

**25 lat minęło...**

# 25 lat z życia kondensatorów

*Kondensator jest komponentem, który jest jednym z najczęściej stosowanych przez elektroników. Pomimo zaawansowanej technologii, bez kondensatorów nie obejdzie się żaden układ cyfrowy, a to ze względu skoki prądu powstające podczas przełączania miniaturowych tranzystorów CMOS zaimplementowanych w jego strukturze. Odpowiednio dobrana pojemność, włączona w obwodzie zasilania układu, dostarcza tym przełączeniom energii jednocześnie powodując zmniejszenie emisji zaburzeń i umożliwiając niezakłóconą pracę układu. Bez kondensatorów nie zadziałają lub będą pracowały ze znacznym pogorszeniem parametrów, przetwornice napięcia, stabilizatory, wzmacniacze, oscylatory i wiele innych, którym do poprawnego działania jest niezbędna dodatkowa pojemność, dołączana do obwodu.*

Pamiętam wzmiankę o tym, że już starożytnych kapłanów egipskich podejrzewano o wynalezienie kondensatora, jednak wydaje mi się, że takie przymierzanie współczesnych standardów do odkryć przedmiotów sprzed wielu tysięcy lat, nie zawsze ma sens. W jednej z piramid czy może grobowców, w czasie wykopalisk natrafiono na szereg przedmiotów wykonanych z miedzi i gliny. Był to rodzaj glinianego garnka, który z zewnątrz był wyłożony miedzią, miał też „korek” i coś jakby miedzianą elektrodę w tym korku. Rzekomo ten „garnek” mógł pracować jak Butla Lejdejska, ale to tylko domysły archeologów.

Wynalazek kondensatora przypisuje się niemieckiemu uczonemu Ewaldowi Georgowi von Kleist, który wykonał go w 1745 r. Co ciekawe, uczony mieszkał w Kamieniu Pomorskim, który aktualnie jest miastem na terytorium Polski. Ten kondensator nosił nazwę „Butli Kleistiany”. Następnie wzmianka o tym wynalazku, a może i jego dokładniejszy opis, przedostały się do Uniwersytetu w Lejdzie, do rąk profesora Pieter van Musschenbroek. Ten opracował własną wersję wynalazku, który do dziś jest obecny w wielu szkolnych pracowniach fizyki pod nazwą „Butli Lejdejskiej”. Właśnie ta butla, a nie pierwowzór Kleistiany, jest uważana za pierwszy kondensator energii

elektrycznej. Choć szczerze mówiąc – zależy, kogo zapytamy.

Pierwsze kondensatory służyły głównie do eksperymentów z jeszcze nierozumianą energią elektryczną, jak również do wytwarzania efektów specjalnych na użytek różnych widowisk. Na poważnie zajął się nimi dopiero Benjamin Franklin, który zauważył, że płaskie powierzchnie rozdzielone szklanym dielektrykiem równie dobrze przechowują energię elektryczną, jak Butla Lejdejska. Bazując na własnych doświadczeniach wykonał płaski kondensator, który został nazwany Kwadratem Franklina. Jednak pionierem praktycznego zastosowania kondensatorów był dopiero Michael Faraday, który próbował użyć kondensatora do „zapamiętania” elektronów generowanych w trakcie prowadzonych przez niego eksperymentów. Liczne próby doprowadziły do opracowania kondensatora, wykonanego ze sporej beczki po oleju. W uznaniu zasług tego uczonego na polu elektryczności, jednostkę pojemności nazwano od jego nazwiska Faradem.

Wzór na pojemność elektryczną kondensatora płaskiego jest nam dobrze znany od szkoły podstawowej (przynajmniej kiedyś uczono go w podstawówce) i nie ma sensu przytaczać go czytelnikom EP. Przypomnijmy tylko, że w mianowniku mamy iloczyn względnej przenikalności

elektrycznej i pola powierzchni okładek, natomiast w liczniku odległość pomiędzy okładkami. Łatwo więc domyślić się, że im większa stała dielektryczna oraz im mniejsza odległość między okładkami, tym większą pojemność będzie miał kondensator. Mimo tego, że wzór na pojemność wielokrotnie zwinętego kondensatora cylindrycznego jest inny, to jego pojemność również będzie zależała od tych samych czynników. Dlatego wysięg technologiczny w zakresie poprawiania parametrów kondensatorów dotyczy głównie materiałów stosowanych na okładki, ich doprowadzenia i warstwę dielektryka.

