

doi:10.15199/48.2022.09.10

Zasilacz impulsowy z systemem detekcji żywotności na bazie monitorowania parametrów aluminiowego kondensatora elektrolitycznego

Streszczenie. Uszkodzenie aluminiowego kondensatora elektrolitycznego jest uważane za jedną z głównych przyczyn awarii zasilaczy. W artykule przedstawiono układ monitorowania parametrów kondensatora elektrolitycznego, który pozwala kontrolować jego podstawowe parametry takie jak pojemność i ESR. Zaproponowano podejście do detekcji możliwości awarii dwustopniowego zasilacza wykonanego w topologii PFC z LLC spowodowanego starzeniem się kondensatora elektrolitycznego bez obliczenia jego pojemności.

Abstract. The failure of aluminum electrolytic capacitors is considered as one of major failure modes of the power supplies. The paper presents an electrolytic capacitor parameters monitoring circuit. The monitoring circuit allows to control basic electrolytic capacitor parameters such as capacity and ESR. An approach for detecting the possibility of a two-stage PFC&LLC topology power supply failure caused by the aging of the electrolytic capacitor without capacitance calculating is proposed. (Switch-mode power supply with a service life detection system based on monitoring of aluminium electrolytic capacitor parameters).

Słowa kluczowe: zasilacz impulsowy, kondensator elektrolityczny, LED, oprawy LED.

Keywords switch-mode power supply, electrolytic capacitor, LED, LED luminaires.

Wstęp

W ostatnich latach oświetlenie w technologii LED jest coraz bardziej popularne. Obecnie jest to najbardziej energooszczędna technologia. Współczesne diody LED wykazują efektywność na poziomie 140 - 200 Lm/W [1, 2]. Przy prawidłowej aplikacji diod LED żywotność diod wynosi ponad 100 000 godzin przy spadku strumienia mniejszym niż 10% [3, 4]. W takim przypadku w oprawach oświetleniowych często zasilacz, a nie diody LED stanowią najsłabsze ogniwo [5]. W artykule [6] pokazano, że w zasilaczach AC/DC nawet 60% uszkodzeń jest związanych z uszkodzeniem kondensatora elektrolitycznego. Istnieje wiele metod testowania kondensatorów oraz modeli predykcji czasu życia kondensatora [6 - 8], jednak dają one wyłącznie przybliżone szacowanie. Często szacowania teoretyczne żywotności prowadzą do wymiany sprawnych urządzeń przez co zwiększa się koszt eksploatacji, lub odwrotnie, do zbyt późnego serwisu i awarii całego systemu. Są aplikacje w których dokładna estymacja czasu życia kondensatora jest szczególnie istotna, na przykład w oprawach ulicznych i oprawach przemysłowych. Zastosowanie w takich aplikacjach układu monitorującego zmiany kluczowych parametrów kondensatora elektrolitycznego pozwoliłoby na wyprzedzeniem planować serwis opraw i w ten sposób zwiększać bezpieczeństwo.

W latach 2017 – 2020 LUG Light Factory Sp. z o.o. realizowała projekt naukowo – badawczy pn. „Innowacyjny zestaw specjalistycznych opraw oświetleniowych do współpracy z inteligentnym systemem zarządzania - od badań do prototypów” (Nr Umowy RPLB.01.01.00-08-0076/16-00), którego głównym celem było opracowanie i zwalidowanie prototypów opraw oświetleniowych wraz z rozwiązaniami elektronicznymi, umożliwiającymi włączenie ich do inteligentnych systemów sterowania oświetleniem. Projekt realizowano w ramach Osi Priorytetowej 1. Gospodarka i innowacje, Działania 1.1 Badania i innowacje Regionalnego Programu Operacyjnego – Lubuskie 2020, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. W efekcie realizacji projektu badawczo – rozwojowego uzyskano zakładane rezultaty: opracowano i przygotowano do wdrożenia 46 prototypów nowych opraw oświetleniowych, z tego przygotowano 26 zgłoszeń wzorów przemysłowych, celem ochrony własności

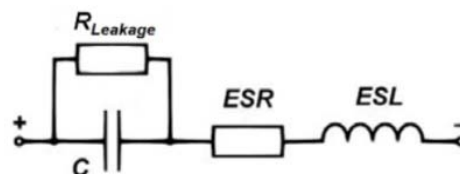
intelektualnej oraz 4 europejskie zgłoszenia patentowe, głównie związane z rozwiązaniami konstrukcyjnymi w nowych oprawach. W wyniku prowadzonych prac badawczych powstał układ do monitorowania pojemności elektrolitycznego kondensatora [9]. W tym artykule zostanie przedstawione rozszerzenie układu opisanego w [9].

