



Modelowanie elementów pracujących w systemach energoelektronicznych z uwzględnieniem elektrycznych i termicznych efektów pasożytniczych

dr inż. Aneta Hapka

Plan wystąpienia

- Tytuł osiągnięcia naukowego
- Spis publikacji wchodzących w skład osiągnięcia
- Omówienie celu prac
- Prezentacja wyników badań
- Podsumowanie

Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako "osiągnięcie naukowe uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiące znaczący wkład w rozwój określonej dyscypliny naukowej", w dyscyplinie **elektronika**, wskazuję cykl **11 publikacji** powiązanych tematycznie, pod zbiorczym tytułem:

Modelowanie elementów pracujących w systemach energoelektronicznych z uwzględnieniem elektrycznych i termicznych efektów pasożytniczych.

- [H1] Janke W., Hapka A., Nonlinear Thermal Characteristics of Silicon Carbide Devices, Materials Science and Engineering: B, Vol. 176, Issue 4, 2011, pp. 289-292, 27 pkt. MNiSW, IF=1.518.
- [H2] Hapka A., Janke W., *Wpływ warunków pracy na charakterystyki statyczne diod MPS z węglika krzemu*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87, Nr 10/2011, str. 152-154, 13 pkt. MNiSW, IF=0.244.
- [H3] Janke W., Hapka A., Oleksy M., DC characteristics of the SiC Schottky diodes, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Vol. 59, No.2, 2011, pp. 183-188, 20 pkt. MNiSW, IF=0.966.
- [H4] Hapka A., Janke W., Kraśniewski J., Influence of series resistance and cooling conditions on I-V characteristics of SiC merged PiN Schottky diodes, Materials Science and Engineering: B, Vol. 177, Issue 15, 2012, pp. 1310-1313, 35 pkt. MNiSW, IF=2.04.
- [H5] Janke W., Hapka A., The thermally induced limitations of SiC SBDs operation conditions, Microelectronics Journal, Vol. 43, Issue 9, 2012, pp. 656-660, 20 pkt. MNiSW, IF=0.912.
- [H6] Hapka A., Janke W., Influence of operation conditions on true-static DC characteristics and on electro-thermal transient states in silicon carbide Merged PiN Schottky diodes, Microelectronics Journal, Vol. 44, Issue 11, 2013, pp. 1044-1049, 20pkt. MNiSW, IF=0.924.
- [H7] Hapka A., Synteza transmitancji operatorowej bloku sterowania przetwornicą BUCK z kompensacją indukcyjności pasożytniczej kondensatora, Przegląd Elektrotechniczny, R. 94, Nr 08/2018, str. 13-16, 14 pkt. MNiSW.
- [H8] Hapka A., Janke W., Kraśniewski J., Oleksy M., Charakterystyki DC tranzystorów MOSFET SiC oraz Si pracujących w obszarze silnego przewodzenia w szerokim zakresie temperatur, Elektronika - Konstrukcje, Technologie, Zastosowania, nr 9/2012, str. 98-101, 6 pkt. MNiSW.
- [H9] Hapka A., Modelowanie efektów pasożytniczych w kondensatorach polimerowych, Przegląd Elektrotechniczny,
 R. 90, Nr 9/2014, str. 33-37, 10 pkt. MNiSW.
- [H10]**Hapka A.**, *Wpływ temperatury na parametry elektryczne hybrydowych kondensatorów polimerowych*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 91, Nr 9/**2015**, str. 54-56, 14 pkt. MNiSW.
- [H11]Janke W., **Hapka A.**, Oleksy M., Kraśniewski J., Bączek M., *Problemy określania pasożytniczych parametrów impulsowych przetwornic napięcia*, Przegląd Elektrotechniczny, R.92, Nr 9/**2016**, str. 110-113, 14 pkt. MNiSW.