W latach dziewięćdziesiątych, bo odmierając 25 lat gdzieś tam musimy osadzić początek ewolucji kondensatorów, w pracowni konstrukcyjnej mieliśmy do dyspozycji głównie kondensatory stałe i elektrolityczne produkcji krajowej, chociaż z rzadką pojawiały się też importowane. Wtedy też zaczynaliśmy stosować kondensatory SMD, początkowo w sprzęcie profesjonalnym i głównie do filtrowania zasilania ze względu na brak wyprowadzeń w postaci drutów, które dla prądu o wystarczająco dużej częstotliwości przedstawiają sobą indukcyjność i psują parametry obwodu. Typowo jednak stosowaliśmy kondensatory do montażu przewlekane, nazwach zależnych od rodzaju zastosowanego dielektryka. Były to kondensatory mikowe, foliowe, ceramiczne i elektrolityczne. Kondensatory tantalowe, mimo iż dostępne, to jednak ze względu na wysoką cenę w porównaniu z kondensatorami elektrolitycznymi, były używane stosunkowo rzadko. W tamtych latach, do ich wad należało też małe – w porównaniu z kondensatorami elektrolitycznymi – napięcie przebicia. Mimo tego, używaliśmy „tantalów” do filtrowania zasilania cyfrowych układów scalonych.

Zwykle zauważamy spektakularny rozwój komponentów półprzewodnikowych. Możliwości układów półprzewodnikowych rosną w zawrotnym tempie, ale trzeba też

## 25 lat minęło...

zauważyć, że producenci komponentów biernych również udoskonalają swoje produkty i na przykład współczesne kondensatory mają, po pierwsze, znacznie lepsze parametry elektryczne, a po drugie, znacznie mniejsze wymiary.

### Kondensatory wielowarstwowe MLCC

Skrót MLCC obecny przy nazwie kondensatora oznacza wielowarstwowy kondensator ceramiczny (Multilayer Ceramic Capacitor). Jest on zbudowany z wielu pojedynczych kondensatorów, ułożonych jeden na drugim i połączonych równolegle. Surowcami do produkcji takich kondensatorów są zwykle zawiesiny bardzo drobno zmielnego dwutlenku tytanu (TiO<sub>2</sub>) lub tytanianu baru (BaTiO<sub>3</sub>), z dodatkiem Zr, Nb, Co lub Sr. Celem jest tu uzyskanie cząstek o charakterystycznej wielkości poniżej 10 nm. Zawiesiny te miesza się ze specjalnym spoiwem i przetwarza w ceramiczne błony, które typowo mają zaledwie kilka tysięcznych milimetra grubości.

Współczesny kondensator MLCC może mieć warstwę dielektryka o grubości nawet 1/1000 mm, a liczba warstw może przekraczać tysiąc.

Grubość poszczególnych warstw kondensatora zależy od stopnia rozdrobnienia i charakterystyki rozkładu ziaren cząstek ceramicznych. Obecnie występuje tendencja w kierunku coraz mniejszej skali, co wymusza poszukiwanie nowych materiałów i technik ich rozdrabniania. Pojemność współczesnych (stałych!) kondensatorów MLCC sięga aż 100 μF! Trzeba jednak liczyć się z tym, że im większa pojemność, tym cieńsza warstwa dielektryka i tym samym – mniejsze napięcie jego przebicia.



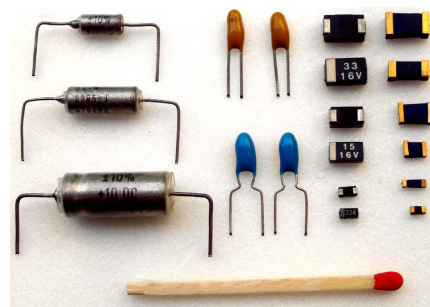
Kondensatory MLCC mogą być używane w temperaturze rzędu 150, a wykonania specjalne nawet 200°C. Odporność na wysoką temperaturę uzyskuje się dzięki odpowiednim dielektrykom: X8R, X8L oraz X9U (200°C). Ich zastosowanie gwarantuje dobry współczynnik temperaturowy. Zmiany pojemności w maksymalnym zakresie temperatury wynoszą: X8R ±15%, X8L +15...-40%, X9U +15...-56%. Co oczywiste, w niższej temperaturze uzyskuje się lepsze parametry np. ok. -7,5% przy 125°C. Istnieje również coraz więcej komponentów zoptymalizowanych pod kątem funkcji, jaką mają pełnić w określonym zastosowaniu. Mogą one wymagać, na przykład, skrajnie małej indukcyjności pasożytniczej, a do tego ściśle określonych charakterystyk DC i AC.

