

# KONDENSATORY część 1

Ostatnio zajmowaliśmy się rezystorami, dziś porozmawiamy o kondensatorach.

Czy pamiętasz stare, czarno-białe telewizory jak choćby Belweder, Koral, Tosca czy Wisła? Czy zdarzyło ci się może spotkać w nich rozwijające się kondensatory?

Młodszy czytelnik trzeba wyjaśnić, że w tamtych zamierzchłych czasach królowały kondensatory w postaci zwiniętej wstęgi folii aluminiowej i impregnowanego papieru, klejone czymś podobnym z wyglądu do krochmalu. Stąd zresztą nazywane były potocznie kartoflakami. Te majstersztyki ówczesnego przemysłu elektrotechnicznego oprócz cech właściwych kondensatorom miały przedziwną skłonność do stopniowego rozwijania się. Najprostszą formą "naprawy" było obcinanie odwiniętych zwojów, żeby metalowa folia nie spowodowała zwarcia. Cała sprawa jest tym bardziej intrygująca, ponieważ znana była opinia, iż jeśli w starym, czarno-białym "ruskim" telewizorze zaczynają rozwijać się kondensatory, to zaczyna on lepiej odbierać. Z czasem jednak zaprzestano produkcji takich "kartoflaków" i niestety od tej pory nikt nie wiedział już co zrobić, żeby poprawić odbiór w starych radzieckich telewizorach.

Tyle anegdoty wystarczy. Nie będę ci opowiadał zabawnych perypeti i z wyschniętymi elektrolitami, masz się przecieć dziś w końcu czegoś konkretnego nauczyć.

Jeśli wkładano ci do głowy mądre rozważania o wyższości kondensatorów próżniowych nad powietrznymi, olejowych nad suchymi czy mikowych nad papierowymi, spróbuj o tym wszystkim szybko i skutecznie... zapomnieć.

Ja też chodziłem do szkoły; na zajęciach z materiałoznawstwa i podzespołów uczone mnie mądrych klasyfikacji, potem okazało się, że prawie wszystkie wiadomości są delikatnie mówiąc nieświeże i nieprzydatne w praktyce.

Dziś kondensatorów papierowych, mikowych, szklanych, olejowych w typowym sprzęcie nie spotkasz. Masz natomiast do dyspozycji trzy główne grupy kondensatorów:

- elektrolityczne



- ceramiczne
- z tworzyw sztucznych.

Na początek zajmiesz się pierwszą grupą.

## Kondensatory elektrolityczne

Przyznam ci się, że choć ze wspomnianych przedmiotów miałem oceny bardzo dobre, bardzo długo nie rozumiałem jak naprawdę zbudowane są i działają kondensatory elektrolityczne. Dopiero lektura oryginalnych katalogów firmowych rozjaśniła mi obraz całej sprawy. Śmiem więc przypuszczać, iż ty też możesz mieć podobne kłopoty, pozwól więc że opowiem ci trochę o budowie kondensatorów. Nie jest to jakaś sucha teoria, szybko przekonasz się o praktycznej przydatności takiej wiedzy. Nie będzie to także suchy wykład, ponieważ zaczniesz od rozebrania kilku mokrych "elektrolitów". Serdecznie cię zachęcam, żebyś rzeczywiście przeprowadził zalecane eksperymenty, a nie tylko poprzestał na przeczytaniu tego artykułu. Jedną taką lekcją praktyczną prawdopodobnie da ci więcej niż teoria wykładana w szkolnym roku.

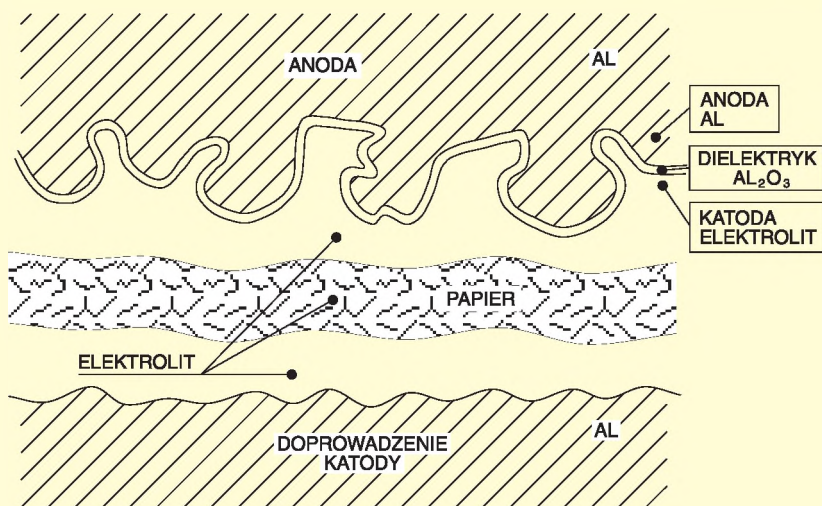
Zebrałem dla ciebie w zwięzłej postaci podstawowe wiadomości o dostępnych kondensatorach i ich parametrach, ale stosowne

ramki podam ci w jednym z następnych odcinków. A tymczasem opowiem ci o popularnych "elektrolitach".

## Kondensatory elektrolityczne aluminiowe

Dawno już niczego nie zepsuteś, więc możesz na dobry początek rozebrać kilka typowych "elektrolitów", ale pod warunkiem, że zachowasz ostrożność, nie skaleczysz się przy otwieraniu obudowy i nie poplamisz rąk ani otoczenia elektrolitem. W zasadzie elektrolit nie powinien być żrący ani trujący, ale w nowszych kondensatorach mogą występować "wynalazki" o nie wiadomych właściwościach. Na wszelki wypadek na czas rozwijania zwiłki załóż gumowe rękawice.

Jeśli już oddzieliłeś wilgotny papier, przyjrzyj się dokładnie obu aluminiowym elektrodom. Czy mają jednakowy wygląd? W małych kondensatorach zapewne wyglądają tak samo. Jednak w starszych krajowych elektrolitach o większych wymiarach folia dodatnia - anoda jest bardziej matowa i szara niż folia ujemna. Jak zauważyłeś folia anodowa za-



**Rys. 1 Przekrój kondensatora aluminiowego mokrego**

wsze jest matowa. Pod mikroskopem okazuje się, iż jest bardzo chropowata, przypomina trochę wyglądem skalistą pustynię. Dzięki temu rzeczywista powierzchnia dodatniej okładziny - anody jest znacznie większa niż wynikałoby to z wymiarów folii. Tak znaczne powiększenie powierzchni (rozwiniecie) uzyskuje się przez chemiczne trawienie folii.

Wiadomo, że według definicji każdy kondensator składa się z dwóch przewodników (okładek) przedzielonych warstwą dielektryka (izolatora). Wydaje się, że okładki mamy. Co jednak jest dielektrykiem w naszych kondensatorach? Czy papier? Nie! Przecież jest on nasączony przewodzącym elektrolitem! No więc co?

Czy wiesz, że aluminium w obecności tlenu natychmiast pokrywa się cieniutką warstwą nieprzewodzącego tlenku ( $Al_2O_3$ ). Co najważniejsze, tlenek ten jest znakomitym izolatorem i ma dużą wartość stałej dielektrycznej. Wyobraź sobie, że warstwa tlenku glinu o grubości  $1\mu m$  ( $1/1000$  mm) wytrzymałoby bez przebicia napięcie rzędu 700V!

Masz już kilka ważnych informacji: w kondensatorach elektrolitycznych izolatorem jest warstewka tlenku glinu o grubości znacznie mniejszej niż  $1\mu m$ , a dla zwiększenia po-

wierzchni czynnej, rozwija się powierzchnię folii anodowej w procesie trawienia chemicznego.

Jakie znaczenie ma w tym elektrolit? Otóż tak naprawdę to elektrolit jest elektrodą ujemną, natomiast drugi pasek folii aluminiowej, potocznie zwany katodą, w rzeczywistości jest tylko doprowadzeniem prądu do tej prawdziwej, płynnej katody. Ponadto tylko zastosowanie jakiegoś "wścibskiego" elektrolitu, który wciśnie się w każdą dziurę, pozwala wykorzystać zalety rozwiniętej powierzchni anody. A porowaty papier pełni rolę zbiornika ciekłego elektrolitu oraz zabezpiecza przed bezpośrednim zetknięciem obu metalowych elektrod, co mogłoby spowodować uszkodzenie delikatnej warstwy tlenku i zwarcie. Uproszczony przekrój jednej warstwy kondensatora elektrolitycznego mokrego możesz obejrzeć na **rysunku 1**.

Teraz już wiesz, na czym polega tajemnica dużej pojemności i małych wymiarów kondensatorów elektrolitycznych. Decydujące znaczenie mają:

- duża, trawiona powierzchnia,
- bardzo cienka warstwa dielektryka ( $Al_2O_3$ )
- znaczna stała dielektryczna  $Al_2O_3$ .

Pozostaje jednak jeszcze istotny problem: dlaczego typowe kondensatory elektrolityczne muszą być polaryzowane napięciem stałym?

Otóż "winny" jest elektrolit. Zanim konkretnie odpowiem na to pytanie, muszę ci przypomnieć pewne podstawowe wiadomości.