Opracowanie i implementacja nieliniowych modeli termicznych wybranych diod Schottky'ego z węglika krzemu



- l_q długość umownej warstwy
- A_q pole przekroju warstwy
- λ_q przewodność cieplna warstwy
- m_q- masa warstwy
- c_{pq} ciepło właściwe warstwy

[H1] Janke W., Hapka A., Nonlinear Thermal Characteristics of Silicon Carbide Devices, Materials Science and Engineering: B, Vol. 176, Issue 4, **2011**, pp. 289-292.

$$F=-\left(\lambda_{0q}+a_{q}\cdot\left(\frac{T_{xq}}{T_{0}}\right)^{b_{q}}\right)\cdot\frac{dT_{x_{q}}}{dx}\qquad\frac{dQ_{C}}{d\Delta T}=m\cdot\left(c_{p0}+d\cdot\left(\frac{\Delta T+T_{b}}{T_{0}}\right)^{p}\right)$$

$$\lambda_{q} = a_{q} \cdot \left(\frac{T_{q}}{T_{0}}\right)^{b_{q}} + \lambda_{0q} \qquad c_{pq} = d_{q} \cdot \left(\frac{T_{q}}{T_{0}}\right)^{p_{q}} + c_{p0}$$

$$p_{q}(t) = \frac{A_{q} \cdot a_{q} \cdot T_{0}}{I_{q} \cdot (b_{q}+1)} \cdot \left(\left(\frac{\Delta T_{q} + T_{bq}}{T_{0}} \right)^{b_{q}+1} - \left(\frac{T_{bq}}{T_{0}} \right)^{b_{q}+1} \right) + \frac{A_{q} \cdot \lambda_{0q} \cdot \Delta T_{q}}{I_{q}} + m_{q} \cdot \left(c_{p0q} + d_{q} \cdot \left(\frac{\Delta T_{q} + T_{bq}}{T_{0}} \right) \right) \cdot \frac{d\Delta T_{q}}{dt}$$

[H1] Janke W., Hapka A., Nonlinear Thermal Characteristics of Silicon Carbide Devices, Materials Science and Engineering: B, Vol. 176, Issue 4, **2011**, pp. 289-292.



[H2] Hapka A., Janke W., Wpływ warunków pracy na charakterystyki statyczne diod MPS z węglika krzemu, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87, Nr 10/2011, str. 152-154. Opracowanie i implementacja elektro-termicznych modeli diod Schottky'ego i tranzystorów MOSFET z węglika krzemu do symulacji nieizotermicznych charakterystyk prądowonapięciowych oraz elektro-termicznych stanów przejściowych z uwzględnieniem efektu samonagrzewania

$$I=I_{S}(T) \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (V-R_{S}(T) \cdot I_{M})}{N \cdot k \cdot T}\right) + I_{SP}(T) \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (V-R_{SP}(T) \cdot I_{P})}{N_{P} \cdot k \cdot T}\right)$$

$$i_D = B \cdot v_{DS} \cdot \left(v_{GS} - V_p - \frac{v_{DS}}{2} \right)$$
 $R_{DSON} = r_S + \left(B \cdot \left(v_{GS} - v_p \right) \right)^{-1}$

$$I_{S}(T) = I_{S0} \cdot \left(\frac{T}{T_{0}}\right)^{D} \cdot \exp\left(\frac{V_{G0} \cdot q}{N \cdot k \cdot T_{0}}\right) \cdot \exp\left(\frac{-V_{G0} \cdot q}{N \cdot k \cdot T}\right)$$
$$I_{SP}(T) = I_{SOP} \cdot \left(\frac{T}{T_{0}}\right)^{D} \cdot \exp\left(\frac{V_{GOP} \cdot q}{N_{P} \cdot k \cdot T_{0}}\right) \cdot \exp\left(\frac{-V_{GOP} \cdot q}{N_{P} \cdot k \cdot T}\right)$$

 $R_{S}(T) = R_{S0} \cdot (1 + \alpha_{1} \cdot (T - T_{0}) + \alpha_{2} \cdot (T - T_{0})^{2})$

$$R_{SP}(T) = \frac{R_{SOP}}{1 + \frac{I}{I_{H}}} \cdot (1 + \alpha_{1P} \cdot (T - T_0) + \alpha_{2P} \cdot (T - T_0)^2)$$

T₀ - temperatura odniesienia, R_{s0}, I_{s0} - rezystancja szeregowa i prąd nasycenia dla temperatury odniesienia, V_{G0} - napięcie bariery, N - współczynnik emisji, α_0 , α_1 , α_2 - współczynniki dopasowujące.