Kluczowe parametry kondensatorów elektrolitycznych

Kondensator elektrolityczny charakteryzuje się tym, że role jednej z elektrod pełni elektrolit, a druga elektroda jest wykonana z folii metalowej. Dielektrykiem jest utleniona warstwa folii metalowej, na przykład Al_2O_3 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 . Użyty elektrolit może być suchy lub mokry [10]. Budowa kondensatora istotnie wpływa na jego właściwości, rozmiar i żywotność. W zasilaczach do opraw LED najczęściej są wykorzystywane aluminiowe kondensatory elektrolityczne, ze względu na wysoką pojemność, wysokie napięcie pracy i stosunkowo małe gabaryty.

W aluminiowym kondensatorze elektrolitycznym używany jest płynny elektrolit, który definiuje pewne osobliwości techniczne, takie jak maksymalna temperatura pracy, odparowanie elektrolitu prowadzące do zmian parametrów w czasie. Uszkodzenia kondensatorów elektrolitycznych dzielą się na parametryczne i całkowite. Parametryczne uszkodzenie oznacza zmianę pojemności, współczynnika rozproszenia lub prądu upływu. W kondensatorach elektrolitycznych wyróżnia się następujące rodzaje uszkodzeń: zwarcie, rozwarcie, spadek pojemności, wzrost współczynnika rozproszenia, wzrost prądu upływu, uszkodzenie wentylu i/lub uszczelki, wyciek elektrolitu [7, 11].

Właściwości konstrukcji oraz procesy z tym związane można zademonstrować przy pomocy schematu zastępczego aluminiowego kondensatora (Rys. 1).



Rys.1. Schemat zastępczy elektrolitycznego kondensatora

ESR jest zastępczą rezystancją szeregową. ESR jest sumą składowej stałej (R_0), składowej zależnej od częstotliwości (R_F) oraz składowej zależnej od temperatury (R_T) [7]:

$$(1) \quad ESR = R_0 + R_F + R_T$$

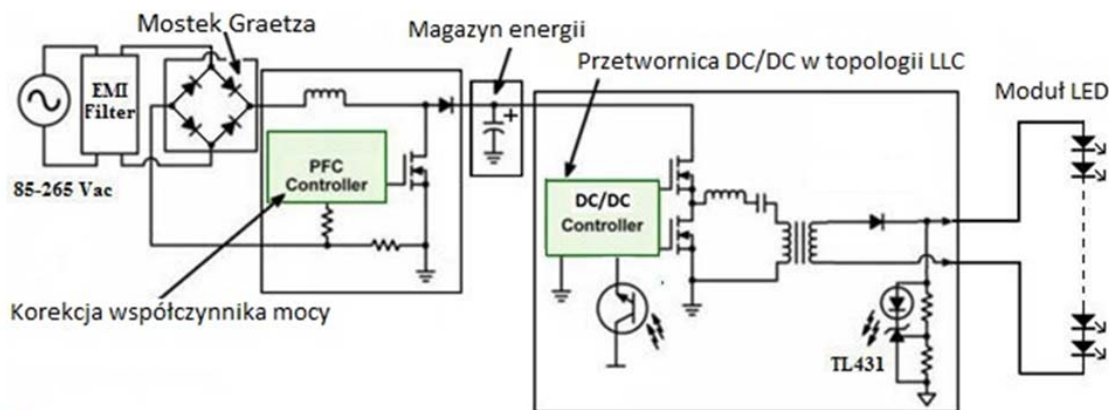
W idealnym kondensatorze ESR wynosi zero. Ze wzrostem ESR wzrasta temperatura elektrolitu, ponieważ prąd pobierany impulsowo przed układ drivera, powoduje zwiększone straty i wydzielanie ciepła wewnątrz kondensatora. Porównując amplitudę tętnień wysokoczęstotliwościowych, związanych ze wzrostem ESR, z wartościami zdefiniowanymi dla nowego zasilacza, można oszacować stopień degradacji kondensatora.

Samorozładowanie kondensatora odbywa się za pośrednictwem $R_{Leakage}$. Wysoka jakość dielektryka pozwala zwiększyć $R_{Leakage}$. ESL jest indukcyjnością elementów kondensatora elektrolitycznego.