Jak pewnie pamiętasz, w elektrolitach nośnikami ładunku elektrycznego są jony. W elektrolicie naszych kondensatorów jony

ujemne zawierają tlen, dodatkowo wodór. Nie powiedziałem ci też dotychczas jak wytwarza się warstewkę tlenku glinu. Otóż naturalna warstewka tlenku jest nadzwyczaj cienka, rzędu  $1...2nm$  i dla uzyskania grubszych warstw stosuje się metodę elektrochemiczną polegającą ogólnie rzecz biorąc na podłączeniu do kondensatora w trakcie produkcji źródła napięcia stałego. W obwodzie biegun dodatni źródła-anoda kondensatora-elektrolit-biegun ujemny popłynie prąd stały. Ponieważ w elektrolicie przepływ prądu polega na przemieszczaniu jonów, a jony ujemne zawierają tlen, więc w tym procesie zwanym formowaniem, na powierzchni anody wytwarza się warstwa tlenku glinu, a z drugiej strony jako produkt uboczny powstaje gazowy wodór. Powstająca stopniowo warstwa izolującego tlenku coraz bardziej zmniejsza wartość płynącego prądu, a po pewnym czasie prąd stabilizuje się na nieznacznej wartości i proces tworzenia tlenku ustaje. Zwróć uwagę, że grubość tak powstałej warstwy tlenku zależy od przyłożonego napięcia - tzw. napięcia formowania, które zawsze jest większe o 20...100% od założonego nominalnego napięcia kondensatora. Dlaczego napięcie formowania powinno być większe od napięcia

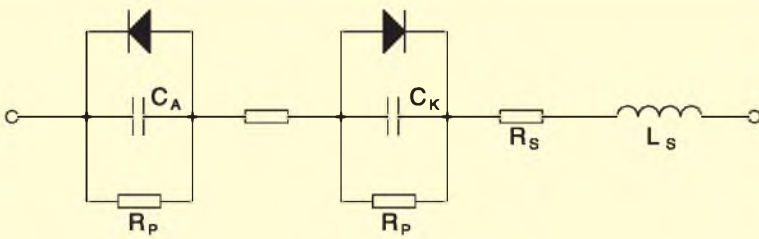
### Czy "elektrolity" mogą być polaryzowane napięciem stałym o odwrotnej biegunowości?

Nie jest do końca prawdą, że kondensatory elektrolityczne nie mogą pracować przy odwrotnej biegunowości przyłożonego napięcia. Jak wynika z zamieszczonych rozważań mogą pracować przy napięciach, które nie spowodują formowania folii katodowej (i nieodłącznego gazowania). Dlatego niektóre katalogi podają dopuszczalne stałe napięcie wsteczne równe 2V, jednak bezpieczną wartością wydaje się napięcie 1V. Napięcie to wynika z grubości istniejącej, naturalnej warstwy tlenku na powierzchni folii katodowej. W takiej sytuacji należy się jednak liczyć ze zwiększonymi prądami upływu.

pracy? Ponieważ w czasie pracy przez kondensator praktycznie nie powinien płynąć prąd stały (tzw. prąd upływu).

Jeśli w przyszłości "wgrzyszesz się" w katalogi, to znajdziesz wykonania oznaczone LL (dawniej typ 1) oraz GP (dawniej typ 2). LL jest skrótem od Long Life (długowieczny), a GP - General Purpose (ogólnego przeznaczenia).

**Może słyszałeś**, że kondensatory mogą się przeformować na inne napięcie - jest to częściowo prawda. Kondensator pozostawiony pod napięciem nieco większym od nominalnego przeformuje się na to napięcie... pod warunkiem, że wcześniej nie wybuchnie. Nie polecam ci więc tej metody "ulepszania" kondensatorów.



Rys 2 Schemat kondensatora elektrolitycznego

czenia). Kondensatory LL są formowane wyższym napięciem niż kondensatory GP o takim samym napięciu nominalnym. Wyższe napięcie formowania daje grubszą warstwę tlenku, a w konsekwencji mniejszy prąd upływu i mniejsze prawdopodobieństwo uszkodzenia. Grubsza warstwa dielektryka daje jednak mniejszą pojemność, więc kondensatory LL mogą mieć większe wymiary niż kondensatory o takich samych nominalach w wykonaniu zwykłym.

Z podanych informacji możesz wyciągnąć kilka ważnych wniosków.

Po pierwsze, chyba już rozumiesz, że uszkodzenie kondensatora podwyższonym napięciem nie jest spowodowane przebiciem warstwy tlenku, tylko powtórny rozpoczęciem procesu formowania, związanego nieodłącznie z wydzielaniem gazu, który w końcu powoduje eksplozję kondensatora.

Może też miałeś do czynienia z "elektrolitami", które... wyschły. Znowu wypadaloby przypomnieć wyroby dawnego ZSRR, ale spuśćmy na tę sprawę zasłonę milczenia. Jeśli obudowa kondensatora nie będzie szczelna, podwyższone ciśnienie związane z normalnym gazowaniem podczas pracy może spowodować utratę elektrolitu i z kon-

densatora elektrolitycznego zrobi się stopniowo dobry kondensator powietrzny, tyle że o pojemności kilkudziesięciu... pikofaradów. Dlatego niech nie przychodzi ci do głowy, żeby "odpowietrzyć elektrolita" przez wywiercenie w obudowie maleńkiej dziurki.

Czy rozumiesz teraz, dlaczego kondensatory elektrolityczne z ciekłym elektrolitem składowane przez dłuższy czas bez napięcia mają znaczny prąd upływu, który po niedługim czasie pozostawiania pod napięciem zmniejsza się do pomijalnej wartości? Po prostu podczas składowania cieniuteńka warstwa tlenku ulega drobnym uszkodzeniom, które później po podaniu napięcia są samoczynnie reperowane przez jony ujemne dążące do anody.

Dlatego w układach, gdzie wymagana jest niezawodność i pewność działania, kondensatory elektrolityczne muszą pozostawać pod napięciem, wtedy w sposób ciągły następuje proces regeneracji, a upływność i pojemność mieszczą się w przewidzianych granicach.

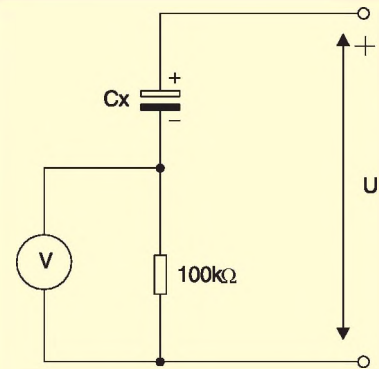
Pomału dochodzimy wreszcie do podsumowania odpowiedzi na pytanie dlaczego omawiane kondensatory powinny być spolaryzowane napięciem stałym. Jak już wiesz, jony ujemne dochodzące do anody powodują powstawanie tlenku glinu. Jednak jeśli odwróci się biegunowość przyłożonego napięcia stałego, to nasza aluminiowa anoda staje się katodą. Wędrują teraz do niej lekkie jony dodatnie, które bez większych kłopotów przedostają się przez warstwę tlenku, a po dołączeniu elektronu wydziela się gazowy wodór. Płynący prąd stały może mieć dużą wartość, bowiem warstwa tlenku glinu nie jest znaczącą przeszkodą dla wścibskich jonów dodatnich, a wydzielający się gazowy wodór dodatkowo niszczy istniejącą już warstwę tlenku. Znowu kondensator ulegnie uszkodzeniu wskutek eksplozji związanej z wydzielaniem gazu. Zauważ, że w kondensatorze elektrolitycznym występuje zjawisko jednokierunkowego przewodzenia prądu, podobnie jak w diodzie. Dlatego na schematach zastępczych kondensatorów elektrolitycznych poja-

wia się symbol diody.

Ktoś uważny zauważy jednak, że przecież po odwróceniu biegunowości przyłożonego napięcia rolę anody pełnić będzie druga aluminiowa elektroda. Rzeczywiście na to wygląda. Czy to nie zmienia sytuacji? Nie, ponieważ ta druga elektroda pełniąca wcześniej rolę doprowadzenia do płynnej katody nie była uformowana i pokryta jest jedynie naturalną cieniutką warstwą tlenku (stąd jasna, błyszcząca folia katodowa w niektórych kondensatorach). Owszem, przy przepływie "odwrotnego" prądu zacznie na niej narastać warstwa izolacyjnego tlenku, zanim jednak zdąży się ona utworzyć i ograniczyć prąd, kondensator eksploduje!

A jeśli w procesie produkcji byłyby uformowane obie folie aluminiowe?

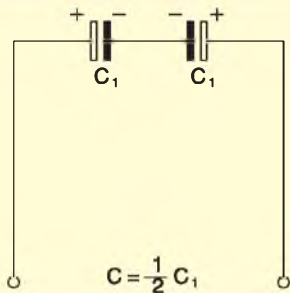
Genialna myśl! Wtedy przy danej biegunowości jedna z elektrod pełniłaby rolę anody, a po zmianie biegunowości - druga! Może



Rys. 3 Układ pomiarowy prądu upływu

cię zaskoczę - takie kondensatory są produkowane - są to kondensatory elektrolityczne bipolarnie, zwane też niebiegunowymi. Mogą one pracować bez ograniczeń przy napięciu zmiennym bez składowej stałej. W kraju kondensatory takie z oznaczeniami BPT, BPU i BPE były produkowane (a może jeszcze są) przez filię Elwy w Kołobrzegu.

Dlaczego więc nasze popularne "elektrolity" nie są wykonywane w ten sposób? Powody są przynajmniej dwa: kondensatory niebiegunowe mają zdecydowanie większy prąd upływu, a ponadto przy danych wymiarach ich pojemność jest prawie dwukrotnie mniejsza niż odpowiednich kondensatorów bipolarnych. Wynika to z szeregowego połączenia pojemności obu okładek. Pokazuje to **rysunek 2**. Co prawda w kondensatorach biegunowych pojemność jest tak samo wypadkową wspomnianych dwóch pojemności.



Czy można samodzielnie zrobić kondensator niebiegunowy?