Przykładowe wyniki pomiarów izo- (---) i nieizotermiczych (---) charakterystyk I-V diod Schottky'ego z węglika krzemu firmy Cree

[H3] Janke W., Hapka A., Oleksy M., DC characteristics of the SiC Schottky diodes, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Vol. 59, No.2, 2011, pp. 183-188.



Wpływ temperatury na rezystancję szeregową diod Schottky'ego SiC

	$R_{S0}[\Omega]$	α ₀ [1/K]	α ₁ [1/K]	α_{2} [1/K ²]	I _{S0} [A]	N	V _{G0} [V]	D	Т ₀ [К]
CSD01060	0.42	0.0172	0.0072	4.7·10 ⁻⁵	3·10 ⁻¹⁵	1.15	1.174	2.55	298
CSD04060	0.085	0.0165	0.0065	4.7·10 ⁻⁵	22·10 ⁻¹⁵	1.15	1.174	1.83	298

[H3] Janke W., Hapka A., Oleksy M., DC characteristics of the SiC Schottky diodes, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Vol. 59, No.2, 2011, pp. 183-188.



Charakterystyki izotermiczne tranzystorów: a) SiC CMF20120D, b) Si APT36N90BC3G

[H8] Hapka A., Janke W., Kraśniewski J., Oleksy M., Charakterystyki DC tranzystorów MOSFET SiC oraz Si pracujących w obszarze silnego przewodzenia w szerokim zakresie temperatur, Elektronika - Konstrukcje, Technologie, Zastosowania, nr 9/2012, str. 98-101.



Wpływ temperatury na rezystancję R_{DSON}

[H8] Hapka A., Janke W., Kraśniewski J., Oleksy M., Charakterystyki DC tranzystorów MOSFET SiC oraz Si pracujących w obszarze silnego przewodzenia w szerokim zakresie temperatur, Elektronika - Konstrukcje, Technologie, Zastosowania, nr 9/2012, str. 98-101. Określenie wpływu warunków pracy (temperatura otoczenia, odprowadzanie ciepła) na charakterystyki nieizotermiczne oraz parametry krytyczne diod MPS (Merged PiN Schottky) z węglika krzemu oraz tranzystorów MOSFET z węglika krzemu i z krzemu

$$V = \frac{\frac{N \cdot k}{q} \cdot T_{a} \cdot \ln\left(\frac{I}{A \cdot T_{a}^{2}}\right) + V_{G0} + R_{s}(T_{a}) \cdot I}{1 - \frac{N \cdot k}{q} \cdot R_{th} \cdot I \cdot \ln\left(\frac{I}{A \cdot T_{a}^{2}}\right) - \alpha_{1} \cdot R_{s}(T_{a}) \cdot I^{2} \cdot R_{th}}$$

[H3] Janke W., Hapka A., Oleksy M., DC characteristics of the SiC Schottky diodes, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Vol. 59, No.2, 2011, pp. 183-188.



przerywane), oraz obliczonych z uproszczonej zależności (linie ciągłe z kropkami).

[H3] Janke W., Hapka A., Oleksy M., DC characteristics of the SiC Schottky diodes, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Vol. 59, No.2, 2011, pp. 183-188.



- [H2] Hapka A., Janke W., *Wpływ warunków pracy na charakterystyki statyczne diod MPS z węglika krzemu*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87, Nr 10/2011, str. 152-154.
- [H4] Hapka A., Janke W., Kraśniewski J., Influence of series resistance and cooling conditions on I-V characteristics of SiC merged PiN Schottky diodes, Materials Science and Engineering: B, Vol. 177, Issue 15, 2012, pp. 1310-1313.



