

Wpływ temperatury na parametry elektryczne hybrydowych kondensatorów polimerowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów wpływu temperatury na parametry wybranych typów kondensatorów elektrolitycznych, w tym nowych hybrydowych elementów polimerowych. Przeanalizowano zmiany pojemności, wartości elementów pasozytniczych oraz częstotliwości rezonansu własnego kondensatorów w funkcji temperatury.

Abstract. In the paper, measurements of the influence of the temperature on polymer capacitors electrical parameters are presented. The changes of capacitance and parasitics, such as Equivalent Series Resistance and Equivalent Series Inductance, caused by the temperature changes are analyzed. (Influence of the temperature on electrical parameters of hybrid polymer capacitors).

Słowa kluczowe: kondensatory polimerowe, elementy pasozytnicze, wpływ temperatury.

Keywords: hybrid polymer capacitors, temperature-influenced electrical parameters.

Wprowadzenie

Komponenty pasywne odgrywają znaczącą rolę we współczesnych konwerterach mocy, a w rozwiązaniach konstrukcyjnych coraz częściej stosowane są kondensatory polimerowe, które ze względu na budowę dzieli się na cztery grupy. Pierwszą stanowią małe, warstwowe kondensatory z aluminium katodą, w których funkcję elektrolitu pełni przewodzący polimer stały, do drugiej należą kondensatory zawierające ze stałym polimerem jako elektrolitem i aluminium elektrodami o dużej powierzchni umożliwiającej uzyskanie wyższych napięć znamionowych oraz większych pojemności niż w przypadku elementów warstwowych, do trzeciej – kondensatory ze stałym elektrolitem polimerowym i elektrodą z tlenku tantalum, zaś czwartą, najintensywniej obecnie rozwijającą się grupą są kondensatory hybrydowe, w których katoda wykonana jest z aluminium, a na elektrolit składają się: polimer stały i ciekły związek boru, co umożliwia połączenie cech charakterystycznych dla elementów z elektrolitem stałym (mała rezystancja pasozytnicza ESR) i elektrolitem ciekłym (wysokie napięcie pracy, duże pojemności znamionowe). W przypadku trzech pierwszych grup elementów, ESR przybiera wartości pojedynczych miliomów, w przypadku grupy ostatniej – nawet do 150 mΩ.

O szczególnej przydatności kondensatorów polimerowych w wysokosprawnych systemach energoelektronicznych ma decydować mała, w porównaniu z innymi kondensatorami elektrolitycznymi, wartość szeregowej rezystancji strat ESR [1, 2, 3]. Typowe ESR klasycznych kondensatorów elektrolitycznych to 50÷100 mΩ. Dwoma najistotniejszymi skutkami relatywnie dużej wartości ESR są: straty mocy w postaci ciepła Joule'a (samonagrzewanie) oraz zbyt duża amplituda tętnień napięcia na wyjściu układu. Efektem długofalowym występowania samonagrzewania w kondensatorach z ciekłym elektrolitem jest jego odparowywanie, co skutkuje poważną degradacją parametrów elementu. Polimery stosowane w kondensatorach, oprócz doskonałych właściwości przewodzących, posiadają ujawniającą się podczas ogrzewania zdolność izolacji defektów [2], a w przypadku elementów hybrydowych – obecność płynnego elektrolitu umożliwia tak zwane „self-healing”, czyli naprawę defektów w strukturze polimeru.

Oprócz ESR, o poziomie tętnień na wyjściu układu decyduje wartość indukcyjności pasozytniczej ESL, która w komercyjnie dostępnych kondensatorach polimerowych przyjmuje zaskakująco duże wartości [1], przesuwając rezonans własny elementu w kierunku jego nominalnych częstotliwości pracy. Istotne jest więc rozpoznanie

wszelkich strat rezystancyjnych oraz indukcyjnych w kondensatorach przed wykorzystaniem ich w układach przetwarzania energii.