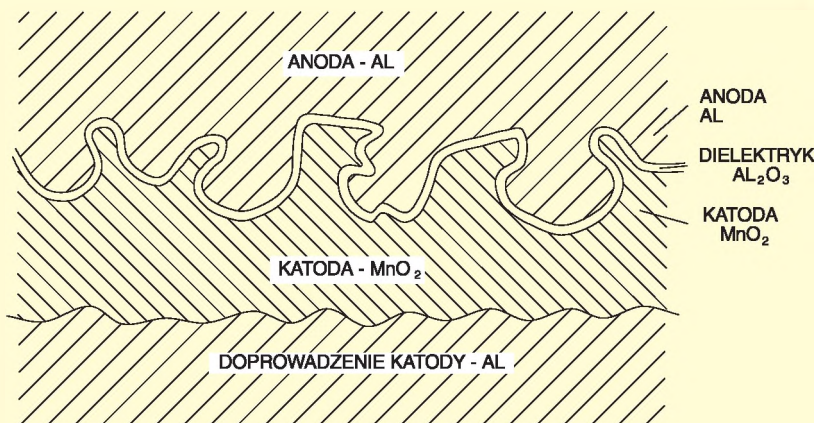
Tak! I to w prosty sposób przez przeciwobne połączenie szeregowo dwóch jednakowych kondensatorów biegunowych (katoda do katody). Pojemność takiego zestawu jest równa połowie pojemności jednego kondensatora.

Jednak z uwagi na znikomą grubość warstwy tlenku na ujemnej okładce (a tym samym dużą pojemność), decydująca jest pojemność związana z anodą.

A teraz pora na praktyczne sprawdzenie przeczytanych wiadomości. Proszę cię jednak, nie sprawdzaj jak wybuchają kondensatory - wybuchają z hukiem, dymem i... nazwijmy to zapachem. Wiem, bo parę razy w życiu odwrotnie wluwowałem elektrolita w płytkę. A znam też paru gości, którzy mówią, że mieli szczęście, bo rozerwana obudowa kondensatora nie trafiła ich w oko, tylko przeleciała obok ucha.

Proszę cię jednak, sprawdź prądy upływu długo nieużywanych kondensatorów o różnych nominalach przy pierwszym włączeniu i po kilku minutach pozostawiania pod napięciem. Sprawdź też prądy upływu dobrze zafornowanych kondensatorów aluminiowych o nominalach, powiedzmy 10, 100 i 1000µF przy różnych napięciach polaryzujących. Nie przekrocz tylko ich napięcia nominalnego. Będziesz miał wyobrażenie jakiego rzędu mogą być prądy upływu, pomoże ci to zrozumieć dlaczego trzeba być ostrożnym przy stosowaniu aluminiowych "elektrolitów" w układach czasowych zawierających rezystory o nominalach rzędu megaomów i dlaczego w układach wymagających dużej niezawodności stale powinny one pozostawać pod napięciem.

Rzadziej spotykaną odmianą są kondensatory aluminiowe stałe, w firmowych katalogach oznaczane solid aluminium capacitors. Różnią się one od popularnych mokrych materiałem katody. Elektroda dodatnią - anodą - nadal jest trawiona folia aluminiowa, a dielektrykiem - tlenek glinu ( $Al_2O_3$ ). Tym razem katodę stanowi dwutlenek manganu ( $MnO_2$ ). Pokazuje to rysunek.

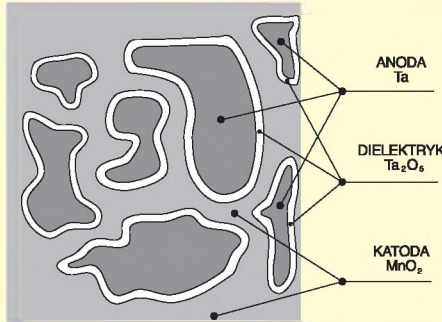


Ponieważ nie ma tu ciekłego elektrolitu, nie ma też jonów w roli nośników prądu. Teoretycznie więc kondensatory takie mogłyby pracować przy dowolnej biegunowości napięcia stałego. Jednak ze względu na obecność choćby śladów wilgoci i związane z tym ryzyko wystąpienia przewodnictwa jonowego niszczącego dielektryk zaleca się polaryzowanie tych kondensatorów odpowiednim napięciem stałym.

## Kondensatory tantalowe

W tych kondensatorach anoda wykonana jest nie z aluminium, tylko ze spiekanego proszku tantalowego. W wyniku spiekania otrzymuje się strukturę porowatą, przypominającą nieco gąbkę - uzyskuje się w ten sposób w niewielkiej objętości bardzo dużą powierzchnię. Następnie, analogicznie jak przy kondensatorach aluminiowych, metodami elektrochemicznymi wytwarza się na powierzchni izolacyjną warstwę pięciotlenku tantalu ( $Ta_2O_5$ ), która podobnie jak  $Al_2O_3$  ma bardzo dobre właściwości dielektryczne. Wreszcie porowatą anodę wypełnia się elektrolitem. W popularnych "perełkach" jest to dwutlenek manganu  $MnO_2$ . Mniej popularne są kondensatory z elektrolitem ciekłym, a właściwie żelowym. W kraju były, a może nawet są produkowane, kondensatory żelowe typu ETO przeznaczone do celów profesjonalnych. Mimo dobrych parametrów, najlepszych z kondensatorów elektrolitycznych, kondensatory tantalowe z ciekłym elektrolitem nie są popularne.

Najczęściej spotyka się "tantale suche". Ich schematyczny przekrój pokazano na rysunku.



Należy pamiętać, że struktura jest trójwymiarowa i wszystkie elementy anody (tantal) narysowane oddzielnie, w rzeczywistości są ze sobą elektrycznie połączone.

Za sprawą dwutlenku manganu, który jest rodzajem półprzewodnika, kondensatory tantalowe mają własności biegunowe. Powinny więc być spolaryzowane napięciem stałym o określonej biegunowości, jednak w niektórych katalogach można znaleźć informację, że dopuszczalna jest polaryzacja napięciem przeciwnym o wartości 5...15% napięcia nominalnego.

Pięciotlenek tantalu jest bardzo odporny na uszkodzenia, dlatego upływność kondensatorów tantalowych jest mniejsza niż aluminiowych, a prądy upływu praktycznie nie zmieniają się nawet po kilkuletnim okresie składowania bez napięcia. Długo nieużywanych "tantali" nie trzeba więc formować, zresztą nie ma to sensu, bo bez elektrolitu zawierającego jony proces formowania nie występuje.

Sprawdź też parametry posiadanych "tantali". Czy zauważyłeś różnice?

Eksperymenty możesz przeprowadzić w układzie z **rysunku 3** używając cyfrowego voltomierza. Prąd obliczysz dzieląc zmierzone napięcie przez rezystancję rezystora.

Zdobyłeś oto sporo ważnego materiału o "elektrolitach". Zanim zajmiesz się czymś innym zapytaj sam siebie, czy wszystko rozumiałeś. Jeśli nie, przeczytaj materiał jeszcze raz i postaraj się poukładać pod czaszką dotychczasowe i nowe informacje.

Piotr Górecki

Ostatnio namawiałem cię do zepsucia kilku kondensatorów elektrolitycznych. Dziś będę ci wkładał do głowy wiadomości dotyczące najważniejszych parametrów kondensatorów. Nie zrażaj się, że będzie mało praktyki - podane informacje są naprawdę bardzo ważne, a pomiarami (i psuciem) zajmiemy się za miesiąc.



Czy zdarzyło ci się kiedyś, że sprzedawca powiedział: z tego nominalu mam tylko styrofleksy i ceramiki N750, albo może: z ceramików 1nF w tej chwili mam tylko ferroelektryczne. Kupić, czy nie kupić?

Jeśli kiedykolwiek miałeś kłopoty z odpowiedzią na takie niemalże szeks-pirowskie pytanie - przeczytaj poniższy materiał. Jeśli takich dylematów nie miałeś, bo nie widziałeś problemu - tym bardziej przeczytaj!

Dziś chcę ci uświadomić, że wyobrażenie, iż w kondensatorach liczy się tylko pojemność, trąci dziecięcą ufną naiwnością.

Często się zdarza, że spośród kilku różnego typu kondensatorów o takiej samej pojemności tylko jeden naprawdę kwalifikuje się do danego zastosowania. Niektóre zupełnie się nie nadają i układ z nimi albo w ogóle nie będzie pracował, albo uzyskane wyniki będą dalekie od spodziewanych.

Czy to dobrze, czy źle, że producenci podzespołów tak tu namieszali? Czy nie lepiej byłoby mieć po prostu kondensatory nadające się do każdego układu?

Cóż, jest jak jest i jeśli chcesz być prawdziwym elektronikiem, musisz się orientować co w trawie piszczy.

## Rola dielektryka

Zacznijmy od podstaw. Każdy rzeczywisty kondensator składa się z przewodzących okładek i znajdującego się

między nimi dielektryka czyli izolatora. Powszechnie znane jest stwierdzenie, że przez kondensator może przepływać prąd zmienny. Takie sformułowanie, choć w zasadzie prawdziwe, może być jednak mylące. Albowiem przez dielektryk (izolator) żaden prąd nie płynie (!). Na okładkach kondensatora gromadzą się natomiast ładunki elektryczne. Jeśli jedna z okładek jest naładowana więcej lub mniej niż druga, to pomiędzy okładkami kondensatora występuje jakieś napięcie. Na razie mówimy o napięciu stałym. Jeśli występuje napięcie, to w dielektryku, między okładkami wytwarza się pole elek-

tryczne (też stałe). Jeśli teraz spróbujemy zmienić napięcie na okładkach kondensatora to... no właśnie, czy popłynie prąd?

Powiesz, że popłynie! I masz rację: żeby na kondensatorze zmieniło się napięcie musi popłynąć prąd. Ale czy prąd płynie przez dielektryk?

Nie! Zmieni się tylko ilość ładunku na okładkach kondensatora i natężenie pola elektrycznego między okładkami. Prąd, a właściwie nośniki ładunku, gromadzą się na okładkach kondensatora, ale nie przepływają przez izolator. Zmienia się natomiast natężenie pola elektrycznego w izolatorze. Dlatego mówimy, że kondensator ma-

gazuje energię w polu elektrycznym.