Nieizotermiczne charakterystyki sterowanych napięciowo diod MPS

- [H2] Hapka A., Janke W., *Wpływ warunków pracy na charakterystyki statyczne diod MPS z węglika krzemu*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87, Nr 10/2011, str. 152-154.
- [H6] Hapka A., Janke W., Influence of operation conditions on true-static DC characteristics and on electro-thermal transient states in silicon carbide Merged PiN Schottky diodes, Microelectronics Journal, Vol. 44, Issue 11, 2013, pp. 1044-1049.



Wpływ warunków odprowadzania ciepła na położenie punktu krytycznego na charakterystykach sterowanych napięciowo diod MPS

[H6] Hapka A., Janke W., Influence of operation conditions on true-static DC characteristics and on electro-thermal transient states in silicon carbide Merged PiN Schottky diodes, Microelectronics Journal, Vol. 44, Issue 11, 2013, pp. 1044-1049.



[H8] Hapka A., Janke W., Kraśniewski J., Oleksy M., Charakterystyki DC tranzystorów MOSFET SiC oraz Si pracujących w obszarze silnego przewodzenia w szerokim zakresie temperatur, Elektronika - Konstrukcje, Technologie, Zastosowania, nr 9/2012, str. 98-101. Opracowanie i implementacja rzeczywistych modeli wybranych elementów pasywnych - z uwzględnieniem elektrycznych i termicznych efektów pasożytniczych



Modele zastępcze kondensatorów

Model \rightarrow		3C-3R-L (a)								C-R-L (b)		
	C _{nom} [μF]	$R_1[m\Omega]$	$R_2[m\Omega]$	$R_3[m\Omega]$	C ₁ [μF]	C ₂ [μF]	C ₃ [μF]	L ₁ [nH]	R[m Ω]	C [μF]	L[nH]	
AI	470	68	24	45	29	183	218	0 <i>,</i> 85	80	432	0,85	
	1000	35	25	15	18	550	250	0 <i>,</i> 85	49	1000	0,85	
Polimer	470	2	1,2	0,5	100	85	250	2,5	2,6	432	2,5	
	1000	7,8	6	8	700	100	260	4,8	8	1000	4,8	

[H9] **Hapka A.**, *Modelowanie efektów pasożytniczych w kondensatorach polimerowych*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 90, Nr 9/**2014**, str. 33-37.



Moduł impedancji badanych kondensatorów - pomiar i symulacja

[H9] **Hapka A.**, *Modelowanie efektów pasożytniczych w kondensatorach polimerowych*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 90, Nr 9/**2014**, str. 33-37.



Moduł impedancji kabli pomiarowych i kondensatora HZC4J8.





[H10]**Hapka A.**, Wpływ temperatury na parametry elektryczne hybrydowych kondensatorów polimerowych, Przegląd Elektrotechniczny, R. 91, Nr 9/**2015**, str. 54-56.





Opracowanie i implementacja technik symulacji elektrycznych i elektro-termicznych stanów przejściowych oraz charakterystyk częstotliwościowych w wybranych elementach mocy oraz systemach energoelektronicznych – z uwzględnieniem elektrycznych i termicznych efektów pasożytniczych



Blok główny przetwornicy typu BUCK



[H1] Janke W., Hapka A., Nonlinear Thermal Characteristics of Silicon Carbide Devices, Materials Science and Engineering: B, Vol. 176, Issue 4, **2011**, pp. 289-292.



[H6] Hapka A., Janke W., Influence of operation conditions on true-static DC characteristics and on electro-thermal transient states in silicon carbide Merged PiN Schottky diodes, Microelectronics Journal, Vol. 44, Issue 11, 2013, pp. 1044-1049.



[H6] Hapka A., Janke W., Influence of operation conditions on true-static DC characteristics and on electro-thermal transient states in silicon carbide Merged PiN Schottky diodes, Microelectronics Journal, Vol. 44, Issue 11, 2013, pp. 1044-1049.