Żywotność kondensatorów elektrolitycznych w dużej mierze zależy od sposobu ich aplikacji w układzie. Istotnym jest stosowanie się do specyfikacji producenta: napięcie pracy, tętnienia prądu, temperatury pracy. Jednak pomimo prawidłowej aplikacji komponentu z upływem czasu następuje odparowanie elektrolitu, co prowadzi do spadku pojemności kondensatora oraz wzrost ESR [11].

Wiele prac jest poświęconych ocenie stanu zesterzenia się elektrolitu [12]. Większość z nich skupia się na

miarach prądu i napięcia w celu oszacowania wartości ESR oraz pojemności kondensatora lub na pomiarze ciśnienia w kondensatorze [6, 12]. Sposoby monitorowania parametrów kondensatora w dużym stopniu są uwarunkowane miejscem jego aplikacji [6, 9, 12, 13]. W przypadku zasilaczy AC/DC stosowanych w oświetleniu LED zmiana parametrów kondensatora elektrolitycznego może wpływać na tętnienia prądu i odpowiednio na jakość światła lub na pracę samego zasilacza (niezadziałanie zasilacza przy zbyt niskiej pojemności kondensatora elektrolitycznego). Istnieje wiele topologii zasilaczy AC/DC stosowanych do oświetlenia LED. Wybór topologii zależy od mocy zasilacza, wymagań technicznych oraz ceny [14]. Zasilacze dużej mocy (> 100 W) najczęściej stosuje się w oświetleniu infrastrukturalnym i przemysłowym. Charakterystyczną cechą opraw LED dużej mocy jest trudny dostęp do nich, np. zawieszenie wysoko na hali, na słupach drogowych na autostradzie. W celu osiągnięcia wymaganych normatywnie parametrów zasilacza (efektywność, współczynnik mocy, tętnienia prądu) stosuje się dla różnych mocy różne topologie. W artykule zostanie szczegółowo omówiona implementacja układu detekcji żywotności w stałoprądowych dwustopniowych zasilaczach AC/DC, w których pierwszy stopień to przetwornica AC/DC z układem korekcji współczynnika mocy, a drugi stopień to przetwornica DC/DC wykonana w topologii LLC (Rys. 2).



Rys.2. Dwustopniowy zasilacz impulsowy do opraw LED w topologii PFC z LLC

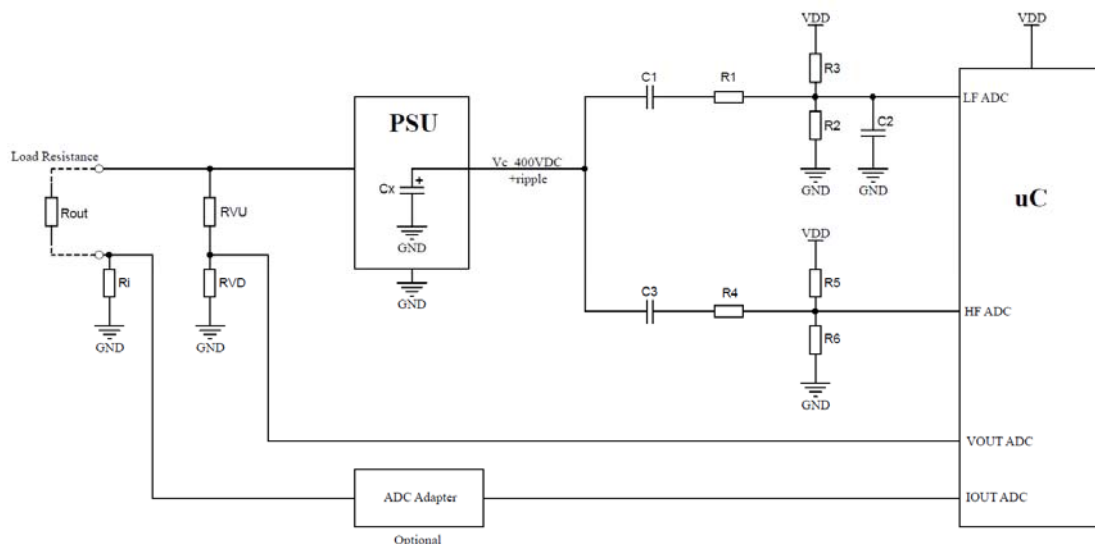
System monitorowania parametrów aluminiowego kondensatora elektrolitycznego

