

Janusz ZARĘBSKI*
Katarzyna GÓRECKA*
Krzysztof GÓRECKI*

ANALIZA WPLYWU NIELINIOWOŚCI MODELU TERMICZNEGO TRANZYSTORA MOS MOCY NA CHARAKTERYSTYKI PRZETWORNICY BOOST

W pracy przeanalizowano zasadność stosowania nieliniowego modelu termicznego tranzystora MOS mocy przy analizach charakterystyk przetwornicy boost. Przedstawiono postać rozważanego modelu termicznego oraz wyniki elektrotermicznej analizy stanów przejściowych badanego układu, uzyskane przy uwzględnieniu nieliniowości modelu termicznego oraz przy pominięciu tej nieliniowości. Badania przeprowadzono dla przetwornic zawierających dwa różne zestawy półprzewodnikowych elementów kluczujących.

SŁOWA KLUCZOWE: modele termiczne, przetwornica boost, SPICE, analiza elektrotermiczna

1. WPROWADZENIE

Przetwornice dc-dc znajdują zastosowanie w układach zasilających urządzenia elektroniczne. Do najpopularniejszych należą dławikowe przetwornice boost [1, 2]. Właściwości przetwornic są charakteryzowane przez szereg parametrów i charakterystyk, np. sprawność energetyczną, zależność napięcia wyjściowego od współczynnika wypełnienia sygnału sterującego lub rezystancji obciążenia [3].

Jednym z czynników wpływających na te charakterystyki i parametry jest temperatura [4]. To właśnie wpływ temperatury na właściwości przyrządów półprzewodnikowych pracujących w przetwornicy rzutuje na kształt jej charakterystyk i wartości parametrów eksploatacyjnych.

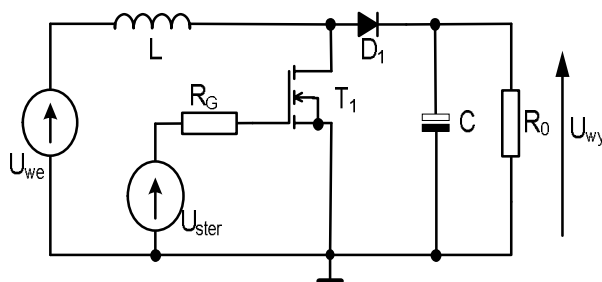
Wartość temperatury wnętrza elementu wynika z wartości temperatury otoczenia oraz ze zjawiska samonagrzewania. Prawidłowe wyznaczenie wartości temperatury wnętrza elementu, zależnej od mocy wydzielanej w tym elemencie oraz od warunków chłodzenia tego elementu, jest istotne z punktu widzenia wiarygodności obliczanych charakterystyk elementu oraz szacowania jego niezawodności. W celu wyznaczenia temperatury wnętrza przeprowadza się analizę elektrotermiczną układu, w której stosuje się elektrotermiczne modele

* Akademia Morska w Gdyni.

elementów półprzewodnikowych. Jednym z komponentów modelu elektrotermicznego jest model termiczny [5, 6].

Przy elektrotermicznej analizie układów elektronicznych typowo wykorzystuje się skupione modele termiczne, w których droga przepływu ciepła ze struktury półprzewodnikowej do otoczenia jest modelowana przez przejściową impedancję termiczną $Z_{th}(t)$ [7] - przy analizie stanów przejściowych lub przez rezystancję termiczną R_{th} - przy analizie stałoprądowej. Typowo stosowany jest liniowy model termiczny [8, 9], w którym przejściowa impedancja termiczna jest niezależna od warunków pracy elementu. Jednak jest to uproszczenie rzeczywistej sytuacji, w której przebieg przejściowej impedancji termicznej zmienia się m.in. w funkcji mocy wydzielanej w elemencie [10].

W pracy zbadano wpływ nieliniowości modelu termicznego tranzystora MOS mocy na charakterystyki dławikowej przetwornicy boost, której schemat przedstawiono na rysunku 1.