Tak więc to, co obserwujemy z zewnątrz jako przepływ prądu przez kondensator, jest w rzeczywistości zmianą ilości ładunku na okładkach i zmianą natężenia pola elektrycznego między nimi.

Czy to jest potrzebne do naszych rozważań?

Tak! Chcę ci bowiem uświadomić, że właściwości kondensatora zależą przede wszystkim od dielektryka.

Może ci się wydaje, że najważniejsza jest tu sprawa wytrzymałości dielektryka na przebicie. Oczywiście, jest to zagadnienie istotne, ale w swej naturze jasne, proste i nie warto się nim specjalnie zajmować. Po prostu, jeśli natężenie pola elektrycznego stanie się większe od pewnej wartości granicznej (różnej dla różnych dielektryków), to powstanie łuk elektryczny i przez dielektryk rzeczywiście popłynie prąd - mówimy, że nastąpi przebicie. Niektóre kondensatory (jednak co ważne - nie wszystkie), ulegają przy tym uszkodzeniu. Dlatego dla każdego kondensatora podane jest maksymalne dopuszczalne napięcie między jego okładkami.

W katalogach występuje kilka pokrewnych pojęć z tego zakresu; dla naszych celów wystarczy uproszczone stwierdzenie, że suma napięć stałych i zmiennych na zaciskach kondensatora w żadnym momencie nie powinna przekroczyć jego napięcia nominalnego. To wszystko!

*Czy prąd płynie przez dielektryk? Nie! Zmienia się tylko ilość ładunku na okładkach kondensatora i natężenie pola elektrycznego między okładkami.*

*Właściwości kondensatora zależą przede wszystkim od dielektryka.*

Powinieneś wiedzieć, że w rzeczywistości bardziej istotne są inne, subtelniejsze właściwości dielektryka. Zapewne znasz podstawowy wzór wyrażający pojemność kondensatora:

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d}$$

gdzie:  $\epsilon_0$  - stała dielektryczna próżni ( $8,8542 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$ )

$\epsilon_r$  - względna przenikalność dielektryka

S - pole powierzchni okładek

d - odległość pomiędzy okładkami (grubość dielektryka).

Wzór ten pokazuje, jakimi sposobami można osiągnąć potrzebną dużą pojemność:

- przez zwiększenie powierzchni okładki S (np. w "elektrolitach" stosuje się rozwijanie powierzchni przez trawienie)
- przez zmniejszenie grubości dielektryka d (trzeba jednak zastosować dielektryk o bardzo dużej wytrzymałości na przebicie, jak np.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  czy  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  stosowany w "elektrolitach")
- wreszcie przez zastosowanie dielektryka o dużej przenikalności względnej  $\epsilon_r$ .

Czy wiesz co to jest przenikalność elektryczna? Nie wiesz?

Nie szkodzi! Nie jest to ci specjalnie potrzebne. Ogólnie biorąc przenikalność elektryczna jest to wielkość fizyczna charakteryzująca własności dielektryka z punktu widzenia pola elektrycznego.

Choć nie musisz rozumieć szczegółów, wiedz, że właśnie we właściwościach dielektryka kryje się cały problem z parametrami i właściwościami kondensatorów.

Nie ma dielektryka idealnego. Próżnia i powietrze mają na przykład znakomite niektóre właściwości, ale niestety małą przenikalność ( $\epsilon_r = 1$ ). Inne materiały mają dużą przenikalność  $\epsilon_r$  rzędu dziesiątków tysięcy, ale za to małą wytrzymałość na przebicie. Jeszcze inne izolatory mają dobre właściwości elektryczne, ale występują duże trudności technologiczne ograniczające lub wykluczające ich praktyczne zastosowanie. I co chyba najgorsze, *przenikalność dielektryczna* większości interesujących nas materiałów *wcale nie jest stała*, zależy bowiem od częstotliwości, temperatury, wilgotności, a niekiedy nawet od natężenia pola elektrycznego.

Idealem byłby oczywiście kondensator próżniowy, ale jakie wymiary i ciężar

musiałby mieć kondensator próżniowy o pojemności 1 mikrofarada? Jeśli ci się chce, to policz wymaganą powierzchnię okładzin przy odległości  $d = 1 \text{mm}$ , czy nawet  $0,1 \text{mm}$ .

Tu przypomina mi się autentyczna sytuacja z czasów szkoły podstawowej, gdy matka kolegi słysząc, że syn potrzebuje do radia "opornik piętnaście kilo" zapytała: i ty, synku, to radio uniesiesz? Z opornikiem potrafimy sobie poradzić, ale z wykonaniem i przenoszeniem wspomnianego kondensatora mielibyśmy zapewne ogromne trudności.

Mamy więc pierwszą, przybliżoną odpowiedź, dlaczego kondensatory o takiej samej pojemności mogą znacznie różnić się właściwościami. Po prostu powszechnie stosuje się różne niedoskonale dielektryki.

Czy potrafisz wyobrazić sobie kondensator zawierający dielektryk, którego przenikalność  $\epsilon_r$  maleje ze wzrostem częstotliwości? Jest wiele takich kondensatorów! Może cię zaskoczę prostym pytaniem: jaka będzie *naprawdę* jego pojemność? Przecież pojemność będzie zależała od częstotliwości. Czy podaną pojemność nominalną, np. 1000pF nasz kondensator ma przy częstotliwości 1kHz, a może 100kHz, czy może 10MHz?

Zależność pojemności od częstotliwości to dopiero jedna, rzeczywiście ważna sprawa. Są jeszcze inne.

## Schemat zastępczy

Na **rysunku 1** znajdziesz typowe schematy zastępcze kondensatora stałego. Pewnie już gdzieś widziałeś takie rysunki. Czy dokładnie rozumiesz sens poszczególnych składników? Chcę ci możliwie prosto wytłumaczyć najważniejsze zasady i wnioski, bowiem kiedyś miałem zupełnie fałszywe wyobrażenie o ich znaczeniu, więc może i ciebie wprowadziły one w błąd.

Rozumiałem, oczywiście, że rzeczywisty kondensator to nie tylko pojemność, i w grę wchodzi także indukcyjność doprowadzeń i jakieś rezystancje. Wydawało mi się jednak, jak sugeruje rysunek, że  $R_p$  to rezystancja, którą można zmierzyć omomierzem. Tymczasem pomiar omomierzem (nawet precyzyjnym cyfrowym) wykazywał, że przez

kondensator foliowy czy ceramiczny prąd stały praktycznie nie płynie. Wydawało się, że rezystancja  $R_p$  w schemacie zastępczym jest ogromna i można ją bez zmużenia oka pominąć. I to był błąd!

Mierzyłem rezystancję dla prądu stałego. Nie jest to jednak rezystancja  $R_p$  z naszego schematu zastępczego, tylko rezystancja izolacji oznaczana w katalogach  $R_{iz}$  lub  $R_{is}$ ; jej wartość rzeczywiście wynosi dziesiątki i setki megaomów. (Czasem zamiast rezystancji izolacji podaje się stałą czasową C-R<sub>iz</sub> wynoszącą przynajmniej dziesiątki tysięcy sekund, czyli kilka godzin. Po takim czasie naładowany kondensator sam rozładuje się własnym prądem upływu.)

O co więc chodzi na rysunku 1? Schematy zastępcze dotyczą sytuacji przy *prądzie zmiennym!*

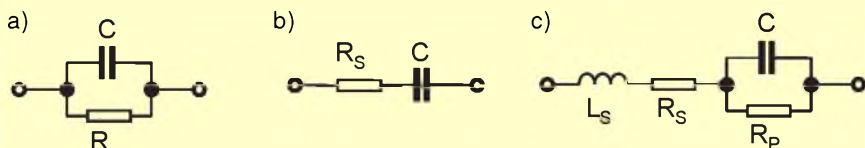
*Rezystancja zastępcza kondensatora reprezentuje przede wszystkim straty mocy w dielektryku.*

Tu musimy powrócić do właściwości dielektryka. Wszystkie dielektryki składają się z jakichś cząstek, atomów i molekuł (próżnia jest tu wyjątkiem, choć i w niej występuje zjawisko tworzenia wirtualnych cząstek i antycząstek). Te mikroskopowe składniki materii mają określone właściwości elektryczne, wynikające z istnienia ładunku elektrycznego i przestrzennego rozmieszczenia tego ładunku. Po przyłożeniu zewnętrznego pola elektrycznego w dielektryku następuje zjawisko polaryzacji, czyli kierunkowego uporządkowania cząsteczek substancji. Jeśli zmienia się natężenie i kierunek pola elektrycznego, to cząsteczki wielokrotnie się przebiegunowują. W rezultacie tego procesu traci się część energii elektrycznej zawartej w kondensatorze - zamienia się ona na ciepło. Pamiętaj jednak, że te straty nie występują w stanie statycznym, przy *prądzie* stałym, a jedynie przy *prądzie* zmiennym. Czy jednak są one na tyle duże, żeby o nich wspominać? Jak się okaże, strat tych w wielu układach nie można pominąć.

Jak jednak opisać takie straty?

Wiemy, że zamiana energii elektrycznej na ciepło następuje przede wszystkim w rezystorach. Dlatego słusznie możemy zaznaczyć na schemacie zastępczym *rezystancję reprezentującą straty w dielektryku*. Jest to właśnie nasza rezystancja  $R_p$  z rysunku 1!

Sciślej rzecz biorąc, rzeczywisty kondensator wykazuje jeszcze jakąś rezystancję doprowadzeń i samych okładek. Dlatego na dokładnym schemacie zastępczym na rysunku 1c obok  $R_p$  zaznaczono też rezystancję szeregową  $R_s$ . Stąd też indukcyjność  $L_s$ , na którą



Rys. 1. Schematy zastępcze kondensatora

składają się indukcyjność doprowadzeń i okładek.