Przez około 30 lat nastąpił znaczny postęp w dziedzinie kondensatorów MLCC. W porównaniu do lat osiemdziesiątych, gdy wprowadzano je do masowej produkcji, kondensator zminiaturyzowano aż 100-krotnie! Na przykład, powszechnie używany do filtrowania zasilania kondensator o pojemności 100 nF w latach osiemdziesiątych mieścił się w obudowie 3216, a współcześnie bez trudu można go kupić w obudowie 0603!

Postęp w tej dziedzinie nadal trwa – producenci stale pracują nad nowymi materiałami, co w konsekwencji może doprowadzić do zastąpienia przez kondensator MLCC kondensatorów innych typów. Przykładem może być popularny układ interfejsowy MAX232. Jego podstawowa aplikacja wymaga 5 kondensatorów elektrolitycznych o pojemności 1 μF na napięcie przebicia rzędu 16 V. Gdybyśmy z jakichś powodów nie chcieli używać kondensatorów elektrolitycznych, to w przeszłości musielibyśmy zastosować MAX202, który wymagał kondensatorów stałych o pojemności 100 nF. Współcześnie bez problemu możemy w miejsce „elektrolitów” wlutować kondensatory MLCC, co będzie też miało tę zaletę, że podczas montażu nie trzeba będzie zastanawiać się nad ich poprawną polaryzacją.

### Kondensatory tantalowe

Przed 25 laty, jeśli w ogóle stosowaliśmy kondensatory tantalowe, to przeważnie o niewielkiej pojemności (rzędu pojedynczych μF) i do montażu przewlekane. Miały charakterystyczną obudowę o kształcie kropki, najczęściej w kolorze czerwonym.



Tantalowe kondensatory elektrolityczne mają elektrolit w fazie stałej. Współcześnie, głównie dzięki technice montażu SMT i znacznemu obniżeniu ceny, zyskały ogromną popularność oraz są znacznie częściej i chętniej stosowane, niż przed 25 laty. Znajdują zastosowanie głównie w obwodach zasilania, charakteryzują się stabilnością parametrów, trwałością i małymi wymiarami, chociaż moim zdaniem w wielu zastosowaniach mogą zostać wyparte przez wspomniane wcześniej, znacznie od nich tańsze kondensatory MLCC.

We współczesnych kondensatorach tantalowych stosuje się katody polimerowe, obniżające rezystancję szeregową (ESR), zastępczą indukcyjność szeregową (ESL) i umożliwiające dalszą miniaturyzację. Przy stosowaniu wysokiej jakości proszków tantalowych, kondensatory te znacznie przewyższają swoimi parametrami kondensatory wykonane w innych technologiach, a zwłaszcza typowe kondensatory elektrolityczne.

W konwencjonalnych kondensatorach tantalowych jako katody używa się spiekane go dwutlenku manganu (MnO<sub>2</sub>). Ten niedrogi materiał półprzewodnikowy ma własności samonaprawcze, co zapewnia niezawodność, ale w wysokiej temperaturze, na skutek dużej zawartości tlenu, może ulegać zapłonowi, więc od połowy lat dziewięćdziesiątych trwają prace nad zastąpieniem MnO<sub>2</sub> przewodzącymi polimerami. Ich znacznie wyższa przewodność skutkuje obniżeniem ESR, co w połączeniu z wyeliminowaniem ryzyka



zapłonu przyczynia się do wzrostu poziomu nakładów na tę technologię.