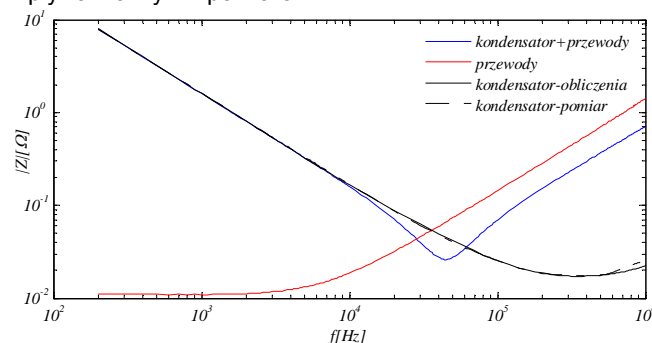
Wraz z rozwojem technologii wytwarzania kondensatorów polimerowych pojawia się coraz więcej doniesień na temat ich właściwości elektrycznych oraz termicznych. Producenci coraz staranniej charakteryzują właściwości tych elementów, jednak mylące są spotykane w notach katalogowych ilustracje wpływu częstotliwości na ESR [3, 4, 5]. Aby możliwe było rzetelne oszacowanie strat mocy w obwodzie – uwzględniane rezystancje pasozytnicze muszą mieć charakter czysto rezystancyjny (rzeczywisty), a co za tym idzie – nie mogą zależeć od częstotliwości, poza składnikiem odpowiadającym efektowi naskórkowości, który w kondensatorach o typowych aplikacjach (do kilku MHz) może być pominięty.

Na chwilę obecną, poza specyfikacjami pochodzącymi od producentów nie spotyka się doniesień o modelowaniu kondensatorów polimerowych mających pracować w systemach energoelektronicznych, co podkreśla zasadność prac opisywanych poniżej.

W artykule skupiono się na oszacowaniu wpływu temperatury na podstawowe parametry kondensatorów – pojemność, ESR, ESL oraz częstotliwość rezonansową.

Metoda pomiarowa

Pomiary wykonano za pomocą programowalnego mostka RLC FLUKE PM6306 oraz karty pomiarowej National Instruments, umożliwiającej rejestrację wyników w środowisku LabView. Badane elementy umieszczano w komorze temperaturowej Nabertherm i pobudzano napięciem przemiennym o amplitudzie 1,5 V – wystarczająco niskiej, aby efekt samonagrzewania nie wpływał na wyniki pomiarów.



Rys. 1. Moduł impedancji kabli pomiarowych i kondensatora HZC4J8

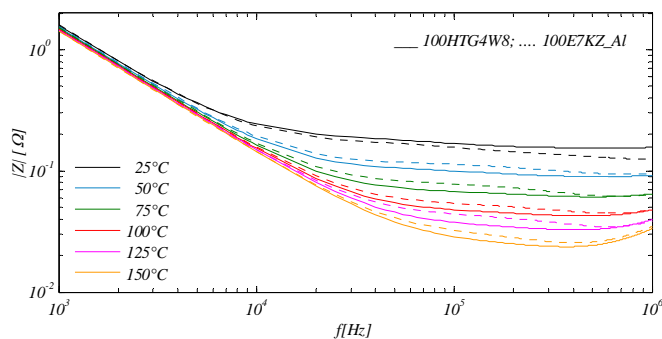
Do podłączenia kondensatorów wykorzystano ekranowane przewody wysokotemperaturowe w izolacji z włókna szklanego wykonane z miedzi pokrytej niklem, charakteryzujące się bardzo niskim temperaturowym współczynnikiem zmian rezystancji:

$$(1) R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad \text{gdzie } \alpha = 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot K^{-1}$$

