

## Modelowanie efektów pasożytniczych w kondensatorach polimerowych

**Streszczenie.** Artykuł poświęcono porównaniu nowych kondensatorów polimerowych, charakteryzujących się bardzo małymi rezystancjami ESR, z rozpowszechnionymi kondensatorami elektrolitycznymi aluminiowymi. Zaproponowano rzeczywiste modele dla elementów obu typów oraz oszacowano dokładność tych modeli. Przeprowadzono symulacje stanów przejściowych w typowym podukładzie aplikacji kondensatorów – przy założeniu ich idealności oraz przy uwzględnieniu występujących w nich efektów pasożytniczych.

**Abstract.** In the paper a comparison of new polymer capacitors, characterized by a very small Equivalent Series Resistance (ESR), and of widespread aluminum capacitors is presented. Real and effective models are developed for components of both types, and the accuracy of these models is estimated. Simulations of transient states in a typical for capacitors application subsystem have been performed with their ideality assumed and, as well, with the parasitic effects taken into account. (**Modelling of parasitic effects in polymer capacitors**).

**Słowa kluczowe:** kondensator polimerowy, rezystancja pasożytnicza, indukcyjność pasożytnicza, model rzeczywisty.

**Keywords:** polymer capacitor, parasitic resistance, parasitic inductance, real model.

doi:10.12915/pe.2014.09.10

### Wprowadzenie

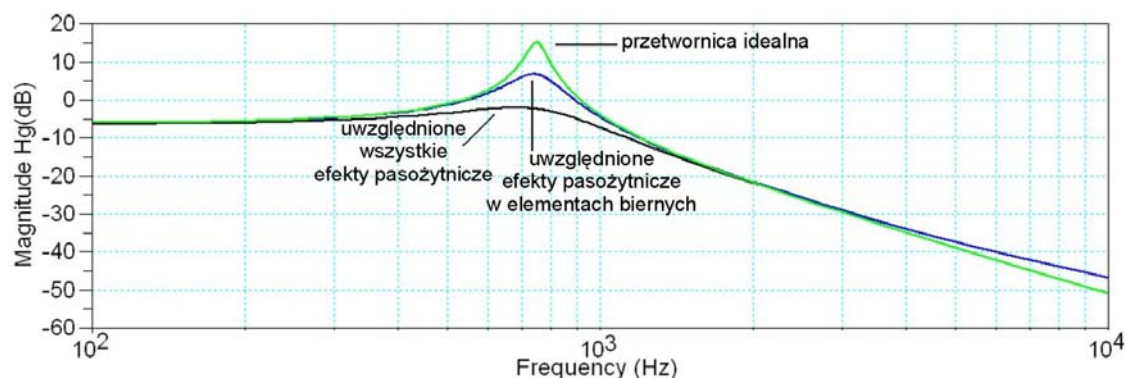
W świetle wymogów stawianych nowoczesnym systemom elektronicznym, do jakości wykonania oraz dokładności modelowania komponentów pasywnych należy przywiązywać wagę przynajmniej tak dużą, jak ma to miejsce w przypadku podzespołów półprzewodnikowych. Jedną z intensywnie rozwijających się grup układów o działaniu opartym na magazynowaniu energii w elementach biernych są konwertery mocy, znajdujące zastosowanie jako urządzenia zasilające, kontrolujące gromadzenie energii, przetwarzające prąd przemienny na prąd stały i odwrotnie. Szczególnymi wymogami dotyczącymi doboru kondensatorów obciążone są układy zasilające umieszczane na płytach głównych komputerów, gdzie oprócz małej stratności, wymagane jest przystosowanie elementów do bardzo szybkich zmian prądowych (300 A/μs) [1].