[H6] Hapka A., Janke W., Influence of operation conditions on true-static DC characteristics and on electro-thermal transient states in silicon carbide Merged PiN Schottky diodes, Microelectronics Journal, Vol. 44, Issue 11, 2013, pp. 1044-1049.



Napięcie na obciążeniu układu

[H9] **Hapka A.**, *Modelowanie efektów pasożytniczych w kondensatorach polimerowych*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 90, Nr 9/**2014**, str. 33-37.



[H11]Janke W., Hapka A., Oleksy M., Kraśniewski J., Bączek M., Problemy określania pasożytniczych parametrów impulsowych przetwornic napięcia, Przegląd Elektrotechniczny, R.92, Nr 9/2016, str. 110-113



Przebiegi odpowiedzi napięcia wyjściowego na skok napięcia wejściowego

[H11]Janke W., Hapka A., Oleksy M., Kraśniewski J., Bączek M., Problemy określania pasożytniczych parametrów impulsowych przetwornic napięcia, Przegląd Elektrotechniczny, R.92, Nr 9/2016, str. 110-113



a) Model bloku głównego przetwornicy typu BUCK,
b) schemat blokowy układu z zamkniętą pętlą

[H7] Hapka A., Synteza transmitancji operatorowej bloku sterowania przetwornicą BUCK z kompensacją indukcyjności pasożytniczej kondensatora, Przegląd Elektrotechniczny, R. 94, Nr 08/2018, str. 13-16.

$$H_{P}=H_{d}\cdot H_{S}=\frac{K_{P}}{\left(1+\frac{s}{\omega_{P1}}\right)\cdot \left(1+\frac{s}{\omega_{P2}}\right)} \qquad H_{PESL}=\frac{K_{P}\cdot \left(1+\frac{s}{\omega_{P0}}\right)}{\left(1+\frac{s}{\omega_{P1}}\right)\cdot \left(1+\frac{s}{\omega_{P2}}\right)}$$



[H7] Hapka A., Synteza transmitancji operatorowej bloku sterowania przetwornicą BUCK z kompensacją indukcyjności pasożytniczej kondensatora, Przegląd Elektrotechniczny, R. 94, Nr 08/2018, str. 13-16.



Przebiegi napięcia wyjściowego w układzie z zamkniętą pętlą sterowania po skokowej zmianie napięcia wejściowego

[H7] Hapka A., Synteza transmitancji operatorowej bloku sterowania przetwornicą BUCK z kompensacją indukcyjności pasożytniczej kondensatora, Przegląd Elektrotechniczny, R. 94, Nr 08/2018, str. 13-16.

Podsumowanie

Poprzez przeprowadzenie omówionych badań rozpoznałam i zamodelowałam elektryczne i termiczne efekty pasożytnicze w wybranych elementach wykorzystywanych w systemach energoelektronicznych, przy jednoczesnym zapewnieniu łatwej implementacji powstałych modeli w różnego typu symulacjach wspomagających proces projektowania konwerterów mocy.

	Przed uzyskaniem stopnia	Po uzyskaniu stopnia doktora
	UOKIOTA	
Artykuły w czasopismach z bazy JCR	-	8
Artykuły w czasopismach innych niż ujęte w		
bazie JCR	-	11
Artykuły w materiałach konferencyjnych		
	16	18
Wygłoszenie referatu na międzynarodowych i		
krajowych konferencjach naukowych	13	14

- Sumaryczny Impact Factor wszystkich prac: 6,8
- Sumaryczny Impact Factor prac wchodzących w skład osiągnięcia: 6,604
- H-Index: **3** (WoS), **4** (Scopus), **6** (Google Scholar)
- Liczba cytowań: 22/19^(bez autocytowań) (WoS) 40/32^(bez autocytowań) (Scopus) 64/44^(bez autocytowań) (Google Scholar)
- Kierownik projektów: **3**, w tym **1** przed uzyskaniem stopnia doktora.
- Wykonawca w projektach: 6, w tym 2 przed uzyskaniem stopnia doktora.