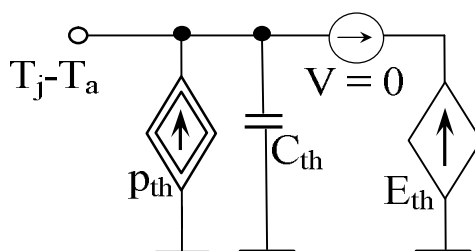
Rys. 1. Schemat dławikowej przetwornicy BOOST

Przeprowadzono elektrotermiczne analizy stanów przejściowych przy wykorzystaniu hybrydowych elektrotermicznych modeli tranzystora MOS oraz diody. Modele takie opisano w pracy [4]. Jednakże w modelach tych stosowana jest liniowa zależność temperatury wnętrza od wydzielanej mocy. Jak wynika między innymi z prac [11, 12] model taki jest w ogólności nieliniowy. Badania przeprowadzono dla dwóch par elementów półprzewodnikowych: tranzystora MOS mocy typu IRF640 w parze z diodą Schottky'ego typu 1N5822 oraz tranzystor MOS mocy typu IRF840 z diodą p-n typu BY229. Obydwa rozważane tranzystory montowane SA w obudowy TO-220.

2. ZASTOSOWANE MODELE TERMICZNE

Elektrotermiczną analizę stanów przejściowych przeprowadzono dla czterech różnych postaci zależności opisujących wpływ mocy wydzielanej w tranzystorze na jego rezystancję termiczną. W pierwszym przypadku rozważono prawie idealne warunki chłodzenia tranzystora MOS. W tym przypadku przyjęto stałą wartość

rezystancji termicznej $R_{th} = 0,1 \text{ mK/W}$. W drugim przypadku wykorzystano liniowy model termiczny i wartość rezystancji termicznej odpowiadającą pracy tranzystora bez radiatora wynoszącą $R_{th} = 55 \text{ K/W}$. Trzeci przypadek dotyczy wykorzystania nieliniowego modelu termicznego. W oparciu o zależności $R_{th}(p)$ sformułowane w pracy [12] zaproponowano obwodową postać nieliniowego modelu termicznego, w którym zamiast klasycznego układu RC zastosowano równoległe połączenie kondensatora reprezentującego pojemność cieplną oraz sterowanego źródła napięciowego reprezentującego tę zależność (rys. 2).



Rys. 2. Reprezentacja obwodowa nieliniowego modelu termicznego elementu półprzewodnikowego

Na rys. 2 sterowane źródło prądowe p_{th} reprezentuje moc wydzielaną w tranzystorze MOS, C_{th} – pojemność cieplną tranzystora, natomiast E_{th} – jego nieliniową rezystancję termiczną. Źródło napięciowe o zerowej wydajności monitoruje wartość mocy wydzielanej w elemencie półprzewodnikowym. Prąd ten steruje wydajnością źródła napięciowego E_{th} . Napięcie na zaciskach sterowanego źródła prądowego p_{th} odpowiada przyrostowi temperatury wnętrza elementu ponad temperaturę otoczenia.

Jak wynika z pracy [12] dla tranzystora MOS mocy w obudowie TO-220 pracującego bez radiatora rezystancja termiczna dana jest wzorem

$$R_{th} = 40\text{K/W} + 15\text{K/W} \cdot \exp\left(\frac{-p}{2\text{W}}\right) \quad (1)$$

w którym p oznacza moc wydzielaną w modelowanym tranzystorze. Z kolei, dla tego tranzystora umieszczonego na dużym radiatorze aluminiowym rezystancję tę opisuje wzór

$$R_{th} = 4\text{K/W} + 2,3\text{K/W} \cdot \exp\left(\frac{-p}{20\text{W}}\right) \quad (2)$$