Polimerowe kondensatory tantalowe różnią się od konwencjonalnych wyłącznie od strony katody. Warstwa polimeru nie zawiera tlenu, a tym samym ryzyko zapłonu przy przeciążeniu jest praktycznie wyeliminowane. W rezultacie polimerowe kondensatory tantalowe pozwalają na uzyskanie większej niezawodności. Ta technologia pozwala również na uzyskanie podwyższonego napięcia znamionowego (aż do 125 V!), co sprawia, że kondensatory tantalowe polimerowe bez trudu poradzą sobie w aplikacjach pracujących przy napięciu do 100 V, a ze względu na dużą pojemność przy jednocześnie bardzo małych wymiarach można wykonać komponenty o bardzo dużej pojemności (do 1500  $\mu\text{F}$ ), stosując typowe, znormalizowane obudowy, co jest obecnie możliwe jedynie w kondensatorach ceramicznych. Dodatkowo, zastosowanie polimerów eliminuje efekt piezoelektryczny i podatność na pękanie.



Producenci oferują zróżnicowane rodzaje kondensatorów tantalowych, optymalizowane pod kątem aplikacji docelowej. Różne serie produkcyjne są w różny sposób specjalizowane, na przykład pod kątem zmniejszenia ESR, miniaturowych wymiarów obudowy, uzyskania podwyższonej niezawodności (serie militarne, motoryzacyjne czy medyczne), zmniejszenia prądu upływu w aplikacjach zasilanych z baterii lub uzyskania odporności na podwyższoną temperaturę. Kondensatory z obniżonym ESR zapewniają większą sprawność w urządzeniach pracujących impulsowo oraz lepsze filtrowanie zaburzeń zasilania.

Materiał katody i proces jego formowania ma istotny wpływ na wielkość ESR. Jak wspomniano, znaczne zmniejszenie parametru ESR osiągnięto przez zastąpienie  $\text{MnO}_2$  przewodzącym polimerem. Dla dalszej poprawy tego parametru zastąpiono miedzią stop żelazo-niklowy (alloy 42) służący do wytwarzania metalowej ramki wyprowadzeniowej. Przewodność elektryczna miedzi jest około 100-krotnie wyższa od przewodności alloy 42 i dzięki temu, na przykład, ESR tantalowo-polimerowego kondensatora firmy Vishay 100  $\mu\text{F}$  6,3 V w obudowie „A” (EIA 3216) z tradycyjną ramką wyprowadzeniową wynosi 70 m $\Omega$  przy 25°C i 100 kHz, a z ramką miedzianą, przy zachowaniu tych samych parametrów otoczenia, około 40 m $\Omega$ .

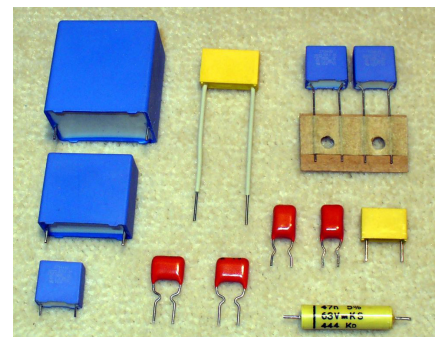
O przewodzie polimerowych kondensatorów tantalowych decyduje też ich żywotność – jest ona niemal nieograniczona. W przeciwieństwie do aluminiowych kondensatorów elektrolitycznych, składają się one wyłącznie z ciał stałych, dzięki czemu zachowują swoje właściwości przez cały okres eksploatacji. W polimerowych kondensatorach tantalowych nie ma praktycznie żadnych ograniczeń czasu eksploatacji wynikających ze stosowanej technologii, a na trwałość samych kondensatorów mają wpływ temperatura otoczenia, rezystancja szeregową i straty mocy występujące w kondensatorze. Dzięki swoim parametrom niektóre z polimerowych kondensatorów tantalowych mają dopuszczenie AEC-Q200.

Przy stosowaniu typowych kondensatorów elektrolitycznych lub tantalowych zwykle kilka z nich łączy się równolegle w celu zmniejszenia ESR. Polimerowe kondensatory tantalowe dają możliwość osiągnięcia pożądanej wartości już przy zastosowaniu tylko jednego komponentu. Dzięki temu i w zależności od wymaganych parametrów aplikacji można wykonać urządzenie o mniejszych wymiarach oraz zmniejszyć liczbę elementów wchodzących w jego skład.