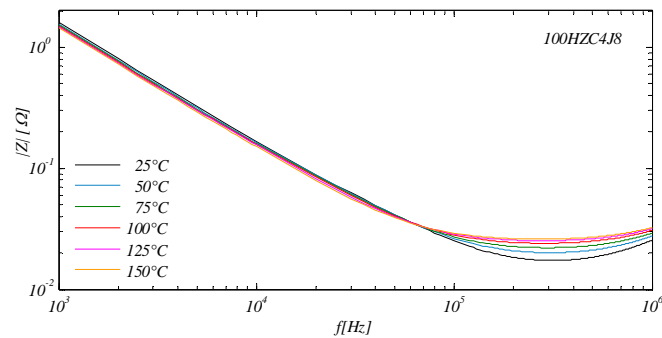
Impedancja przewodów pomiarowych (krzywa czerwona na rysunku 1) jest znacząca, więc moduł impedancji badanego kondensatora (krzywa czarna na rysunku 1) wyliczono za pomocą procedury numerycznej eliminującej z wyniku pomiaru wpływ oporu kabli (4 mΩ) oraz ich indukcyjności (142 nH). Wynik obliczeń został zweryfikowany poprzez pomiar modułu impedancji bez użycia kabli (krzywa czarna, przerywana).

Wpływ temperatury na parametry kondensatorów

Przeprowadzono pomiary modułu impedancji kondensatorów różnych typów – w zakresie częstotliwości od 200 Hz do 1 MHz, dla różnych wartości temperatury otoczenia.



Rys. 2. Moduł impedancji kondensatorów: zwykłego aluminiowego i polimerowego starszej generacji



Rys. 3. Moduł impedancji kondensatora polimerowego nowszej generacji

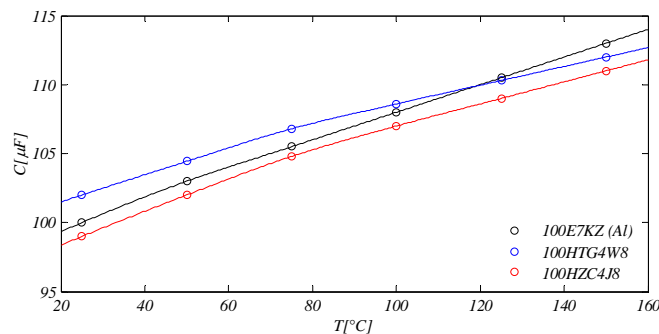
Elementy omawiane w artykule pochodzą od jednego producenta [2, 3] i charakteryzują się zbliżonymi parametrami użytkowymi: pojemność znamionowa 100 μF, napięcie znamionowe 50 V, maksymalna temperatura pracy 125°C. Element o oznaczeniu E7KZ jest kondensatorem elektrolitycznym aluminiowym, HTG4W8 oraz HZC4J8 to hybrydowe kondensatory polimerowe, przy czym HTG4W8 jest elementem starszej generacji o żywotności 1000±2000 h, zaś HZC4J8 – elementem nowej generacji o żywotności 4000 h.

Przebiegi modułu impedancji kondensatorów w funkcji częstotliwości, zmierzone dla różnych wartości temperatury otoczenia pokazano na rysunkach 2, 3. W oparciu o pozyskane dane wyznaczono wartości częstotliwości rezonansowej (f_r) oraz pojemności, ESR i ESL,

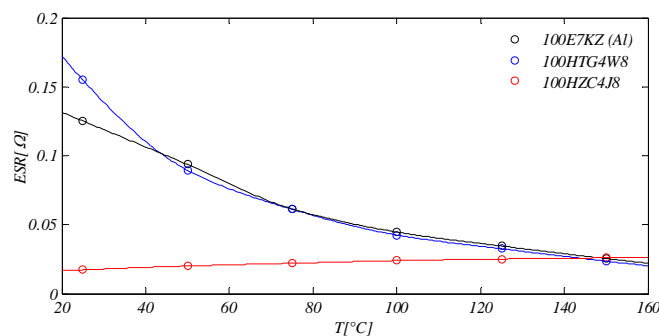
zapewniające najlepsze dopasowanie przy zastosowaniu najprostszego modelu C-R-L [1], pokazanego na rysunku 4. Wpływ temperatury na wyznaczone parametry pokazano na rysunkach 5 – 8.