Układ z rysunku 1a i 1c może wprowadzać pewne zamieszanie sugerując, że chodzi o rezystancję dla prądu stałego czyli rezystancję izolacji. Dlatego bezpieczniej jest wszystkie straty kondensatora przedstawić tak jak na rysunku 1b i mówić po prostu o szeregowej rezystancji (wszelkich) strat. Tak też się często robi. Przykładowo obok zwykłych "elektrolitów" spotkasz podobne (i znacznie droższe) wersje określane jako "low ESR". Otóż owe tajemnicze ESR to właśnie nasza zastępcza, szeregowo rezystancja strat - Equivalent Series Resistance.

Trzeba jednak cały czas pamiętać, że dla danego kondensatora taka zastępcza rezystancja strat nie ma stałej wartości i zależy między innymi od temperatury, częstotliwości, a niekiedy nawet przyłożonego napięcia.

Może zapytasz, dlaczego w katalogach zazwyczaj nie podaje się tej zastępczej rezystancji strat? Otóż podaje się, ale najczęściej w nieco oryginalnej postaci. Rezystancja ta ukryta jest w parametrze zwanym tangensem kąta strat. Dlaczego tangensem i jakiego kąta?

*Tangens kąta strat jest równy stosunkowi rezystancji ESR i reaktancji kondensatora.*

Jeśli zetknąłeś się w szkole z zagadnieniem liczb zespolonych wiesz, jak graficznie przedstawia się wypadkową impedancję (oporność zespoloną) szeregowego obwodu RC. Jeśli tego nie wiesz, nie trać ducha - sprawa nie jest beznadziejna. Jeśli będziesz chciał, napiszę ci kiedyś parę słów na temat liczb zespolonych - nie jest to wcale takie trudne jak się na ogół wydaje.

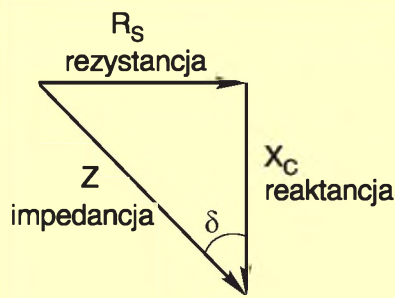
Jak by nie było, rozumiesz że na wypadkową oporność (impedancję) dla prądu zmiennego składa się oporność bierna (reaktancja), oraz nasza rezystancja ESR. Impedancja nie jest przy tym prostą, wyrażoną w omach sumą reaktancji i rezystancji ESR. Składniki dodaje się w sposób pokazany graficznie na **rysunku 2**.

Pamiętaj, że reaktancja nie jest stała - w kondensatorach jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości; znasz przecież wzór:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Nie wchodząc w dalsze szczegóły przyjmij do wiadomości, że tangens kąta strat jest równy stosunkowi rezystancji ESR i reaktancji kondensatora:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R_S}{X_S} = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot R_S$$



Rys. 2. Wykres graficzny impedancji szeregowego obwodu RC.

Mając podaną wartość  $\operatorname{tg} \delta$  możesz obliczyć  $R_S$ :

$$R_S = \frac{\operatorname{tg} \delta}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Pamiętaj, iż podana w katalogu wartość  $\operatorname{tg} \delta$  dotyczy tylko jednej konkretnej częstotliwości. Chyba że zamieszczono wykres pokazujący zależność  $\operatorname{tg} \delta$  od częstotliwości.

Czym większa wartość  $\operatorname{tg} \delta$ , tym gorszy kondensator.

No dobrze, ale czy jest to ważne w praktyce?

Dla początkującego amatora rzadko. Ale ty przecież chcesz rozumieć, co ro-

bisz i... dlaczego twój układ nie chce działać.

Zastanawiałeś się kiedyś może, czy przez niewielki kondensator można przepuścić prąd zmienny o dużym natężeniu? Na pierwszy rzut oka nie ma przeciwwskazań, bo rzeczywiście nie się, że w kondensatorach prąd wyprowadza napięcie i nie wydziela się tam żadna moc czynna. Intuicyjnie jednak czujesz, że coś tu nie gra. I rzeczywiście, teraz już wiesz - wszystko zależy od ESR! Przecież w każdym rzeczywistym kondensatorze przy przepływie prądu zmiennego wydziela się jakaś moc strat (w dielektryku, w rezystancji

doprowadzeń) - więc kondensator będzie się nagrzewał.

Czy naprawdę jesteś tego świadomy? Jeśli zastosujesz nieodpowiedni kondensator filtrujący ("elektrolit" wygładzający napięcie) w zasilaczu impulsowym pracującym przy częstotliwości rzędu kilkudziesięciu kiloherców, albo zbyt mały kondensator w obwodzie antenowym nadajnika w.c.z. o mocy kilkudziesięciu watów, to płynący prąd zmienny spowoduje uszkodzenie takiego kondensatora, a przynajmniej skróci jego żywotność.

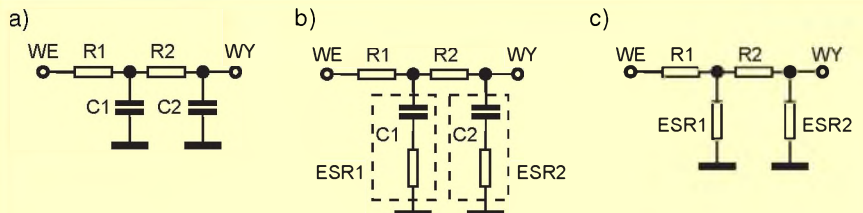
W większości typowych zastosowań nie musisz się tym przejmować, ale jeśli będziesz stosował kondensatory w obwodach prądu zmiennego o większej mocy, koniecznie zajrzyj do katalogów i przeanalizuj zawarte tam dane.

W firmowych katalogach podaje się krzywe dopuszczalnego prądu zmiennego albo inne równoważne parametry. Dotyczy to nie tylko "elektrolitów" z natury przeznaczonych do pracy przy większych prądach - ten sam problem występuje w kondensatorach foliowych i ceramicznych. Porządne katalogi zawsze zawierają dane na ten temat, tyle że podawane w różnej postaci.

Rezystancja przeszkadza nie tylko w obwodach mocy. Jeśli stosujesz kondensatory do blokowania czy filtrowania, pamiętaj, że rezystancja strat zmniejsza skuteczność blokowania, tworząc dla większych częstotliwości rezystancyjny dzielnik. Pokazują to **rysunki 3...5**. Na pewno nie uzyskasz takiego tłumienia niepożądanych sygnałów, jakie wynikałoby z papierowych wyliczeń.

Zwróć uwagę, że dotyczy to spotykanych w każdym układzie kondensatorów odsprężających napięcie zasilające (rys. 4). Teraz rozumiesz, dlaczego w praktycznych układach stosuje się dwa kondensatory - jeden "elektrolit", a drugi ceramiczny.

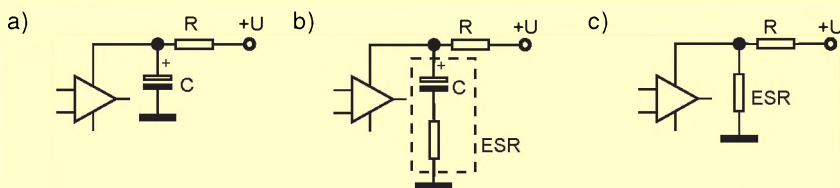
Także przy projektowaniu obwodów rezonansowych o dużej dobroci w niektórych przypadkach, na szczęście dość



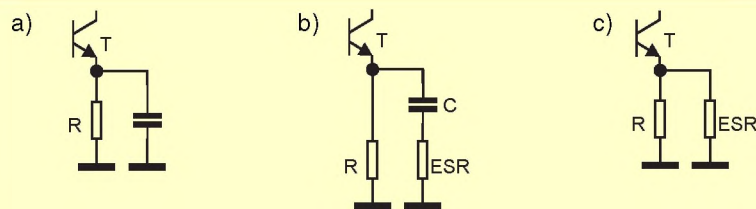
Rys. 3. Szeregowo rezystancja ESR zmniejsza skuteczność filtrowania w zakresie wysokich częstotliwości. Przy takich częstotliwościach kondensatory mają oporność (impedancję) znacznie większą niż wynika to ze wzoru na ich reaktancję pojemnościową:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Rozpatrywany fragment układu (a) przedstawiono w postaci schematu zastępczego (b), a następnie w postaci uproszczonego schematu zastępczego dla dużych częstotliwości (c).



Rys. 4. Wskutek istnienia szeregowej rezystancji ESR skuteczność odsprężania szyny zasilania jest znacznie mniejsza, niż wynika to z najprostszej teorii. Dotyczy to wpływu zakłóceń przychodzących z zasilacza. Może też być przyczyną samowzbudzenia wskutek wystąpienia znacznych napięć zmiennych na równoległe (!) połączonych rezystancjach ESR i R. Rozpatrywany fragment układu (a) przedstawiono w postaci schematu zastępczego (b), a następnie w postaci uproszczonego schematu zastępczego dla dużych częstotliwości (c).



Rys. 5. Rezystancja ESR zmniejsza skuteczność blokowania sygnałów zmiennych. Składowe o większych częstotliwościach nie są całkowicie zwarte do masy właśnie wskutek obecności szkodliwej rezystancji ESR. Rozpatrywany fragment układu (a) przedstawiono w postaci schematu zastępczego (b), a następnie w postaci uproszczonego schematu zastępczego dla dużych częstotliwości (c).

rzadkich, trzeba oprócz strat cewki uwzględnić też straty kondensatora.

## Indukcyjność kondensatorów

Oprócz rezystancji strat, w kondensatorach trzeba się liczyć z indukcyjnością doprowadzeń. Pojemność kondensatora tworzy z tą indukcyjnością szeregowy obwód rezonansowy LC.