### Kondensatory foliowe

Technologia wytwarzania kondensatorów foliowych również zmieniła się dzięki opracowaniu nowych materiałów. Zmniejszyły się wymiary kondensatorów, znacznej poprawie uległy parametry. Jedynie zastosowanie pozostało nadal takie same/

Kondensatory foliowe, metalizowane zwykle stosuje się w funkcji zabezpieczenia



przed zaburzeniami przewodzonymi i do filtrowania napięcia zasilania komponentów półprzewodnikowych, zasilanych napięciem stałym. Zwykle kondensatory „X2” dla sieci zasilającej są stosowane w filtrach urządzeń zasilanych bezpośrednio z sieci energetycznej. Zapewniają wiele korzyści, między innymi mają mały współczynnik rozproszenia Df, który w niewielkim stopniu zależy od temperatury i częstotliwości.

Coraz mniejsze wymiary kondensatorów foliowych powodują, że ulegają one szybszemu starzeniu, które objawia się zmniejszaniem się pojemności. Główną przyczyną jest łuk elektryczny (efekt korony – jonizowanie wewnętrzne powodujące parowanie powłoki metalicznej. Dodatkowymi czynnikami obniżającymi niezawodność są podwyższona temperatura oraz wilgotność.

Chociaż jedynym skutkiem jest zmniejszenie skuteczności filtrowania w typowych obwodach „X2” (kondensator włączony równolegle z zaciskami sieciowymi), to jeśli kondensator będzie stosowany w coraz bardziej popularnym filtrze szeregowym, to przez przerwę w obwodzie zasilania całe urządzenie ulegnie uszkodzeniu.

Producenci kondensatorów dobrze wiedzą o wspomnianym ryzyku i oferują kondensatory foliowe, w których nie występuje efekt korony. Mają one specjalną budowę zapobiegającą powstawaniu łuku elektrycznego i są zbudowane z materiałów o podwyższonej trwałości. Dodatkowo, takie kondensatory mogą zawierać wbudowane obwody szeregowo RC, co pozwala na uniknięcie jonizacji i uzyskanie podwyższonej niezawodności.

### Kondensatory elektrolityczne

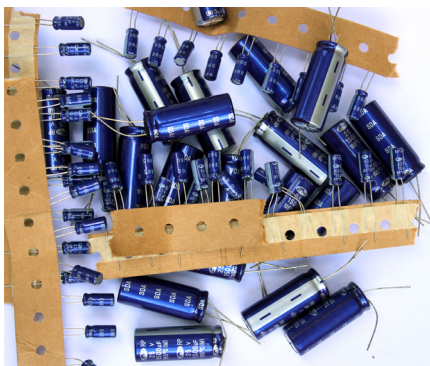
Do niedawna kondensatory elektrolityczne były jedynymi o pojemności wystarczającej do zastosowania w układach zasilania.

## 25 lat minęło...



Trzeba pamiętać o tym, że ćwierć wieku temu ogromną popularnością cieszyły się przede wszystkim zasilacze wykonywane na bazie transformatorów sieciowych, które dziś są raczej rzadko spotykane – zostały wyparte przez przetwornice impulsowe. Głównym elementem zasilacza transformatorowego są mostek prostowniczy i kondensator filtrujący o dużej pojemności, zależnej od poboru prądu. Typowo, w takich zasilaczach były stosowane kondensatory o pojemności od 1000 do 10000  $\mu\text{F}$ . Dziś znaleźć aż tak dużą pojemność w zasilaczu jest naprawdę rzadkością. Pamiętam, że dawniej awarie kondensatorów elektrolitycznych były częstą przyczyną uszkodzenia urządzeń, a dziś... No cóż, prawie się nie zdarzają. Owszem, istnieją urządzenia, w których tzw. elektrolity pracują w ekstremalnych warunkach, na granicy akceptowalnych warunków pracy i tam zdarzają się ich uszkodzenia, ale rzadko „elektrolity” są przyczyną uszkodzenia sprzętu popularnego użytku.