Producenci elementów biernych (Vishay, Kemet, X-Con, AVX, Murata) zapewniają kolejne serie kondensatorów tantalowych charakteryzujących się odpornością na wysokie temperatury [2], niskostratnych ceramicznych – o coraz większych pojemnościach oraz, będących nowością w sprzedaży, kondensatorów polimerowych, w których jako katodę stosuje się organiczny, przewodzący polimer [3]. Taki zabieg powoduje uzyskanie bardzo małych wartości pasożytniczej rezystancji szeregowej ESR [4, 5]. Mimo coraz lepszych parametrów użytkowych, przyjmowanie idealnych modeli elementów znacząco zaniża precyzję i efektywność projektowania układów elektronicznych. Znany jest wpływ występujących we wszystkich

komponentach elektronicznych strat na charakterystyki częstotliwościowe amplitudowe (rys. 1) i fazowe [6] konwerterów mocy. Impedancja elementów biernych jest funkcją częstotliwości, a poziom zaburzeń generowanych przez elementy pasożytnicze, może przekraczać wartości określone w normach dotyczących kompatybilności elektromagnetycznej. Obecność rezystancji pasożytniczych powoduje straty mocy, wydzielanie ciepła Joule'a i samonagrzewanie [2, 7], które w przypadku elementów biernych jest często pomijane w rozważaniach dotyczących analizy stanów elektro-termicznych.

W odniesieniu do kondensatorów mówi się o trzech podstawowych, znaczących wielkościach pasożytniczych. Są to: prąd upływu (leakage), wynikający innymi z nieidealności izolacji dielektryka, przyczyniającej się do przepływu ładunku elektrycznego między okładzinami, rezystancje pasożytnicze powiązane w największym stopniu z rezystancją przewodów, elektrod i strat w dielektryku oraz pasożytnicza indukcyjność (ESL).

Spotykane zastępcze modele elektryczne kondensatorów mają różny stopień złożoności, od najprostszego, szeregowego lub równoległego połączenia RC, po rozbudowane „drabinki”, składające się z kilku lub kilkunastu komórek RC o stałych lub zależnych od częstotliwości parametrach [8, 9, 10]. Do najbardziej adekwatnych, choć rzadko spotykanych, należą modele uwzględniające indukcyjność ESL, której wzrost powoduje zmniejszenie wartości częstotliwości rezonansowej i wpływa na rzeczywistą wartość modułu impedancji.



Rys.1. Małosygnałowa transmitancja input-to-output przetwornicy BUCK [6]

W niniejszej pracy skupiono się na zbadaniu i zamodelowaniu efektów pasożytniczych w kondensatorach polimerowych nowego typu [4, 5, 11]. Rzeczywiste parametry użytkowe tych kondensatorów porównano z cechami kondensatorów aluminiowych, które jako elementy dostępne od dawna są bardzo dobrze rozpoznane, a procesy ich wytwarzania są opanowane.

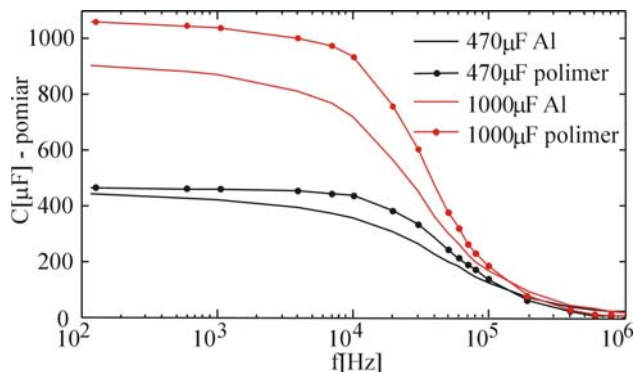
W rozdziale 2 przedstawiono porównanie przykładowych wyników pomiarów pojemności oraz rezystancji kondensatorów aluminiowych i polimerowych w szerokim zakresie częstotliwości. Rozdział 3 zawiera propozycje zastępczych modeli, uwzględniających efekty pasożytnicze w badanych elementach. W rozdziale 4 przedstawiono porównanie wyników symulacji stanów przejściowych w kondensatorach idealnych oraz stratnych.