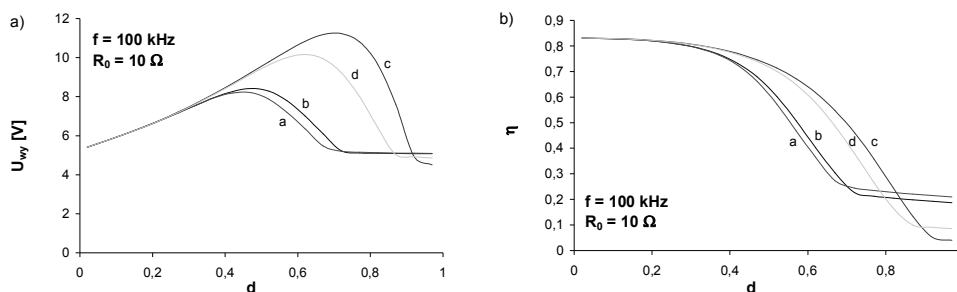
We wszystkich rozważanych przypadkach wykorzystano liniowy model termiczny diody, w którym przyjęto $R_{th}=20 \text{ K/W}$ dla diody BY229 oraz $R_{th}=50 \text{ K/W}$ dla diody 1N5822. Wartości powyższe zaczerpnięto z pracy [13], podobnie jak parametry modeli tranzystorów i diod oraz elementów biernych zawartych w przetwornicy.

3. WYNIKI BADAŃ

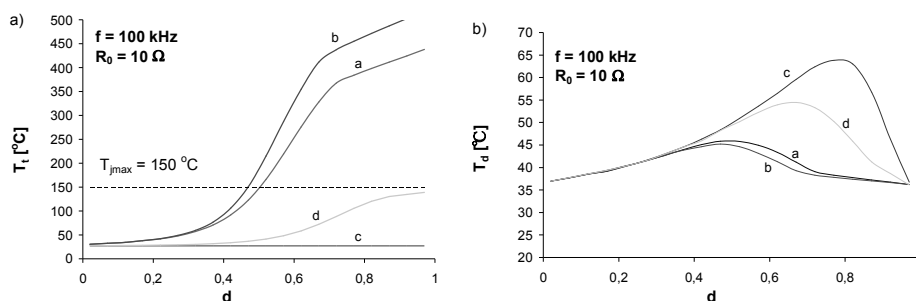
Przeprowadzono elektrotermiczną analizę stanów przejściowych układu z rys.1 w programie SPICE, wykorzystując opisane wcześniej 3 typy modeli termicznych tranzystora MOS. Wyznaczono charakterystyki rozważanej przetwornicy w stanie termicznie ustalonym. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 3 - 10. Na tych rysunkach krzywa a - dotyczy nieliniowego modelu tranzystora pracującego bez radiatora, krzywa b – liniowego modelu tego tranzystora pracującego bez radiatora, krzywa c – odpowiada prawie idealnym warunkom chłodzenia tranzystora, natomiast krzywa d – dotyczy nieliniowego modelu tranzystora umieszczonego na radiatorze. Wybrane wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów (krzywa e) zaczerpniętymi z pracy [13].

Badania przeprowadzono przy ustalonej wartości rezystancji obciążenia $R_0 = 10 \Omega$ i przemiatanej wartości współczynnika wypełnienia sygnału sterującego d oraz dla stałej wartości $d = 0,5$ i przemiatanej wartości rezystancji obciążenia. Badano wpływ wymienionych parametrów na napięcie wyjściowe i sprawność energetyczną przetwornicy oraz przyrosty temperatury wnętrza tranzystora i diody ponad temperaturę otoczenia. W analizach przyjęto wartość temperatury otoczenia $T_a = 27^\circ\text{C}$.

Rysunki 3 - 6 dotyczą przetwornicy z tranzystorem IRF840 i diodą BY229, natomiast rysunki 7-10 dotyczą układu z tranzystorem IRF640 i diodą 1N5822.