Rys. 4. Model C-R-L zastosowany do identyfikacji parametrów kondensatorów



Rys. 5. Wpływ temperatury na pojemność badanych kondensatorów

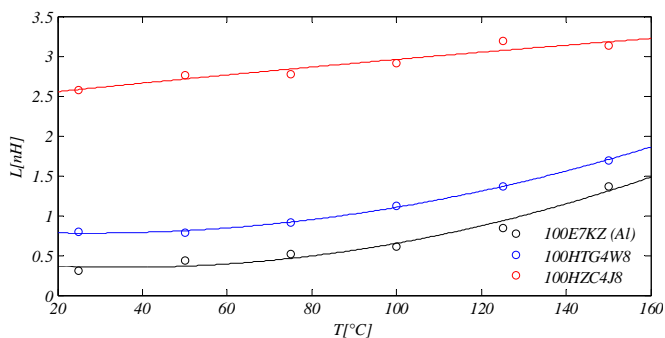


Rys. 6. Wpływ temperatury na ESR badanych kondensatorów

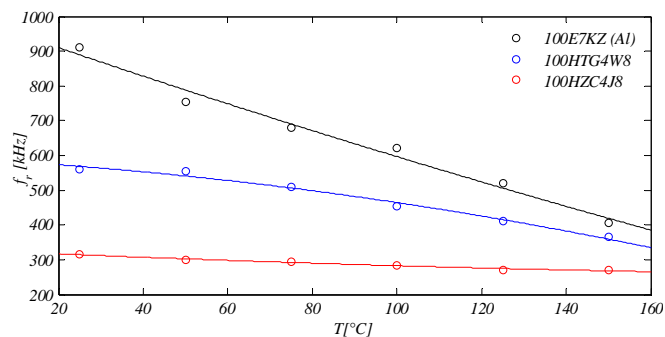
Zmiany pojemności pokazane na rysunku 5, jakościowo zgadzają się z danymi producenta [3], jednak pomiary przedstawione w niniejszej pracy wskazują na silniejszy wpływ temperatury na pojemność, niż wynikałoby to z noty katalogowej. Przykładowo, w temperaturze 100°C $\Delta C/C$ podawana w notcie wynosi 0,3%, zaś z przedstawionych pomiarów wynika, że jest to wartość w okolicy 6%, czyli dwudziestokrotnie większa. Niestety, producent nie sprecyzował wszystkich warunków pomiarów i można podejrzewać, że przeprowadzono je dla jednej wartości częstotliwości (zazwyczaj jest to 100 kHz). Ze wskazań mostka, który wylicza pojemność i ESR z modelu C-R (bez indukcyjności), wynika że dla częstotliwości 100 kHz i temperatury 100°C – $\Delta C/C$ wynosi 0,5%.

Znaczące zmniejszanie się wartości ESR wraz ze wzrostem temperatury, obserwowane dla kondensatorów: aluminiowego oraz polimerowego starszego typu (krzywe niebieska i czarna) jest zmianą typową dla większości kondensatorów z elektrolitem zawierającym kwas borowy [5, 6, 7, 8]. Zmiany zaobserwowane dla kondensatora hybrydowego najnowszej generacji (krzywa czerwona) są bardzo małe, jednak ESR rośnie nieznacznie w funkcji temperatury, co wynika z właściwości termoelektrycznych polimerów [9]. Na podstawie zależności pokazanych na rysunkach 7 i 8 można określić pasmo częstotliwości, w jakim badane elementy będą pracowały zgodnie z oczekiwaniami. Kondensatory aplikowane w konwerterach

mocy powinny operować w niewielkiej, ale bezpiecznej odległości od punktu rezonansu własnego. Niewielkiej – ze względu na małą wartość modułu impedancji, bezpiecznej – na tyle, aby przy zmianie warunków pracy, takich jak temperatura (zarówno otoczenia, jak i wnętrza), element nie zmienił swojego charakteru na indukcyjny.



Rys. 7. Wpływ temperatury na ESL badanych kondensatorów



Rys. 8. Wpływ temperatury na częstotliwość rezonansową badanych elementów

Poziom ESL i wynikającej z niej częstotliwości rezonansu własnego jest jedynym czynnikiem przemawiającym w prezentowanym porównaniu na niekorzyść kondensatora polimerowego najnowszej generacji. Jednak już zmiany wymienionych powyżej parametrów w funkcji temperatury są o wiele łagodniejsze niż zmiany w kondensatorze klasycznym aluminiowym i starszym polimerowym. Wartość ESL zmierzona dla elementu najnowszego jest praktycznie taka sama, jak ESL w „suchych” kondensatorach polimerowych, a ESL dwóch pozostałych – przyjmuje wartości z zakresu typowego również dla elementów aluminiowych [1].