### Pomiary parametrów kondensatorów w funkcji częstotliwości

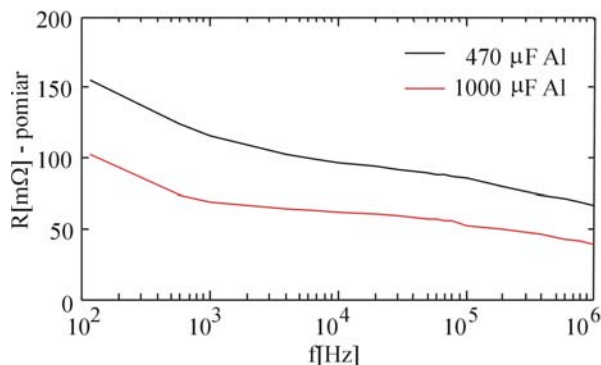
Do wykonania pomiarów parametrów kondensatorów aluminiowych i polimerowych [11] o nominalnych pojemnościach 470  $\mu\text{F}$  oraz 1000  $\mu\text{F}$  zastosowano programowalny mostek RLC FLUKE PM6306, umożliwiający bezpośredni pomiar impedancji i kąta przesunięcia fazowego w dowolnych elementach, w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 1 MHz. Oprócz wymienionych wielkości, z wyświetlacza mostka można odczytać wartości parametrów prostych modeli zastępczych badanych elementów. W przypadku kondensatorów modelami takimi są szeregowo lub równoległe połączenia rezystancji i pojemności – w zakresie częstotliwości poniżej rezonansu. Powyżej częstotliwości rezonansowej model zastępczy składa się z indukcyjności oraz rezystancji. Pomiar

w układzie mostka odbywa się na zasadzie pobudzenia elementu prądem zmiennym, w prezentowanym przypadku – o amplitudzie 10 mA. Dobór warunków zasilania wynika z konieczności uniknięcia efektu samonagrzewania. Przy pobudzeniach o wyższych amplitudach, parametry zależą też od zmieniającej się temperatury wnętrza elementu.

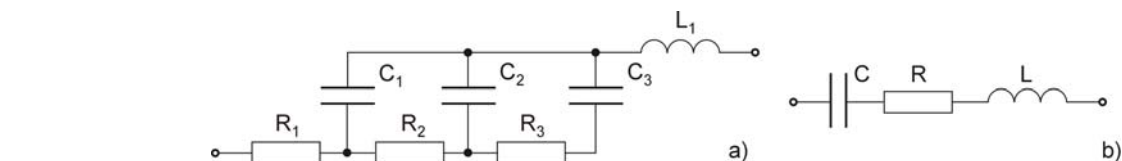
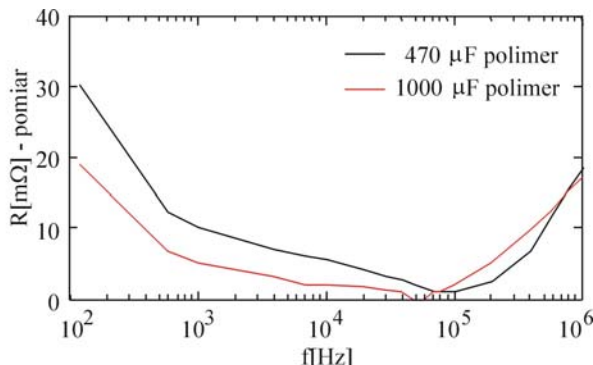
Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wyniki pomiarów wypadkowych pojemności i rezystancji odpowiadających modelowi o postaci szeregowego połączenia. Wartości te zmieniają się w funkcji częstotliwości, więc model oparty o otrzymane zależności, jest niewygodny w implementacji. Alternatywą są modele składające się z większej liczby elementów, ale o stałych parametrach, które można określić na podstawie pomiarów modułu impedancji w funkcji częstotliwości.