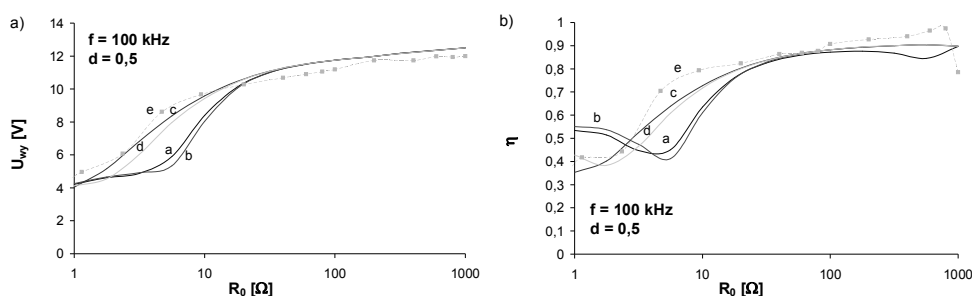


Rys. 3. Zależności napięcia wyjściowego (a) i sprawności energetycznej (b) przetwornicy boost od współczynnika wypełnienia sygnału sterującego

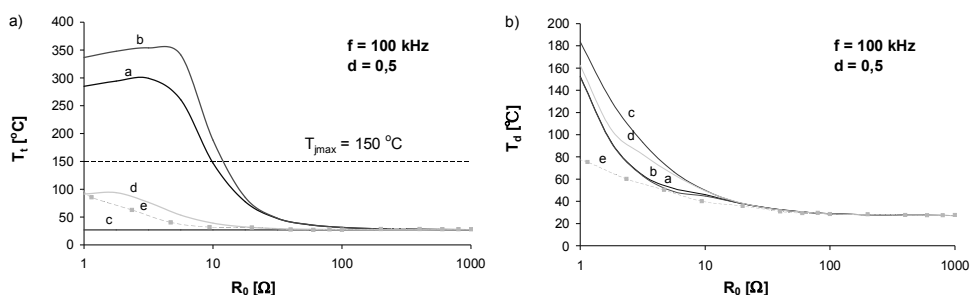


Rys. 4. Zależności temperatury wnętrza tranzystora (a) i diody (b) pracujących w przetwornicy boost od współczynnika wypełnienia sygnału sterującego

Z rysunków 3 – 4 widać, że warunki chłodzenia istotnie wpływają na rozważane charakterystyki przy wartościach d większych od 0,3. W szczególności na charakterystyce $U_{wy}(d)$ widać, że pogorszenie warunków chłodzenia skutkuje zmniejszeniem wartości maksymalnej napięcia wyjściowego, oraz przesunięciem maksimum rozważanej charakterystyki ku mniejszym wartościom d . W rozważanym przypadku wartości maksymalne napięcia wyjściowego mogą się różnić nawet o 50%. Z kolei sprawność energetyczna jest malejącą funkcją współczynnika d , a jej wartość maleje przy pogarszaniu warunków chłodzenia tranzystora. W zakresie dużych wartości współczynnika d na skutek wzrostu rezystancji włączenia tranzystora MOS dioda nieprzerwanie przewodzi prąd, skutkiem czego napięcie wyjściowe jest mniejsze od napięcia wejściowego. Zjawisko samonagrzewania ogranicza zakres dopuszczalnych zmian współczynnika d , przy których tranzystor pracuje jeszcze w warunkach bezpiecznej pracy. Przykładowo dla tranzystora pracującego bez radiatora dopuszczalna wartość temperatury wnętrza T_{jmax} tego elementu zostanie przekroczona dla d większych od 0,45. Warto zauważyć, że maksymalna wartość temperatury diody maleje wraz z pogarszaniem się warunków chłodzenia tranzystora.