W zależności od miejsca zastosowania kondensatora zmiana wartości jego parametrów może prowadzić do różnych skutków dla całego systemu. W przypadku dwustopniowego zasilacza w topologii PFC z LLC kluczowa jest wartość szczytowa napięcia na wejściu stopnia LLC. W układzie zasilacza impulsowego spadek pojemności kondensatora elektrolitycznego, który pełni rolę magazynu energii, prowadzi do zwiększenia niskoczęstotliwościowych tętnień napięcia (około 100 Hz) na wejściu stopnia LLC, a wzrost ESR prowadzi do wzrostu wysokoczęstotliwościowych składowych sygnału, które to powodują wzrost temperatury wewnętrznej kondensatora, przyspieszone wysychanie elektrolitu i dalszy spadek pojemności. Sam wzrost tętnień napięcia nie prowadzi do zmian w pracy układu dopóki nie zostanie przekroczony zakres napięcia wejściowego drugiego stopnia zasilacza (przetwornicy DC/DC). Po przekroczeniu tego zakresu zasilacz przestanie działać. Na przykład LED driver ICL5101 firmy Infineon posiada zabezpieczenie nadnapięciowe z progiem zadziałania 109% od napięcia nominalnego. Sugerowany zapas bezpieczeństwa

między wartością szczytową napięcia wejściowego na stopień LLC a zabezpieczeniem nadnapięciowym ma wynosić co najmniej 2,5% [15]. Uproszczony schemat ideowy układu pomiaru degradacji kondensatora przedstawia rysunek 3.

Układ zasilacza (PSU) zawiera monitorowany kondensator C_x , z którego napięcie jest przekazywane do układu pomiaru tętnień, składającego się z dwóch torów pomiarowych:

- Pierwszy tor zbudowany z elementów $C1$, $R1$, $R3$, $R2$ i $C2$ jest układem odcinania składowej stałej wraz filtrem pasmowym i dzielnikiem napięcia, który dopasowuje poziom sygnału do zakresu przetwarzania przetwornika analogowo-cyfrowego. Filtr jest tak dobrany, aby nie redukował napięcia przemiennego o częstotliwości z zakresu 50-150 Hz, zawierającego częstotliwość tętnień 100 Hz. Wartość zmierzonego napięcia na wejściu LF ADC jest analizowana przez mikroprocesor μC , co pozwala wykryć stopień degradacji pojemności kondensatora C_x , przez porównanie poziomu napięcia tętnień do wartości zarejestrowanych w momencie pierwszego uruchomienia nowego zasilacza.



Rys.3. Uproszczony schemat ideowy układu pomiaru degradacji kondensatora elektrolitycznego Cx

- Drugi tor pomiarowy, zawierający filtr górnoprzepustowy (50-150kHz) i dzielnik napięcia (elementy C3, R4, R5 oraz R6), podaje napięcie na wejście HF ADC mikroprocesora μC . Wartość tego napięcia pozwala oszacować zmiany rezystancji szeregowej (ESR) kondensatora Cx.

Oprócz kondycji kondensatora Cx, tętnienia niskiej i wysokiej częstotliwości zależą od aktualnego obciążenia zasilacza. Wyznaczenie aktualnej mocy wyjściowej zasilacza jest realizowane poprzez pomiar w dwóch kolejnych torach pomiarowych.

- Pierwszy z nich służy do określenia wartości prądu wyjściowego zasilacza przez pomiar spadku napięcia na rezystorze pomiarowym R1, które jest następnie wzmacniane w układzie ADC Adapter, do wartości pozwalającej na jego przetworzenie do postaci cyfrowej w przetworniku analogowo-cyfrowym mikroprocesora μC .

- Drugi tor pomiarowy służy do pomiaru napięcia wyjściowego zasilacza. Pomiar odbywa się poprzez podanie na wejście kolejnego przetwornika analogowo-cyfrowego mikroprocesora, napięcia uzyskanego w wyniku podziału napięcia wyjściowego zasilacza za pomocą rezystancyjnego dzielnika napięcia zbudowanego z rezystorów RVU i RVD.

Uzyskane w ten sposób cyfrowe wartości pozwalają na wyznaczenie prądu, napięcia oraz mocy wyjściowej zasilacza, w wyniku obliczeń wykonywanych w mikroprocesorze, uwzględniających znane wartości boczniaka pomiarowego R1 oraz stopnia podziału w dzielniku RVU, RVD.

Na zmiany napięcia obserwowanego na kondensatorze ma wpływ nie tylko stopień jego zesterzenia, ale również temperatura otoczenia i obciążenia zasilacza. Musi to zostać uwzględnione przy analizie danych.