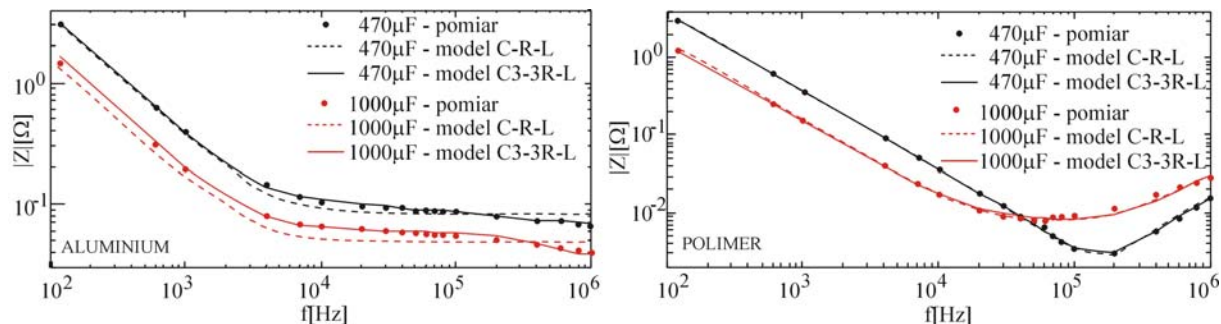
Rys.2. Wypadkowa pojemność w funkcji częstotliwości



Rys.3. Wypadkowa rezystancja szeregową w funkcji częstotliwości



Rys.4. Modele zastępcze kondensatorów



Rys.5. Moduł impedancji badanych kondensatorów – pomiar i symulacja

### Modele zastępcze kondensatorów

Porównano dwa typy modeli zastępczych badanych kondensatorów. W pierwszym przypadku modele składają się z trzech elementów pojemnościowych, trzech rezystancyjnych (połączonych w tak zwaną drabinkę RC) oraz z elementu indukcyjnego (rys. 3a). W przypadku drugim, modele stanowią połączenie szeregowo elementów C, R, L (rys. 3b). Założono, że parametry modeli zidentyfikowane na podstawie wyników pomiarów modułu impedancji w funkcji częstotliwości, mają przyjmować wyłącznie stałe wartości.

Na rysunku 5 pokazano wyniki pomiarów modułu impedancji wybranych kondensatorów aluminiowych i polimerowych – w funkcji częstotliwości, oraz wyniki

symulacji przeprowadzonych w oparciu o przyjęte modele, których parametry zestawiono w tabeli 1. Wartość rezystancji R, występującej w prostym modelu C-R-L odpowiada w przybliżeniu szeregowo rezystancji pasożytniczej ESR. W przypadku kondensatorów polimerowych widać, że dla częstotliwości rezonansowej, która dla elementów o nominalnej pojemności 470  $\mu\text{F}$  wynosi 200 kHz, a o pojemności 1000  $\mu\text{F}$  – 60 kHz wartość modułu impedancji oraz zidentyfikowana ESR są sobie równe. Dla kondensatorów aluminiowych w paśmie częstotliwości do 1 MHz, rezonansu nie obserwuje się. Parametr C reprezentuje rzeczywistą wartość pojemności użytkowej elementu.

Tabela 1. Parametry modeli kondensatorów

Model →		3C-3R-L							C-R-L		
	$C_{nom}[\mu\text{F}]$	$R_1[\text{m}\Omega]$	$R_2[\text{m}\Omega]$	$R_3[\text{m}\Omega]$	$C_1[\mu\text{F}]$	$C_2[\mu\text{F}]$	$C_3[\mu\text{F}]$	$L_1[\text{nH}]$	$R[\text{m}\Omega]$	$C[\mu\text{F}]$	$L[\text{nH}]$
Al	470	68	24	45	29	183	218	0,85	80	432	0,85
	1000	35	25	15	18	550	250	0,85	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

W tabeli 2 przedstawiono wartości średniego błędu dopasowania, wyrażonego w procentach, obliczonego zgodnie z zależnością, w której  $Z_n$  odpowiada kolejnym, zmierzonym wartościom modułu impedancji, a  $Z_{On}$  - wartościom obliczonym:

$$(1) \quad \xi = \sum_{n=1}^N \frac{|Z_n| - |Z_{On}|}{|Z_{On}|} \cdot 100\%$$

Tabela 2. Błąd dopasowania modeli kondensatorów

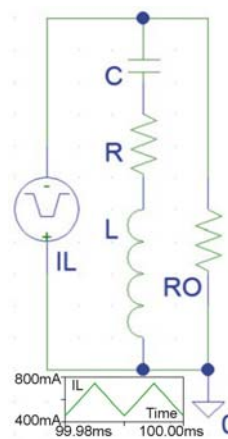
Typ →		aluminiowe		polimerowe	
Model		$C_{nom} = 470 \mu\text{F}$	$C_{nom} = 1000 \mu\text{F}$	$C_{nom} = 470 \mu\text{F}$	$C_{nom} = 1000 \mu\text{F}$
C-R-L	$\xi[\%]$	10,37	14,93	4,23	6,19
3C-3R-L	$\xi[\%]$	1,45	4,25	3,6	6,93