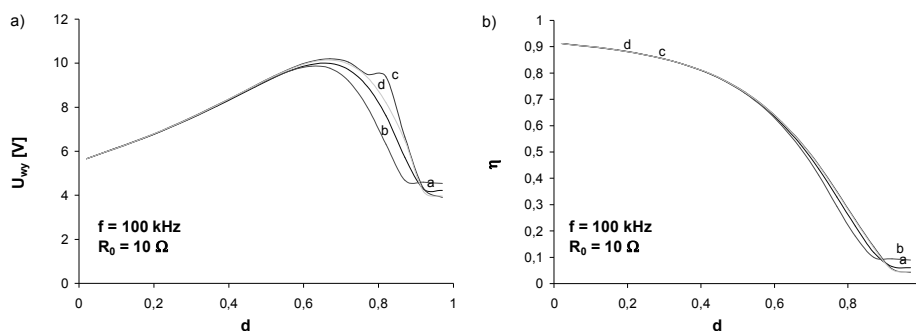


Rys. 5: Zależności napięcia wyjściowego (a) i sprawności energetycznej (b) przetwornicy boost od rezystancji obciążenia

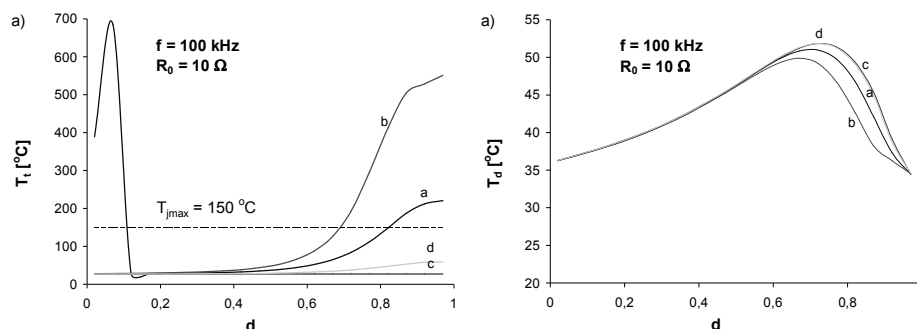


Rys. 6: Zależności temperatury wnętrza tranzystora (a) i diody (b) pracujących w przetwornicy boost od rezystancji obciążenia

Analizując rysunki 5 – 6 można zauważyć znaczny wpływ warunków chłodzenia na charakterystyki analizowanej przetwornicy zwłaszcza dla wartości rezystancji obciążenia mniejszych niż 10Ω . Dla małych wartości rezystancji obciążenia prąd płynący przez tranzystor jest większy, co powoduje silniejsze nagrzewanie się diody i tranzystora. Przy rezystancjach obciążenia poniżej 10Ω dla tranzystora bez radiatora została przekroczona wartość jego dopuszczalnej temperatury wnętrza T_{jmax} . Warto zauważyć, że napięcie wyjściowe jest w szerokim zakresie zmian R_0 rosnącą funkcją rezystancji obciążenia. Sprawność energetyczna również jest rosnącą funkcją R_0 . Wyjątek od tej reguły stanowi zakres bardzo małych rezystancji R_0 dla tranzystora pracującego bez radiatora. W tym przypadku, ze względu na bardzo dużą wartość temperatury wnętrza tranzystora następuje silny wzrost jego rezystancji włączenia. Spadek rezystancji obciążenia skutkuje wzrostem temperatur rozważanych elementów półprzewodnikowych.



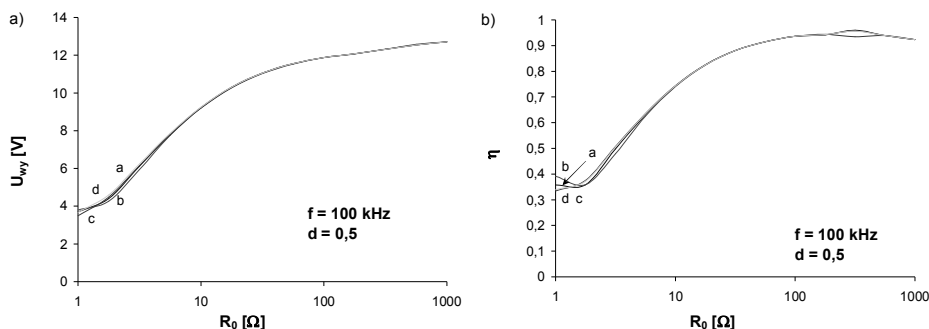
Rys. 7. Zależności napięcia wyjściowego (a) i sprawności energetycznej (b) przetwornicy boost od współczynnika wypełnienia sygnału sterującego