Analiza pomiarów tętnień napięcia w odniesieniu do wartości zmierzonej przy uruchomieniu nowego zasilacza, uwzględniająca pomiar temperatury oraz mocy wyjściowej, pozwala na wiarygodną ocenę stopnia zesterzenia się najbardziej krytycznego elementu urządzenia, jakim jest kondensator elektrolityczny.

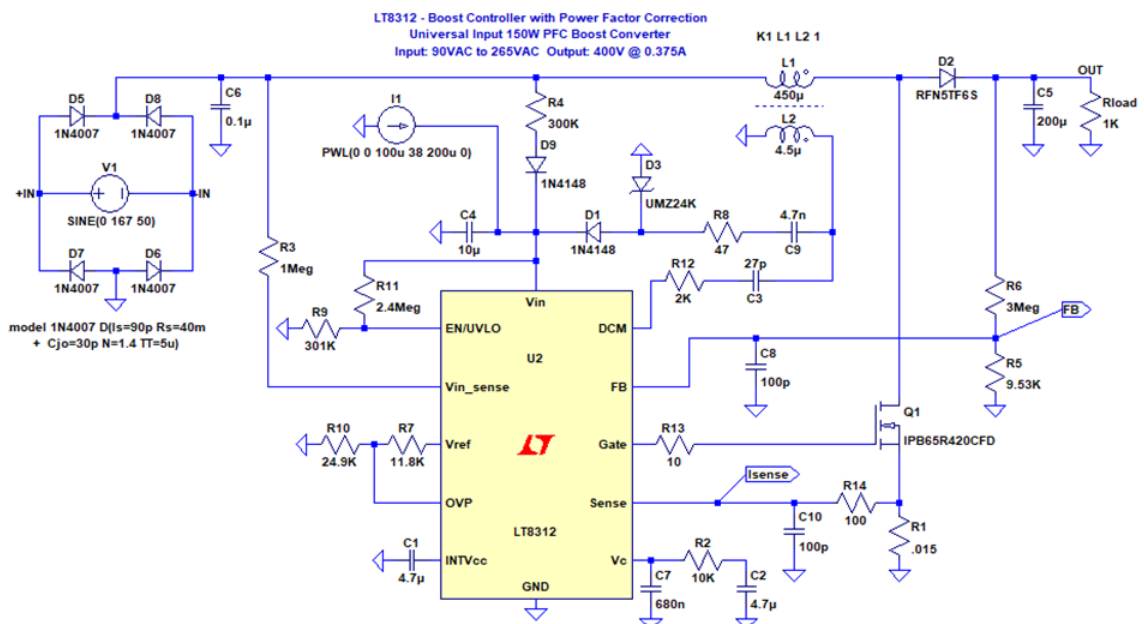
Szczegółowa realizacja układów pomiarowych zależy od konstrukcji konkretnego typu zasilacza (różne napięcia i moce wyjściowe), jednak zasada działania pozostaje ta sama.