Znaczącą poprawę dokładności dopasowania przy zastosowaniu modelu 3C-3R-L obserwuje się jedynie w przypadku kondensatorów aluminiowych. Dla elementów polimerowych wybór modelu nie ma znaczenia, jeżeli za kryterium przyjmuje się dokładność. Istotną cechą modelu C-R-L jest prostota, co oznacza że jego implementacja w miejsce modelu idealnego nie powoduje znaczącego wzrostu nakładu obliczeniowego procedury symulacyjnej.

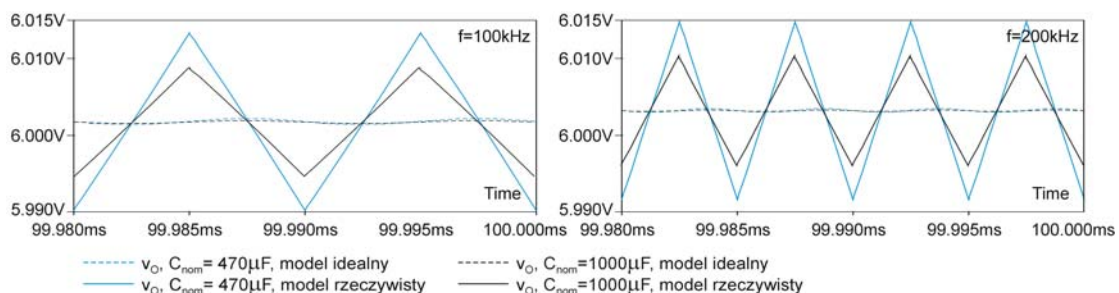
### Symulacje stanów przejściowych z uwzględnieniem efektów pasożytniczych w kondensatorach

W celu określenia wpływu elementów pasożytniczych na przebiegi prądów i napięć w kondensatorach, przeprowadzono serie symulacji stanów przejściowych w układzie pokazanym na rysunku 6. Założono przebieg prądu  $I_L$  odpowiadający typowym warunkom pracy

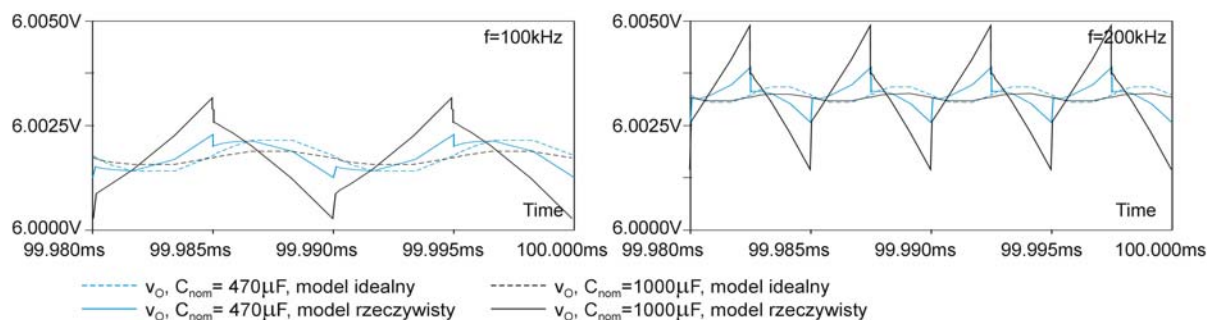
kondensatora w przetwornicy BUCK. Obliczenia wykonano w środowisku PSPICE. Oprócz modelu C-R-L, rozpatrywano również czystą pojemność. Na rysunku 7 pokazano przykładowe przebiegi napięcia  $v_O$  na obciążeniu układu ( $R_O = 10 \Omega$ ), obliczone dla kondensatorów aluminiowych, a na rysunku 8 – polimerowych. Zastosowanie prostszego modelu C-R-L, który dla elementów aluminiowych daje ogólnie gorsze dopasowanie niż model 3C-3R-L, jest uzasadnione dla przyjętych wartości częstotliwości, co wynika z rysunku 5 i analizy błędów identyfikacji.