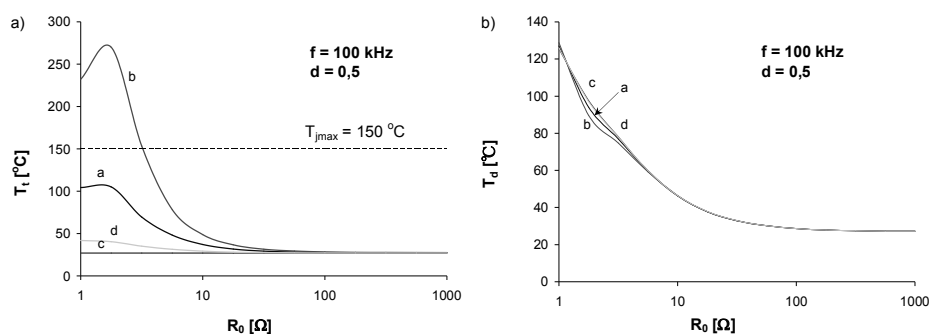
Rys. 8. Zależności temperatury wnętrza tranzystora (a) i diody (b) pracujących w przetwornicy boost od współczynnika wypełnienia sygnału sterującego

Jak wynika z rysunków 7 – 8 wpływ warunków chłodzenia na charakterystyki wykreślone w funkcji współczynnika wypełnienia sygnału sterującego przetwornicą z tranzystorem IRF840 i diodą BY229 jest znacznie mniejszy niż dla

analogicznego układu z tranzystorem IRF640 i diodą 1N5822. Jest to spowodowane wielokrotnie większą wartością rezystancji włączenia tranzystora IRF840 niż tranzystora IRF640. Zmianie natomiast nie ulega charakter wpływu warunków chłodzenia tranzystora na analizowane charakterystyki.



Rys. 9. Zależności napięcia wyjściowego (a) i sprawności energetycznej (b) przetwornicy boost od rezystancji obciążenia



Rys. 10. Zależności temperatury wnętrza tranzystora (a) i diody (b) pracujących w przetwornicy boost od rezystancji obciążenia

W oparciu o rysunki 7-10 można zauważyć, że charakterystyki przetwornicy BOOTS z tranzystorem IRF840 i diodą BY229 w funkcji rezystancji obciążenia niemal nie zależą od warunków chłodzenia. Wyraźne różnice można jedynie zaobserwować dla temperatury wnętrza tranzystora, która przy niskich wartościach rezystancji obciążenia i przy pracy bez radiatora może przekroczyć wartość temperatury bezpiecznej pracy.

4. PODSUMOWANIE

W pracy zaproponowano sposób uwzględnienia nieliniowości modelu termicznego tranzystora MOS mocy w elektrotermicznej analizie stanów przejściowych przetwornic dc-dc w programie SPICE na przykładzie przetwornicy