Co z tego? Policzyć, jaką reaktancję powinien mieć kondensator o pojemności 1µF przy częstotliwości 100MHz. Znasz wzór:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Wychodzi około 0,0016W, czyli tyle, co nic. Jeśli jednak zmierzysz foliowy kondensator o takiej pojemności, nawet pochodzący od renomowanego wytwórcy, to jego reaktancja wyniesie około 3...10W (!) i nie będzie to reaktancja pojemnościowa, tylko indukcyjna. Przy tej częstotliwości kondensator zachowuje się jak... kiepska cewka indukcyjna! Pewnie nie bardzo potrafisz to sobie wyobrazić.

Wyciągnij jednak z tego ważny wniosek - *każdy typ kondensatora przeznaczony jest do pracy w określonym zakresie częstotliwości.*

Jak łatwo się domyślić najmniejszą indukcyjność mają kondensatory ceramiczne nie mające wyprowadzeń, powszechnie stosowane do montażu powierzchniowego. Takie maleńkie kos-

teczki, najczęściej szare lub brązowe, nazywane są chipami (czytaj czipami) od angielskiej nazwy chip capacitors. Niektóre z nich mogą pracować przy częstotliwościach rzędu pojedynczych gigaherców.

Spośród kondensatorów mających drutowe wyprowadzenia najmniejszą indukcyjność, rzędu pojedynczych nanohenrów mają kondensatory ceramiczne, o ile tylko montowane są jak najbliższej płytki. Kondensatory foliowe z natury mają większą indukcyjność - od kilku do kilkunastu nanohenrów, w zależności od wymiarów i konstrukcji.

W przypadku kondensatorów elektrolitycznych nie mówi się o indukcyjności doprowadzeń, bowiem z innych względów stosowane są one przy częstotliwościach rzędu co najwyżej setek kiloherców i indukcyjność doprowadzeń nie ma wtedy znaczenia.

Bardziej szczegółowe informacje podam ci w następnym odcinku.

## Stabilność temperaturowa, wpływ wilgoci, starzenie

Sprawę stabilności temperaturowej zapewne dobrze rozumiesz - wraz ze zmianą temperatury zmienia się jej pojemność. To oczywiste.

Mało kto jednak pamięta, że podobnie na pojemność kondensatorów wpływa... wilgotność. Wydawałoby się, że w zakłie-

rowane, albo nawet umieszczone w szczelnej obudowie z tworzywa sztucznego kondensatory wilgoć się nie dostanie - prawda jest inna.

Nie martw się jednak na zapas, w praktyce amatorskiej rzadko ma to znaczenie. Jeśli jednak będziesz stosował kondensatory foliowe w obwodach wymagających szczególnie dużej stabilności nie zapomnij o wpływie wilgoci. Kilka szczegółów podam ci za miesiąc.

Czy kondensatory się starzeją?

Wiesz dobrze, iż kondensatory elektrolityczne nie są zbyt stabilne - tu nie ma co liczyć na stałość pojemności. Okazuje się, że niektóre typy kondensatorów stałych same z siebie, nie wiadomo dlaczego, z czasem trochę zmieniają swoją pojemność - zjawisko to nazywa się dryftem. Oczywiście, znów winny jest dielektryk.

## Podsumowanie

Być może po przeczytaniu dotychczasowego materiału zrozumiałeś dlaczego niektóre twoje układy nie chciały poprawnie pracować. Próbowałem ci wyjaśnić, że w kondensatorach liczy się nie tylko pojemność. Ważne są też inne parametry.

Niektórzy początkujący elektronicy starają się dobrać kondensator o potrzebnej pojemności np. do układu rezonansowego czy czasowego z dokładnością do ułamka procenta. Przerzucają kilkadziesiąt kondensatorów o tej samej wartości nominalnej, żeby znaleźć ten jedyny. Innym wydaje się, że są sprytniejsi: biorą kondensator o odrobinę mniejszej pojemności i dołączają równoległe drugi żeby pojemność była taka jak potrzeba. Pojemność zmierzona na mostku jest wręcz idealna. Potem tacy delikwenci mocno się dziwią, bo później pojemność "rozjeżdża się", niekiedy nawet o kilka procent.

I co? Zapomnieli o procesie starzenia, o wpływie temperatury, wilgotności, zależności pojemności od częstotliwości itd! Być może nie wiedzą, że nawet normalne podgrzanie końcówek podczas lutowania może trwale zmienić pojemność kondensatora.

Nie popełniaj takich błędów! Cudów nie osiągniesz - musisz liczyć się ze zmianami pojemności. Za miesiąc porozmawiamy o tym, jakiego rzędu będą to zmiany dla poszczególnych rodzajów kondensatorów. Wyjaśnię ci też, w jakich sytuacjach trzeba je uwzględniać, a kiedy nie mają żadnego wpływu na działanie układu.

A na dziś to wszystko.

Piotr Górecki

W poprzednim odcinku próbowałem cię przekonać, że w kondensatorach liczy się nie tylko pojemność, ale też szereg innych parametrów. Doszliśmy do wniosku, iż właściwości kondensatora zależą przede wszystkim od dielektryka. Mówiliśmy, że w dielektryku występują straty mocy, które możemy przedstawić jako szeregową rezystancję zastępczą - ESR. Zasygnalizowałem ci także problem indukcyjności kondensatorów i zależności parametrów od temperatury, wilgotności i innych czynników. Może się trochę przestraszyłeś. Takie mnóstwo parametrów, wzajemnych zależności... Jak się w tym wszystkim nie zgubić?



Pamiętaj! W elektronice nie ma żadnej magii, są tylko niezmiennie prawa fizyki. Jeśli chcesz być dobrym elektronikiem, to niestety powinieneś przyswoić sobie sporą ilość informacji. Nie są to rzeczy trudne, ale bez tej wiedzy będziesz się poruszał w elektronice jakby po omacku.

Ja kiedyś, w głębokiej młodości, byłem skłonny lekceważyć wiedzę nagromadzoną przez "jajogłowych". Wydawało mi się, że praktyka załatwi wszystko. Rzeczywiście, praktyka jest najważniejsza, byleby tylko po drodze nie tracić zbyt wiele czasu na wyważanie otwartych drzwi, czyli żmudne odkrywanie tego, co inni dawno już odkryli i opisali.

Jeśli jednak nie masz ochoty na analizowanie wykresów, tabel i zestawień oraz wyciąganie wniosków, musisz liczyć się z faktem, że znaczna ilość zaprojektowanych i wykonanych przez ciebie układów może w ogóle nie działać lub będzie działać niezgodnie z twymi oczekiwaniami. Jednym z powodów mogą być kondensatory, elementy wydawałyby się prymitywne, wręcz trywialne.

Moim zadaniem jest podać ci niezbędną wiedzę w sposób jak najbardziej praktyczny i przystępny; wiedzę jednak, iż w kilku krótkich listach nie można przekazać wszystkiego. Dlatego w temat "wgryziemy się" stopniowo.

W pierwszej kolejności podam ci kilka najważniejszych wskazówek i informacji - mają one naświetlić całokształt problemu i uczulić cię na najważniejsze sprawy. Na początek dowiesz się jakie kondensatory spotyka się powszechnie na rynku, oraz na jakie dwie podstawowe dziedziny zastosowań kondensato-

arów powinieneś zwrócić szczególną uwagę. To jest porcja wiedzy absolutnie niezbędna każdemu elektronikowi. Tę część materiału znajdziesz pod tytułem zaczerpniętym ze starej piosenki: "Co każdy chłopiec wiedzieć powinien".

Dalsza część materiału, zatytułowana "Tylko dla ciekawych" i "Główne obszary zastosowań", zawiera następny stopień wtajemniczenia. Znajdziesz ją w następnych numerach EdW. Nie musisz jej czytać jeśli twoje zainteresowanie elektroniką kończy się na montowaniu układów. Ta wiedza będzie ci potrzebna, jeśli zamierzasz samodzielnie konstruować układy elektroniczne. A śmiem podejrzewać, że niezależnie od twojego wieku, będziesz mi przysyłał rozwiązania zadań ze Szkoły Konstruktorów. Nie lekceważ więc "trywialnych" kondensatorów. Serdecznie cię namawiam, żebyś dokładnie przeanalizował i przyswoił sobie cały podany materiał - starałem się wybrać dla ciebie informacje najważniejsze, naprawdę przydatne w praktyce.

Oczywiście, wprawy i rutyny musisz nabrać sam. I już teraz wiedz, że nie obejdziesz się przy tym bez "wpadek", rozczarowań i porażek.

Jeśli gotów jesteś się uczyć i będziesz wyciągał wnioski z niepowodzeń, to jestem pewny, że za jakiś czas będziesz z siebie naprawdę zadowolony.

## Co każdy chłopiec wiedzieć powinien

Utrwal sobie podstawową prostą zasadę: każdy typ kondensatorów ma inne właściwości i przeznaczony jest do określonych zastosowań. Nie ma kon-

densatorów idealnych nadających się do wszystkiego.

Dla współczesnego elektronika-hobysty podstawowe znaczenie mają trzy główne grupy kondensatorów:

- elektrolityczne
- ceramiczne
- foliowe.

**Kondensatory elektrolityczne** stosowane są w każdym układzie elektronicznym w obwodach zasilania jako kondensatory filtrujące i gromadzące energię.

Stosowane są też jako kondensatory sprzęgające i blokujące w urządzeniach m.cz, pracujących z częstotliwościami do mniej więcej 100kHz.

**Kondensatory ceramiczne** stosuje się powszechnie w obwodach wielkiej częstotliwości, zarówno jako elementy obwodów rezonansowych, jak i do sprzęgania, blokowania, filtrowania.