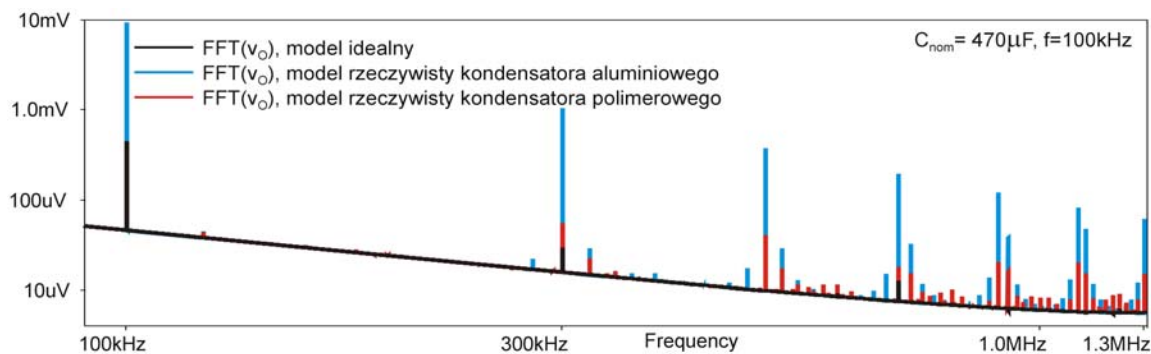
Rys.6. Układ testowy



Rys.7. Napięcie na obciążeniu układu, przy zastosowaniu kondensatorów aluminiowych



Rys.8. Napięcie na obciążeniu układu, przy zastosowaniu kondensatorów polimerowych



Rys.9. Szybka transformata Fouriera napięcia na obciążeniu układu testowego

Na rysunku 7 widać, że przy zastosowaniu rzeczywistego modelu kondensatorów aluminiowych, napięcie wyjściowe jest praktycznie iloczynem prądu  $I_L$  i ESR (linie ciągłe), a zakres zmian tego napięcia jest czterdziestokrotnie większy niż przy założeniu idealności kondensatora (linie przerywane). W przypadku elementów polimerowych (rys. 8) wpływ ESR na kształt napięcia wyjściowego jest niewielki, za to dominujące są odkształcenia związane z indukcyjnością ESL, zwłaszcza w okolicy i powyżej częstotliwości rezonansowej, podanej w rozdziale 3. Zakres zmian napięcia wyjściowego – dla najbardziej „zakłóconego” z przedstawionych przebiegów (200 kHz,  $C_{nom} = 1000 \mu\text{F}$ ) jest prawie dwudziestokrotnie większy niż przy zastosowaniu modelu idealnego. W najlepszym z rozpatrywanych przypadków (100 kHz,  $C_{nom} = 470 \mu\text{F}$ ), zakres zmian  $v_O$  dla modelu rzeczywistego jest tylko 1,25 krotnie większy niż dla modelu idealnego.

Uzupełnieniem przeprowadzonej analizy jest wynik szybkiej transformaty Fouriera napięcia na obciążeniu układu z rysunku 6. Przykładową FFT dla częstotliwości kluczowania 100 kHz pokazano na rysunku 9. Zagęszczenie częstotliwości harmonicznych dla rzeczywistych kondensatorów aluminiowych i polimerowych jest podobne, przy czym amplitudy składowych widma napięcia otrzymanego w układzie z elementem aluminiowym są dwu- trzykrotnie wyższe niż amplitudy w układzie z kondensatorem polimerowym. Przy zastosowaniu idealnej pojemności występują harmoniczne o częstotliwości podstawowej 100 kHz i dwóch krotnościach – 300 kHz, 700 kHz.