boost. Przeprowadzone symulacje komputerowe wykazały, że uwzględnienie zależności rezystancji termicznej tranzystora od mocy $R_{th}(p)$ w tranzystorze powoduje istotne zmiany w przebiegu charakterystyk przetwornicy boost zawierającej taki tranzystor. Wpływ opisu warunków chłodzenia tranzystora jest wyraźnie zauważalny w przypadku przetwornicy z tranzystorem o dużej wartości rezystancji włączenia. W tym przypadku różnice w wartościach napięcia wyjściowego i sprawności energetycznej przetwornicy uzyskane przy uwzględnieniu nieliniowości modelu termicznego oraz przy pominięciu tej nieliniowości dochodzą do 10%. Z kolei, w przypadku tranzystora o małej wartości tej rezystancji zjawisko samonagrzewania ma niewielki wpływ na rozważane charakterystyki. Wyniki pomiarów wykazują dobrą zgodność z wynikami obliczeń, w których wykorzystano nieliniowy model termiczny zaproponowany w pracy [12]. A zatem, zgodnie z informacjami zawartymi w pracy [14] zasadne jest stosowanie nieliniowego modelu termicznego w przypadku wysokonapięciowych tranzystorów MOS mocy, cechujących się wysoką wartością rezystancji włączenia, natomiast w przypadku tranzystorów niskonapięciowych, cechujących się małą wartością rezystancji włączenia, pominięcie nieliniowości modelu termicznego nie wpływa w widoczny sposób na uzyskiwane wyniki analiz przetwornicy boost.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/B/ST7/06740.

LITERATURA

- [1] Ericson R., Maksimovic D., Fundamentals of Power Electronics, Norwell, Kluwer Academic Publisher, 2001.
- [2] Rashid M.H., Power Electronic Handbook. Academic Press, Elsevier, 2007.
- [3] Basso C., Switch-Mode Power Supply SPICE Cookbook, McGraw-Hill, New York 2001.
- [4] Górecki K., Zarębski J.: Modeling Nonisothermal Characteristics of Switch-Mode Voltage Regulators. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 4, 2008, pp. 1848 – 1858.
- [5] Zarębski J., Modelowanie, symulacja i pomiary przebiegów elektrotermicznych w elementach półprzewodnikowych i układach elektronicznych, Prace Naukowe Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Gdynia 1996.
- [6] Mawby P.A., Iqic P.M., Towers M.S., Physically based compact device models for circuit modelling applications, Microelectronics Journal, Vol. 32, 2001, s. 433-447.
- [7] Górecki K., Zarębski J.: Drogi przepływu ciepła wydzielanego w elementach półprzewodnikowych do otoczenia. Elektronika, Nr 12, 2012, s. 13-15.
- [8] Szekely V., A New Evaluation Method of Thermal Transient Measurement Results, Microelectronic Journal, Vol. 28, No. 3, 1997, s. 277-292.

- [9] Bagnoli P.E., Casarosa C., Ciampi M., Dallago E., Thermal resistance analysis by induced transient (TRAIT) method for power electronic devices thermal characterization, *IEEE Transactions on Power Electronics, I. Fundamentals and Theory*, Vol. 13, No. 6, 1998; s. 1208-19.
- [10] Górecki K., Zarębski J.: Nonlinear compact thermal model of power semiconductor devices. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 33, No. 3, 2010, pp. 643-647.
- [11] Zarębski J., Modelowanie, symulacja i pomiary przebiegów elektrotermicznych w elementach półprzewodnikowych i układach elektronicznych, *Prace Naukowe Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni*, Gdynia 1996.
- [12] Górecki K., Zarębski J.: Modeling the influence of selected factors on thermal resistance of semiconductor devices. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* (w druku)
- [13] Górecki K., Zarębski J., Józwick A.: Wpływ wybranych czynników na charakterystyki przetwornicy BOOST. VIII Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE 2007, Łódź, 2007, t. 1, ss. 151-156.
- [14] Zarębski J., *Tranzystory MOS mocy*, Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2007.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF NONLINEARITY OF THE THERMAL MODEL OF POWER MOSFET ON CHARACTERISTICS OF BOOST CONVERTER

In the paper the necessity of using the non-linear thermal model of the power MOS transistor at computer analyses of the boost converter is considered. The form of considered thermal model are presented and results of the electrothermal transient analysis of considered converter, obtained at the nonlinearity of the thermal model taking into account and at the omission of this nonlinearity are shown. Investigations were performed for converters containing two different sets of switching semiconductor devices.