Podsumowanie

Opracowano metodę pośredniego pomiaru parametrów elektrycznych kondensatorów w funkcji temperatury. Wyeliminowano istotny wpływ przewodów pomiarowych. Wykorzystany mostek RLC umożliwił pomiary w ograniczonym zakresie częstotliwości, jednak w przypadku gdy wielkością mierzoną jest moduł impedancji, możliwe jest zastosowanie oscyloskopu lub karty pomiarowej

rejestrującej wartości skuteczne prądów i napięć o częstotliwościach wyższych niż 1 MHz, co byłoby wskazane w badaniach elementów o wysokiej częstotliwości rezonansu własnego.

Wyznaczone wartości pojemności, rezystancji i indukcyjności pasożytniczej zidentyfikowano w oparciu o najprostszy spośród impedancyjnych modeli C-R-L kondensatora [1], co umożliwiło oszacowanie wpływu temperatury na straty w elemencie. Rozwój prac związanych z modelowaniem kondensatorów, głównie polimerowych, będzie polegał na podziale strat ze względu na właściwości poszczególnych warstw elementów, czyli zostaną wydzielone między innymi części pojemności i rezystancji powiązane ze zjawiskiem dielektrycznej absorpcji [10, 11] oraz z upływnością. Wartości składowych rezystancji i indukcyjności pasożytniczych oraz części składowe pojemności mogą w różny sposób zależeć od warunków pracy, w tym temperatury. Kontynuacja badań umożliwi ocenę sensowności rozbudowywania modeli kondensatorów i dobór ich optymalnej postaci. Zależności takie, jak na rysunkach 5 – 7 mogą być wykorzystywane jako charakterystyki parametru termoczułego w pomiarach rezystancji termicznej. Przede wszystkim jednak możliwe będzie określenie rzeczywistej przydatności kondensatorów polimerowych kolejnych generacji w systemach energoelektronicznych.

LITERATURA

- [1] Hapka A., Modelowanie efektów pasożytniczych w kondensatorach polimerowych, *Przegląd Elektrotechniczny* 9/2014, doi:10.12915/pe.2014.09.23
- [2] Understanding Polymer and Hybrid Capacitors, White paper, Panasonic, WWW.panasonic.com/industrial
- [3] <http://industrial.panasonic.com/www/products/capacitors/conductive-polymer-electrolytic-capacitors>
- [4] Nippon Chemi-Con, Conductive Polymer Aluminum Solid Capacitors, http://www.chemi-con.co.jp/e/catalog/pdf/Application_Note_NPCAP_090716e.pdf
- [5] <http://www.low-esr.com/esrtempperfcurves.asp>
- [6] Arnold J., Uprating of Electrolytic Capacitors, http://www.dfrsolutions.com/uploads/white-papers/Uprating_of_Electrolytic_Capacitors.pdf
- [7] Venet P., Lahyani A., Grellet G., Ah-Jaco A., Influence of aging on electrolytic capacitors function in static converters: Fault prediction method, 1999, *Eur. Phys. J. AP* 5, 71-83
- [8] Ishii S., Watanabe T., Ueda S., Tsuda S., Yamaguchi T., Takano Y., Resistivity reduction of boron-doped multi-walled carbon nanotubes synthesized from a methanol solution containing a boric acid, *Appl. Phys. Lett.*, 92, 202116, 2008, doi: 10.1063/1.2930677
- [9] Wada Y., Electrical Properties of Polymer Films, Oyobutri, *The Japan Society of Applied Physics*, Vol. 38, 1969, No. 4 P 296-305
- [10] Hubbard D.K., The use of Dielectric Absorption as a Method for Characterizing Dielectric Materials in Capacitors, PhD thesis, University of North Carolina at Chapel Hill, 2010
- [11] Kundert K., *Modeling Dielectric Absorption in Capacitors*, 2008, <http://www.designers-guide.org/>

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.