### Podsumowanie

Interpretacja wyników pomiarów parametrów kondensatorów nie jest zagadnieniem oczywistym. W przedstawionej pracy zrezygnowano z uzmienniania pojemności i rezystancji w funkcji częstotliwości, dzięki czemu proponowane podejście wyróżnia się prostotą. Skomplikowana postać modeli utrudnia symulację. Z punktu widzenia obwodowego – najistotniejszą cechą elementu jest wartość jego impedancji i pod tym kątem

zaproponowane modele można uznać za adekwatne.

Niewątpliwą, podkreślaną przez producentów, zaletą kondensatorów polimerowych jest bardzo mała wartość ESR. Elementy te wypadają wyjątkowo korzystnie na tle standardowych elektrolitów aluminiowych, jednak dotyczy to zakresu częstotliwości poniżej rezonansu, który występuje dla zaskakująco niskich częstotliwości (60 kHz, 200 kHz). Indukcyjności pasywnicze kondensatorów polimerowych są wyraźnie większe niż aluminiowych (sześciokrotnie dla  $C_{nom} = 470 \mu\text{F}$  oraz trzykrotnie dla  $C_{nom} = 1000 \mu\text{F}$ ), a to stanowi poważną wadę. Z drugiej strony, technologia wytwarzania kondensatorów polimerowych jest wciąż rozwijana i można spodziewać poprawy ich parametrów użytkowych.

Dążąc do minimalizacji rezystancji pasywnicznych kondensatorów warto pamiętać, że niezerowa ESR wprowadza dodatkowe zero do transmitancji przetwornic. Dzięki temu, charakterystyka amplitudowa opada z szybkością 6 dB/oct, co jest łatwiejsze do kompensacji przez obwód sterowania niż w przypadku opadania 12 dB/oct, jak ma to miejsce w układach idealnych.

W przedstawionych rozważaniach nie ujęto aspektu warunków pracy elementów – takich jak amplitudy prądów i napięć oraz temperatura, który również jest przedmiotem badań prowadzonych przez autora, obejmujących szczegółowe rozpoznanie cech konstrukcyjnych i właściwości materiałowych warstw kondensatorów różnych typów.

### LITERATURA

- [1] Intel Report, Voltage regulator Module (VRM) and Enterprise Voltage Regulator-Down (EVRD) 11.1, Design Guidelines, www.intel.com, (2009)
- [2] Hapka A., A New Method for Calculation of High-Temperature Capacitors Thermal Resistance, *MICROTHERM* czerwiec (2013), materiały w formie elektronicznej, 210-215
- [3] Puthusseria D., Aravindanb V., Madhavib S., Ogalea S., Improving the energy density of Li-ion capacitors using polymer-derived porous carbons as cathode, *Electrochimica Acta*, Available online 27 March 2014, In Press, Accepted Manuscript

- [4] Reed E.K., Characterization of Tantalum Polymer Capacitors, nepp.nasa.gov
- [5] Panasonic technical report, Understanding Polymer and Hybrid Capacitors, [www.pidtechinsights.com](http://www.pidtechinsights.com)
- [6] Janke W., Equivalent circuits for averaged description of DC-DC switch-mode power converters based on separation of variables approach, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, (2013) Vol. 61, nr 3, 711-723
- [7] Pascot C., Dandeville Y., Scudeller Y., Guillemet Ph., Brousse T., Calorimetric measurement of the heat generated by a Double-Layer Capacitor cell under cycling, *Thermochemica Acta* 510 (2010), 53-60
- [8] Faranda R., A new parameters identification procedure for simplified double layer capacitor two-branch model, *Electric Power Research* 80 (2010), 363-371
- [9] Rafik F., Gualous H., Gallay R., Crausaz A., Berthon A., Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling, *Journal of Power Sources* 165 (2007), 928-934
- [10] Zheng J.P., Jiang Z.N., Resistance distribution in electrochemical capacitors with spiral-wound structure, *Journal of Power Sources* 156 (2006), 748-754
- [11] X-Con technical report, Conductive Polymer Aluminum Solid Capacitors, (2006), <http://capacitor.web.fc2.com/image4/xcon2006.pdf>

---

**Autor:** dr inż. Aneta Hapka, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. JJ Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, E-mail: [hapka@ie.tu.koszalin.pl](mailto:hapka@ie.tu.koszalin.pl).