**Kondensatory foliowe** znajdują zastosowanie przy "średnich częstotliwościach", mniej więcej od kilku herców do co najwyżej kilku megaherców. Stosowane są też powszechnie w obwodach RC generatorów i filtrów. Niektóre typy kondensatorów foliowych przeznaczone są do pracy w obwodach impulsowych.

Blizsze informacje znajdziesz w części materiału "Tylko dla ciekawych".

Jako uzupełnienie, w jednej z ramek podałem ci, jakimi kondensatorami nie warto zaśmiecać sobie głowy i pracowni, a jakie mogą być przydatne.

## Odsprężanie obwodów zasilania

Najczęstszą przyczyną kłopotów związanych z kondensatorami są ich

## Dinozaury

W starych książkach i katalogach być może znajdziesz wzmianki o kondensatorach próżniowych, gazowanych, z dielektrykiem ciekłym, szklanym, papierowym. Ty, jako hobbysta żyjący u schyłku XX wieku możesz zupełnie nie zwracać sobie nimi głowy.

Być może w archaicznym sprzęcie spotkasz kondensatory mikowe, czy ceramiczne rurkowe. Są to kondensatory o dobrych parametrach; zostały jednak doszczętnie wyparte przez kondensatory ceramiczne płytkowe. Nie warto też ich kolekcjonować, no, chyba że mieszkasz gdzieś z dala od wszelkich źródeł zapotrzenia i cenny jest dla ciebie każdy element.

Ze starego sprzętu warto natomiast wymontować wszelkie kondensatory zmienne - nawet stare, wielkie agregaty pomiarowe. Co prawda kondensatory zmienne zostały zastąpione diodami waraktorowymi, ale na pewno przydadzą ci się do różnych amatorskich konstrukcji z zakresu w.cz.

(niedoskonałe) właściwości w zakresie wysokich częstotliwości.

Chyba każdy spotkał się z samowzbudzeniem układu. (Mi najczęściej wzbudzały się wzmacniacze. Ale jakby na złość, kiedy chciałem zbudować dobry generator - zdarzało się, że układ się nie wzbudzał.)

Przyczyny mogą być różne - jedną z nich jest zastosowanie niewłaściwych kondensatorów w obwodach filtracji i odsprężania napięć zasilających.

Niewłaściwe kondensatory (lub ich brak) mogą też być przyczyną dużej wrażliwości na zakłócenia, szczególnie te przedostające się z sieci energetycznej przez zasilacz. Zasygnalizowałem ci to w poprzednim odcinku (EdW 4/96 str.55, 56 na rys. 3...5). W zakresie wysokich częstotliwości (a także dla krótkich zakłóceń impulsowych) niektóre kondensatory mają znaczną rezystancję szeregową ESR. Rezystancja ta znacznie zmniejsza skuteczność filtrowania pojawiających się przebiegów w.cz. do dodatku występuje też szkodliwa indukcyjność samego kondensatora i jego doprowadzeń.

Nie mów mi tylko, że ciebie to nie dotyczy, bo będziesz robił wyłącznie układy małej częstotliwości. Jakie tranzystory będziesz stosował? Czy wiesz, że popularne tranzystory "m.cz" na przykład BC548, BC104 mogą wzmacniać sygnały o częstotliwościach nawet kilkuset megaherców?! Czy to jest "mała częstotliwość"? Podobnie jest ze wzmacniaczami operacyjnymi - przywoity wzmacniacz operacyjny przeznaczony do zastosowań audio, na przykład NE5532, ma pasmo sięgające 10MHz!

Dlatego dosłownie we wszystkich układach musisz zadbać o właściwe odblokowanie obwodów zasilania także w zakresie wysokich częstotliwości.

Powszechnie stosuje się tu równoległe połączenie kondensatora elektrolitycznego i małego kondensatora ceramicznego (tzw. ferroelektrycznego)

o pojemności typowo 47...220nF. Pokazuję ci to w ramce poniżej.

"Elektrolit", z uwagi na znaczną pojemność ma dobre właściwości przy małych częstotliwościach, ceramiczny "lizaczek" przy dużych.

A jaka powinna być pojemność "elektrolita"? Wydawałoby się, że czym większa, tym lepiej. Niekoniecznie!

Jak to? Przecież większy kondensator ma mniejszą reaktancję i rezystancję ESR, a więc powinien lepiej tłumić wszelkie tętnienia napięcia zasilającego.

Jeśli nie stosujesz stabilizatora, to rzeczywiście większa pojemność jest lepsza, bo zmniejsza wielkość tętnień. Ale jeśli masz w układzie stabilizator, choćby popularny 78XX, to nadmierne zwiększanie pojemności filtrującej praktycznie nic nie daje! Przecież stabilizator z założenia ma zmniejszać wahania napięcia zasilającego. Jednym z ważnych parametrów stabilizatora jest jego (dynamiczna) rezystancja wyjściowa. Informuje ona, o ile zmieni się napięcie przy zmianie prądu obciążenia. Rezystancja ta dla częstotliwości poniżej 1kHz nawet w popularnych stabilizatorach nie jest większa od 30...50 miliomów (0,03...0,05W). Tymczasem na przykład kon-

densator elektrolityczny 100µF/16V ma przy częstotliwości 50Hz reaktancję ponad 30W i rezystancję ESR ponad 1,5W! Nawet wielki kondensator 10000µF/16V ma przy częstotliwości 50Hz reaktancję około 0,3W i ESR około 0,1W. Jak widać, zwiększanie pojemności niewiele daje - w zakresie małych częstotliwości decydujące znaczenie dla tłumienia zakłóceń i tak ma stabilizator, a nie kondensator. Kondensator jest jednak konieczny, choćby dla zapobiegania samowzbudzeniu stabilizatora.

W zakresie większych częstotliwości sprawa wygląda nieco inaczej, bowiem rezystancja wyjściowa stabilizatora i rezystancja ESR kondensatora jest większa, ale i tak końcowy wniosek jest ten sam - nie ma potrzeby stosować elektrolitów o bardzo dużych pojemnościach. Standardowo w obwodach zasilania stosuje się kondensatory elektrolityczne o pojemności 22...220µF.

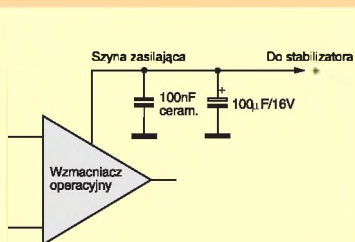
Może już dość długo zajmujesz się elektroniką i zaprotestujesz: przecież nigdy nie stosuję tych małych kondensatorów ceramicznych i moje układy jakoś pracują. Niewykluczone. Gratuluję sukcesu! Być może niektóre rzeczywiście pracują "jakoś". Czy znasz przysłowie: "miała być jakoś, wyszło jakoś"? Ale nie będę się z tobą sprzeczał; rzeczywiście sporo układów może pracować dosłownie bez żadnych kondensatorów odsprężających zasilanie. W innych wystarczy jeden mały elektrolit.

Powiem więcej: umieszczenie zalecanych kondensatorów w niewłaściwym miejscu na płytce może nie dać. Często bowiem trzeba stosować nie tylko jeden, ale kilka kondensatorów odsprężających: jeden blisko stabilizatora, inne w różnych punktach zasilanego układu.

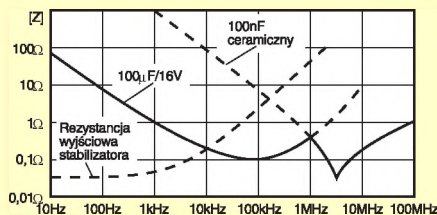
Podane ogólne wiadomości nie wyczerpują zagadnienia walki z samowzbudzeniem i zakłóceniami, ponieważ

## Odsprężanie zasilania

W każdym układzie elektronicznym musisz zadbać o właściwe odblokowanie obwodów zasilania także w zakresie wysokich częstotliwości. Zauważ, jak znacznie zmniejsza impedancję w zakresie wyższych częstotliwości zastosowanie małego kondensatora ceramicznego o pojemności tylko 100nF.



Odsprężanie zasilania.



Przebieg impedancji w funkcji częstotliwości

## Potrzebne wzory

Reaktancja (opór pozorny) przy prądzie zmiennym

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \approx \frac{0,16}{R \cdot C} \quad R \text{ [}\Omega\text{]}, C \text{ [F] lub } R \text{ [M}\Omega\text{]}, C \text{ [}\mu\text{F]}$$

Ładunek zgromadzony w kondensatorze

$$Q = C \times U$$

Gdy prąd ładowania (rozładowania) jest stały ( $I = \text{const}$ ), wtedy

$$C \times \Delta U = I \times t$$

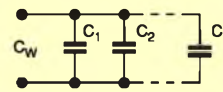
gdzie  $\Delta U$  jest przyrostem napięcia, a  $t$  czasem ładowania/rozładowania

ESR - zastępcza szeregowo rezystancja strat

$$ESR = \frac{\text{tg}\delta}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

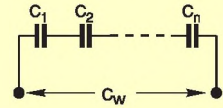
Uwaga:  $\text{tg}\delta$  zależy od częstotliwości.

