.Kazimierczuk M.K., Czarkowski D.: Resonant Power Converters, John Wiley & Sons, Inc., USA 1995.
7.Davies J., Simpson P.: Induction Heating Handbook, McGraw-Hill, London, ... , 1979.
8.Zagajewski T.: Układy elektroniki przemysłowej. WNT, Warszawa 1973.
9.Stenzel T.: Model TCAD przekształtnika elektronowego do nagrzewania pojemnościowego. The 19th International Scientific Symposium of Students and Young Research Workers, Zielona Góra, 28-30 April 1997, Vol. II Electrotehnics and Electronics, pp.73-79.

UWAGI DODATKOWE

1. Praca została wykonana w ramach projektu badawczego KBN Nr 8T10A 017 12.
2. Niniejszy artykuł jest oparty na materiale referatu [9] przedstawionego na The 19th International Scientific Symposium of Students and Young Research Workers, Zielona Góra , 28-30 April 1997r

Recenzent: Prof.dr hab.inż Antoni Dmowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 30 lipca 1997 r.

Abstract

The contemporary technology should be environmental and energy efficient. The dielectric heating helps to realise such technologies for which the efficient analysis and designing, supported by relevant computing environment, is needed. Therefore the problem of computer modelling of the converter devoted to dielectric heating (resonant generator class C based on electronic tube) was undertaken by the author of this paper.

The modern semiconductor converters work with frequency over a dozen or so MHz, but the highest frequencies are reserved for electronic tube converters. This is the motivation for creating the computer model of the electronic tube converters.

The purpose of the article is to present the new model of the electronic tube converters Fig.1 (the Meissner generator).

The main part of the converter model is the electronic tube model. The structure of the electronic tube model is similar to the model of MOSFET. The model is of PWL (piecewise linear) type. It is described by means of analytic formulae (1), (2), (3) and also expressed in the language of the TCAD™ simulator, Fig.4 and table 1. As this simulator does not have a library model of the electronic tube the relevant model has been constructed using TCAD standard elements. The identification algorithm of its parameters is delivered .

The following assumptions have been taken in the work:

1. The electronic tube model and converter model are the PWL models.
2. All the elements except the electronic tube are linear.

The Meisssner generator with a transformer's feedback is shown in Fig.1.

The model of an electronic tube is described by analytic PWL formulae (1), (2), (3) and by means of TCAD language - Fig. 4.

The equation (1) holds for active regain and equation (2) for saturation of the tube. The change between these two reasons is governed by the condition (3), which is realised by the diode D4 Fig. 4. When the diode is on the tube operates in saturation region.

The TCAD model of the tube contains one ideal diode D4 and two perfect diodes D8 and D16. Two current sources, J5 and J7, are voltage controlled. The first one, J5 is controlled by grid voltage while the second, J7 by the product of the grid and anode voltages.

The conducting resistance R_{PD8} of the diode D8 represents the slope of 0-A anode characteristic segment. The sum of the conducting resistance R_{PD8} of the diode D8 and the resistance R6 corresponds with the slope of anode characteristic for $U_s = 0$.

The coefficients K_1 , K_{21} and K_{22} are derived using the system of three equations obtained from (1) and the anode characteristic presented in Fig. 3 substituting data for points A, B and C form Fig. 3.

The model of the converter has been built for the electronic tube T04/21 [4]. It has been thoroughly examined by simulation. The selected results have been presented in Fig. 5. The simulation has proved that the proposed model has all the main features of the converter and can be used for analysis and design of such converters.

To get the more precise model of the converter it is necessary to include the following problems concerning the electronic tube in further research:

- non-linearity of the grid cathode circuit and
- its parasitic capacitance and inductance.