Przykładowa realizacja proponowanego rozwiązania

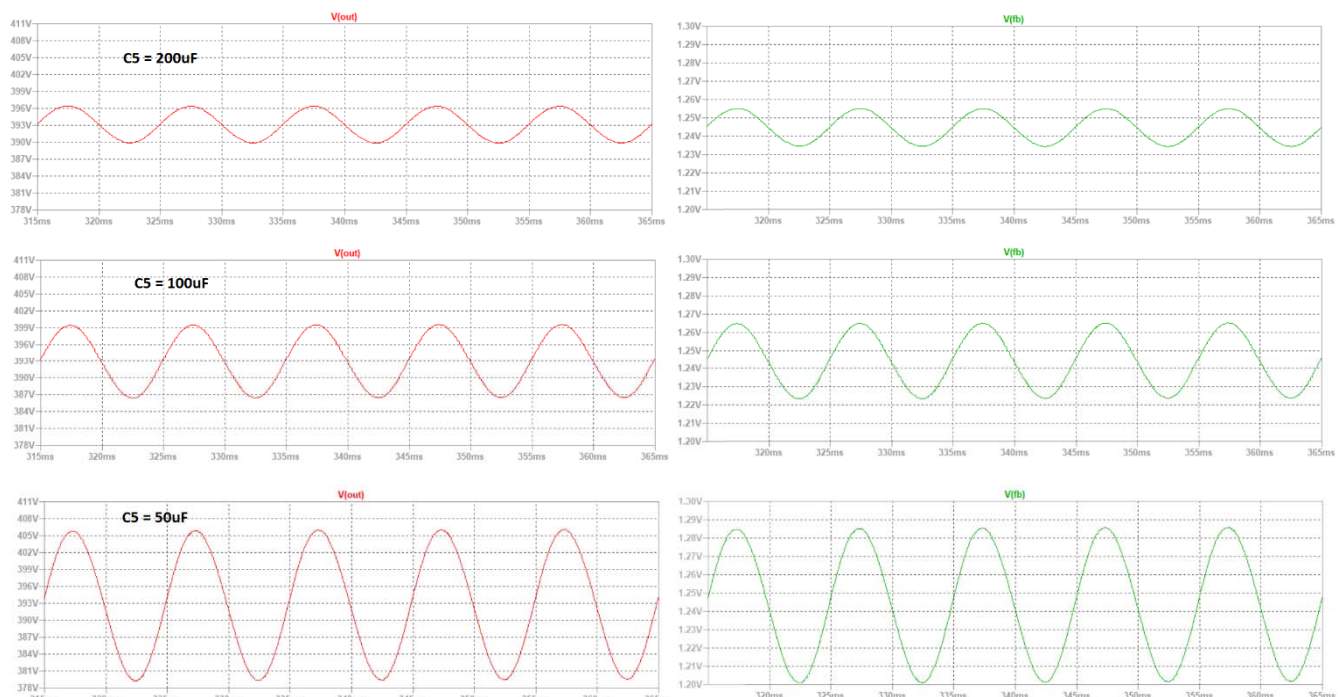
Przykładowa uproszczona realizacja proponowanego układu została wykonana na driverze LT8312 (Rys. 4). W programie LTSpice wykonano symulacje spadku pojemności oraz wzrostu ESR. Kondensator elektrolityczny jest oznaczony na układzie jako C5. W zaprezentowanym układzie pomiar tętnień nisko- i wysokoczęstotliwościowych napięć kondensatora C5 odbywa się w punkcie FB na dzielniku wyjściowym R5 – R6. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 5 – 7.

Całkowite tętnienia napięcia będą wypadkową składowej nisko- i wysokoczęstotliwościowej. Dla lepszego zobrazowania wpływu spadku pojemności oraz wzrostu ESR, symulacje przeprowadzono osobno dla obu przypadków.

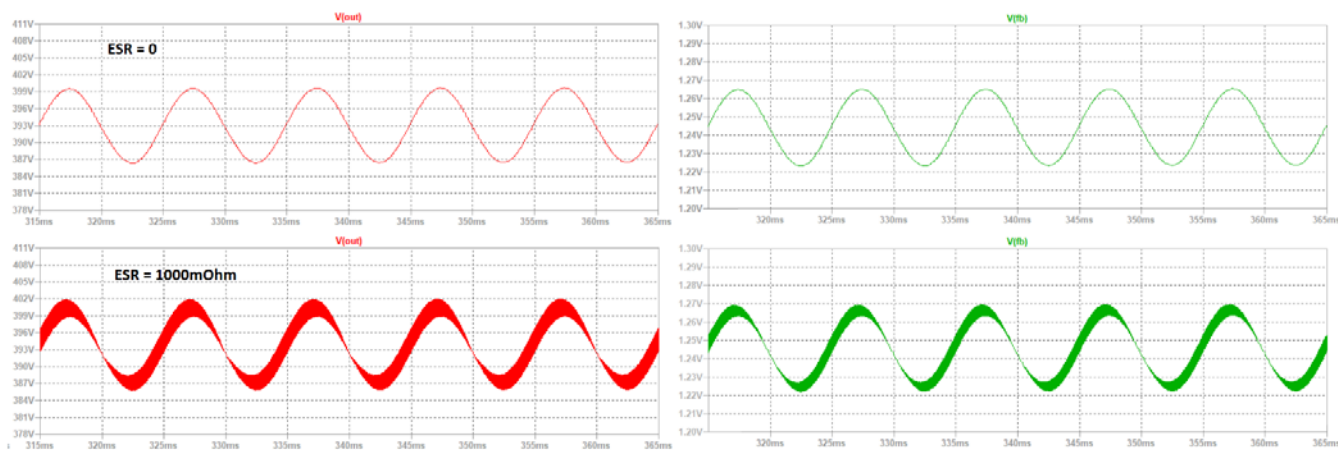
Symulacje potwierdzają założenia, że spadek pojemności prowadzi do wzrostu tętnień napięcia składowej niskoczęstotliwościowej, a wzrost ESR do wzrostu tętnień napięcia składowej wysokoczęstotliwościowej. Wartość szczytowa napięcia jest sumą amplitud nisko- i wysokoczęstotliwościowej składowych. Ponieważ wpływ wysokoczęstotliwościowej składowej jest stosunkowo mały, czasami proponuje się monitorować jedynie wartość szczytową składowej niskoczęstotliwościowej [9]. Zgłoszenie patentowe [9] proponuje monitorować wartość szczytową napięcia o częstotliwości 100 Hz oraz dodatkowo monitorować temperaturę i moc wyjściową zasilacza. Na tej podstawie proponuje się szacować pojemność kondensatora. W przypadku dwustopniowego zasilacza w topologii PFC z LLC wartość szczytowa napięcia na wejściu stopnia LLC jest podstawowym parametrem do określenia stanu zasilacza. Nieznaczne przekroczenie zakładanego progu bezpieczeństwa może być wyznacznikiem do informowania użytkownika o możliwości wystąpienia w krótkim czasie awarii systemu. Warto pamiętać, że na wartość mierzonego napięcia mają wpływ temperatura i obciążenie zasilacza. W celu uwzględnienia tych czynników można wprowadzić tryb testowy, na przykład pomiar napięcia odbywałby się wyłącznie przy uruchomieniu zasilacza. Jeśli zasilacz przewiduje możliwość regulacji mocy, to przed wysterowaniem zadanych parametrów w celu diagnostyki byłyby ustalane warunki testowe, na przykład minimalna moc. Wpływ temperatury może być szacowany poprzez analizę danych z czujnika temperatury lub informacji o temperaturze otoczenia przesyłanych do chmury z zewnętrznymi czujnikami.