Przetwornice DC/DC oraz postępująca miniaturyzacja urządzeń elektronicznych postawiły nowe wymagania technologii kondensatorów elektrolitycznych. Pierwszym



z nich jest możliwe mała rezystancja ESR, a drugim podwyższona temperatura pracy. Współczesne kondensatory elektrolityczne nie dosyć, że mają mniejsze wymiary, to jeszcze mogą być użytkowane w temperaturze rzędu 100°C. Istnieją również serie, które wytrzymują nawet 150°C. Dlatego warto stosować nowe typy kondensatorów elektrolitycznych, które nie tracą parametrów użytkowych w dłuższym okresie czasu i wytrzymują podwyższoną temperaturę. Oznaczają się one nie tylko dłuższym okresem eksploatacji (do 20 tys. godzin w temperaturze 105°C), ale również są tańsze w zakupie.

W kondensatorze elektrolitycznym okładki różnią się od siebie. Jedną z nich jest elektrodą metalową – zwykle aluminiową, a druga elektrolitową. Warstwa dielektryka jest tworzona po przyłożeniu napięcia – w kondensatorze aluminiowym jest to tlenek aluminium. Jak nam dobrze wiadomo z lekcji fizyki, podczas zjawiska elektrolizy na anodzie wydzielają się inne substancje, niż na katodzie. Dlatego dla kondensatora elektrolitycznego istotna jest polaryzacja napięcia na okładkach.

A na koniec, nie sposób nie zauważyć, nowego członka rodziny kondensatorów elektrolitycznych (aczkolwiek są one też dostępne w technologii MLCC) tj. superkondensatora. Na początku lat 50 XX wieku inżynierowie spółki General Electric rozpoczęli eksperymenty wykorzystując elektrody zbudowane z porowatego węgla aktywnego dla ogniw paliwowych oraz baterii elektrycznych. Węgiel aktywny jest przewodnikiem elektrycznym, który charakteryzuje się porowatą, „gąbczastą” strukturą z wysoce rozwiniętą powierzchnią właściwą. W roku 1957 H. Becker rozwinął „niskonapięciowe elektrolityczne kondensatory z elektrodami porowato-węglowymi”. Przypuszczał, że energia była w nich gromadzona jako wsad w porach węglowych, podobnie jak ma to miejsce w wytrawionej folii kondensatorów elektrolitycznych. Mechanizm podwójnej warstwy nie był w tym czasie znany, więc Becker stwierdził: „Nie jest do końca wiadomo co dokładnie dzieje się w komponentach użytych do gromadzenia energii, ale prowadzi to do ogromnie dużej pojemności”.

W 1966 roku badacze z Standard Oil of Ohio (SOHIO) opracowali inną wersję komponentu zwaną jako „apar do magazynowania



energii elektrycznej”, podczas pracy nad eksperymentalnym projektem ogniwa paliwowego. Natura elektrochemicznego gromadzenia energii nie została opisana w patencie.

Wczesne kondensatory elektrochemiczne składały się z dwóch aluminiowych folii pokrytych węglem aktywnym, będącymi elektrodami nasączonymi elektrolitem i oddzielonych cienką warstwą porowatego izolatora. Ten model zapewniał kondensatorowi pojemność na poziomie 1 farada, a więc znacząco większą niż kondensatory elektrolityczne o tych samych wymiarach. Ta podstawowa konstrukcja jest podstawą wielkości elektrolitycznych kondensatorów.

Superkondensatory są używane w zastępstwie baterii podtrzymujących zasilanie pamięci, pracę zegara RTC itp. Charakteryzują się bardzo dużą pojemnością – powyżej 0,2 F i nawet aż do kilkuset faradów – i stosunkowo małym napięciem przebiecia – zwykle około 2,5 V. Są one chętnie stosowane ze względu na bardzo długi czas życia. Ich elektrody nie ulegają degradacji nawet po wielu tysiącach cykli, jak ma to miejsce w wypadku akumulatorów. Ponadto, akumulator, niezależnie od typu, ma ograniczoną żywotność ponieważ gromadzenie w nim energii jest ze zmianami chemicznymi elektrod, co powoduje ich degradację. Z technologią superkondensatorów są związane duże nadzieje. Niekiedy można spotkać się z opinią, że w przyszłości te kondensatory mogą zupełnie zastąpić akumulatory.

Jacek Bogusz, EP

Bibliografia:

- <http://bit.ly/2QhOEFZ>
- <http://bit.ly/2NO8ADX>
- <http://bit.ly/2Qj4JLX>
- <http://bit.ly/2xYMYtB>
- <http://bit.ly/2ImN1nS>