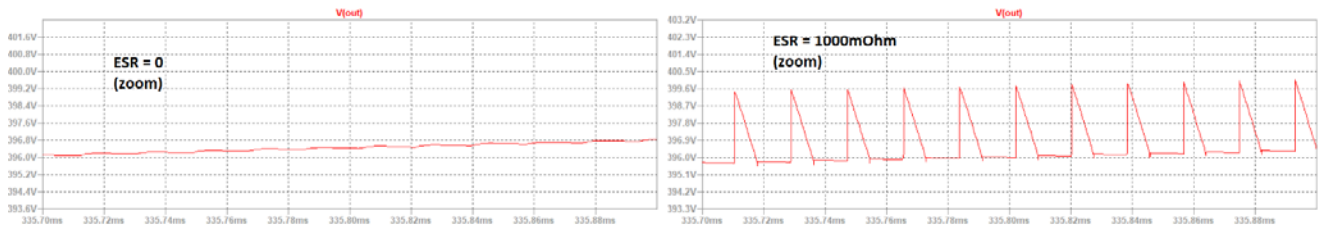
Rys.4. Zasilacz zrealizowany na driverze LTC8312



Rys.5. Tętnienia napięcia niskiej częstotliwości rosnące wraz ze spadkiem pojemności kondensatora C5



Rys.6. Tętnienia napięcia wysokiej częstotliwości rosnące wraz ze wzrostem zastępczej rezystancji szeregowej ESR kondensatora C5



Rys.7. Tętnienia napięcia wysokiej częstotliwości rosnące wraz ze wzrostem zastępczej rezystancji szeregowej ESR kondensatora C5 (szczegół przebiegu)

Implementacja układu do monitorowania składowych napięcia o wysokiej częstotliwości nieznacznie podroży układ, jednak pozwoli podnieść jakość systemu monitorowania poprzez obserwację zmian ESR. Pewną trudnością może być ustalenie wartości krytycznej, co może wymagać prowadzenia dodatkowych badań układu oraz współpracy z producentem kondensatorów elektrolitycznych. Alternatywą może być obserwacja szybkości zmian amplitudy tętnień. Wykrycie szybkiego przyrostu w wartości amplitudy w krótkim czasie może świadczyć o szybkim odparowaniu elektrolitu i prawdopodobnie szybkim uszkodzeniu kondensatora. Konkretnie parametry muszą jednak być wyznaczone indywidualnie, uwzględniając dane od producenta kondensatora i miejsca aplikacji kondensatora.

Wnioski

Najnowsze badania naukowe na świecie w branży świetlnej wskazują na potrzebę racjonalizacji oświetlenia przestrzeni (zewnętrznej i wewnętrznej) z zastosowaniem inteligentnych systemów sterowania oświetleniem dla poprawy komfortu i bezpieczeństwa użytkowników. Jednym z tematów takich badań jest możliwość wczesnej detekcji uszkodzenia zasilacza, które są integralną częścią oprawy LED.

W tym artykule został przedstawiony rozbudowany układ monitorowania parametrów elektrolitycznego kondensatora, który pozwala monitorować podstawowe parametry elektrolitycznego kondensatora takie jak pojemność i ESR. Oprócz tego został zaproponowany mechanizm, pozwalający wykryć objawy zbliżającej się awarii zasilacza spowodowanej starzeniem się kondensatora elektrolitycznego, bez konieczności wyznaczania aktualnej pojemności tego kondensatora. Takie rozwiązanie jest możliwe w dwustopniowych zasilaczach wykonanych w topologii PFC z LLC, które najczęściej jest stosowany w aplikacjach krytycznych, np. oświetlenie drogowe.

Autorzy: mgr inż. Arkadiusz Wilczyński, LUG Light Factory Sp. z o.o., Dywizja Badawczo-Rozwojowa, ul. Gorzowska 11, 65-127 Zielona Góra, E-mail: arkadiusz.wilczynski@lug.com.pl; dr inż. Olena Hebda, LUG Light Factory Sp. z o.o., Dywizja Badawczo-Rozwojowa, ul. Gorzowska 11, 65-127 Zielona Góra, E-mail: olena.hebda@lug.com.pl.

LITERATURA

- [1] Karta katalogowa Luxeon 5050, Lumileds, <https://lumileds.com/wp-content/uploads/DS174-luxeon-5050-datasheet.pdf>, data dostępu: 17.03.2022
- [2] Karta katalogowa S1W0-3030xx7003-00000000-00001 – Mid-Power LED, Seoul Semiconductor, <http://www.seoulsemicon.com/en/product/spec/STW7C12C-E0/287>, data dostępu: 17.03.2022.
- [3] Cree LED Components IES LM-80-2008 Testing Results Revision: 76 (January 17, 2022), https://cree-led.com/media/documents/LM80_Results.pdf, data dostępu: 30.01.2022.
- [4] Duris S8 White (CCT 2200 K – 6500 K) ANSI/IES LM-80-15 Test report No. 200120W7.
- [5] Sun, B., Fan, X., Li, L., Ye, H., van Driel, W., & Zhang, G. Q.. A Reliability Prediction for Integrated LED Lamp with Electrolytic Capacitor-Free Driver. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 7(7) (2017), 1081-1088.
- [6] Pang H.M, Pong M. H. Bryan A life prediction scheme for electrolytic capacitors in power converters without current sensor, *In Proceedings of the 25th Annual IEEE Applied Power Electronics conference and Exposition (APEC 2010)*, Palm Springs, CA., 21 – 25 February 2010. the 25th APEC, 2010, 973 – 979.
- [7] Albertsen A., Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation, *Bodos Power Magazine*, 04 (2010), 52-54.
- [8] Wang H., Blaabjerg F., Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters—An Overview, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50 (2014), no. 5, 3569-3578.
- [9] Lewandowski W., Wilczyński A., Kramarski S., Szajdecki A., Awramik R., Zgłoszenie patentowe EPO nr. 18460077.3 Zasilacz impulsowy.
- [10] Menzel St. ABC of capacitors. Basic principles, characteristics and capacitor types, Würth Elektronik eiSos GmbH&Co. KG, Waldenburg, 2014.
- [11] Aluminium electrolytic capacitors cat. No. E1001V 2021 Nippon-Chemicon, <https://www.chemicon.co.jp/products/relatedfiles/capacitor/catalog/al-all-e.pdf>, data dostępu: 03.02.2022
- [12] Dang H. L., Kwak S. Review of Health Monitoring Techniques for Capacitors Used in Power Electronics Converters. *Sensors (Basel)*, 20 (13) (2020), 3740.
- [13] Shu Cheng, Chang Liu, Shengxian Xue, Maoyu Wang, Xun Wu, Yu Luo, An on-line capacitor state identification method based on improved RLS, *Transportation Safety and Environment*, 3 (2021), Issue 3.
- [14] Castro I., Vazquez A., Arias M., Lamar D. G., Hernando M. M., Sebastian J., A Review on Flicker-Free AC–DC LED Drivers for Single-Phase and Three-Phase AC Power Grids, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34 (2019), no. 10, 10035-10057.
- [15] Design Guide Line for PFC&LLC Converter using ICL5101, Revision 1.1, Infineon (2015), https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Design%20Guide_ICL5101_Rev.%201.0-AN-v01_10-EN.pdf?fileId=5546d462503812bb0150add24a3c513f, data dostępu: 17.03.2022.