Łączenie równoległe kondensatorów



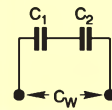
$$C_W = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Łączenie szeregowe kondensatorów



$$\frac{1}{C_W} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Łączenie szeregowe dwóch kondensatorów



$$C_W = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$



## Cechowanie kodowe kondensatorów ceramicznych typ 1

Umowna barwa punktu, kropki lub paska	Symbol temperaturowego współ. pojemności	Pojemność znamionowa			Tolerancja pojemności	
		pierwsza cyfra	druga cyfra	mnożnik	$C_n \leq 10\text{pF}$	$C_n > 10\text{pF}$
		pierwszy znak	drugi znak	trzeci znak	czwarty znak	piąty znak ( $\pm\text{pF}$ lub %)
srebrny	-	-	-	0,01	-	10%
złoty	-	-	-	0,1	-	5%
czarny	NPO	0	0	1	-	-
brązowy	N33	1	1	10	-	-
czerwony	N75	2	2	100	2pF	2%
pomarańczowy	N150	3	3	1000	-	-
żółty	N220	4	4	-	-	-
zielony	N330	5	5	-	-	-
niebieski	N470	6	6	-	0,25pF	-
fioletowy	N750	7	7	-	-	-
szary	-	8	8	-	-	-
biały	P33	9	9	-	1pF	-
ciemnoniebieski	P100	-	-	-	-	-
brak	N47	-	-	-	0,5pF	20%
pomar.-pomar.	N1500	-	-	-	-	-
żółto-pomarańcz.	N2200	-	-	-	-	-
zielono-pomar.	N3300	-	-	-	-	-
niebiesko-pomar.	N4700	-	-	-	-	-
czarno-pomar.	N5600	-	-	-	-	-

Uwaga! Początek cechowania kodowego jest oznaczony większą kropką lub paskiem z wyraźnym odstępem między pozostałymi znakami. Oznaczenia współczynnika temperaturowego: np. N330 oznacza -330ppm/K, a P100 +100ppm/K.

## Cechowanie skrócone kondensatorów ceramicznych typ 1

### Temperaturowy współczynnik pojemności

Oznaczenie tworzywa lub zakres temperaturowego współczynnika pojemności ( $10^{-6}/1^{\circ}\text{C} = \text{ppm/K}$ )	Kod	Barwa punktu lub paska na jednobarwnym pokryciu kondensatora
P100 (+100)	A	 ciemnoniebieski
P33 (+33)	B	 różowy
NPO (0)	C	 czarny
N33 (-33)	H	 brązowy
N47 (-47)	N	brak
N75 (-75)	L	 czerwony
N150 (-150)	P	 pomarańczowy
N220 (-220)	R	 żółty
N330 (-330)	S	 zielony
N470 (-470)	T	 niebieski
N750 (-750)	U	 fioletowy
N1500 (-1500)	W	 pomar.-pomar.
N2200 (-2200)	K	 żółto-pomarań.
N3300 (-3300)	D	 zielono-pomar.
N4700 (-4700)	E	 niebiesko-pom.
N5600 (-5600)	F	 czarno-pomarań.
+140...-870	SL	 szary
+250...-1750	UM	 biały

### Pojemność znamionowa

Pojemność	Kod	Pojemność	Kod
0,15 pF	p15	150 nF	150n
0,332 pF	p332	332 nF	332n
1,5 pF	1p5	1,5 μF	1μ5
3,32 pF	3p32	3,32 μF	3μ32
15 pF	15p	15 μF	15μ
33,2 pF	33p2	33,2 μF	33μ2
150 pF	150p	150 μF	150μ
332 pF	332p	332 μF	332μ
1,5 nF	1n5	1,5 mF	1m5
3,32 nF	3n32	3,32 mF	3m32
15 nF	15n	15 mF	15m
33,2 nF	33n2	33,2 mF	33m2

### Tolerancja pojemności

Tolerancja (%)	Kod	Tolerancja (%)	Kod
±0,005	E	±2,5	H
±0,01	L	±5	J
±0,02	P	±10	K
±0,05	W	±20	M
±0,1	B	±30	N
±0,25	C	-10...+30	Q
±0,5	D	-10...+50	T
±1	F	-20...+50	S
±2	G	-20...+80	Z

## Cechowanie kondensatorów zagranicznych

### Przykłady

$$470 = 47\text{pF}$$

$$561 = 560 = 560\text{pF}$$

$$822 = \underbrace{8200}_{2} = 8,2\text{nF}$$

$$393 = \underbrace{39000}_{3} = 39\text{nF}$$

$$224 = \underbrace{220000}_{4} = 220\text{nF}$$

$$125 = \underbrace{1200000}_{5} = 1,2\mu\text{F}$$

### Napięcie znamionowe

Napięcie	Kod
25V	m
40(50)V	l
63V	a
100V	b
160V	c
250V	d
400V	e
630V	f
1000V	h
1600V	i
500V	nie oznacza się

dużą rolę ma tu prowadzenie obwodów zasilających, szczególnie masy. Ten ważny temat nie mieści się jednak w ramach dzisiejszego artykułu.

Podanym materiałem chcę cię jedynie zachęcić do stosowania kondensatorów odsprzęgających w *każdym budowanym układzie*. Przyjmij to jako zasadę: zdecydowanie lepiej zastosować za dużo kondensatorów odsprzęgających zasilanie, niż za mało. Nie żałuj więc kilkudziesięciu groszy na te kondensatory. W sumie zaoszczędzisz sobie sporo nerwów i frustracji.

### Układy precyzyjne

Drugą dziedziną zastosowań kondensatorów, na którą chcę cię zwrócić uwagę są wszelkie układy wymagające precyzji i stałości parametrów.

Będziesz budował, a może już budowałeś, różnego rodzaju filtry i generatory dostrojone do określonej częstotliwości. Częstotliwość powinna być stała, niezależnie od zmian temperatury i innych czynników.

Z filtrami i generatorami LC dla wysokich częstotliwości sprawa jest względnie prosta, bo stosuje się tam strojone cewki oraz stabilne kondensatory ceramiczne o pojemnościach 1...1000pF (tzw. typ 1), a te produkowane są w wielu wykonaniach o ściśle określonych współczynnikach temperaturowych. Przez dobór kondensatora o odpowiednim współczynniku temperaturowym można skompensować zmiany temperaturowe cewki i uzyskać dobrą stabilność.

Trochę gorzej wygląda sprawa z filtrami i generatorami małej częstotliwości, które obecnie są budowane przede wszystkim jako układy aktywne, zawierające wzmacniacze operacyjne i elementy RC. Tu pojemności muszą być większe niż 1nF, a więc nie można stosować dobrych kondensatorów ceramicznych (tzw. typ 1).

O ile kondensatory ceramiczne o pojemnościach poniżej 1nF wykonywane są z ceramiki o naprawdę znakomitych parametrach, to kondensatory ceramiczne o większych pojemnościach mają inny, zdecydowanie gorszy dielektryk. Zwykle są to kondensatory ceramiczne ferroelektryczne, nazywane tak ze względu na skład materiału dielektryka - jest to tak zwany typ 2. Podobne parametry mają kondensatory tzw. typu 3, o jeszcze mniejszych gabarytach, nazywane czasem kondensatorami półprzewodnikowymi lub złączowymi (są to jednak najprawdziwsze kondensatory i nie mają praktycznie nic wspólnego z diodami i tranzystorami)

Przed chwilą zachęcałem cię, żebyś stosował takie kondensatory do odsprzęgania zasilania.

Do tamtego celu były znakomite. Jednak zupełnie nie nadają się one do precyzyjnych układów czasowych. Pojemność tych kondensatorów może zmieniać się pod wpływem temperatury nawet o kilkadziesiąt procent! Co gorsza, o zgrozo (uważaj, to jest kuriozum!) - pojemność niektórych typów zależy też od przyłożonego napięcia!

Co prawda trafiają się stabilne kondensatory ceramiczne w zakresie pojemności kilkudziesięciu nanofaradów, ale ty kupując na giełdzie nigdy nie będziesz miał pewności co otrzymałeś.

Przyjmij więc bezpieczną zasadę: nie stosuj malutkich kondensatorów ceramicznych o pojemności większej niż 1nF w układach czasowych RC i LC.

Z kolei kondensatory foliowe mają zdecydowanie lepszą stabilność niż ceramiczne ferroelektryczne.

Najlepsze są tu kondensatory polistyrenowe - krajowe KSF i zagraniczne KS - znane bardziej jako styrofleksowe (my, praktycy mówimy krótko: "styrofleksy"). Mają one niewielki współczynnik temperaturowy pojemności wynoszący mniej więcej  $-0,013\%/^{\circ}\text{C}$  i równie niewielką zależność pojemności od wilgotności względnej powietrza.

Natomiast najpopularniejsze obecnie na rynku kondensatory poliestrowe, czyli krajowe MKSE i zagraniczne MKT mają nieco gorszą stabilność i ogólnie rzecz biorąc należy się liczyć ze zmianami pojemności do  $\pm 3\%$ . Czy to dużo czy mało? To zależy od wymagań stawianych układowi. Większość amatorskich konstrukcji nie wymaga jednak większej stabilności. Tak więc w obwodach RC powszechnie będziemy stosować kondensatory MKSE (MKT).

Niejednokrotnie będą ci też potrzebne generatory lub uniwiibratory o bardzo długich czasach impulsu, rzędu sekund, minut, a nawet godzin. Pewnie zechcesz zastosować w nich "elektrolity".

Jak będzie ze stabilnością parametrów takich układów?

Pamiętasz zapewne, że pojemność popularnych "mokrych elektrolitów" może się znacznie zmieniać w związku z uszkodzeniami i ponownym formowaniem cienuteńkiej warstwy dielektryka - tlenku glinu. Zmiany pojemności mogą tu wynieść nawet kilkadziesiąt procent.

Jeszcze gorszym problemem może być prąd upływu. W układach o dużych stałych czasowych RC stosuje się zwykle rezystory o wartościach rzędu megaomów, więc może się okazać, że prąd pracy płynący przez taki rezystor jest mniejszy niż prąd upływu rozformowanego kondensatora! Urządzenie wcale nie będzie pracować! Aby temu zapobiec

kondensatory elektrolityczne aluminiowe w miarę możliwości powinny pozostać pod napięciem. Będą wtedy zawsze zaformowane i ich prąd upływu będzie nieznaczący.

Generalnie jednak w układach czasowych wymagających dużej niezawodności i stabilności należy za wszelką cenę unikać jakichkolwiek "elektrolitów".

Zamiast tego należy stosować generatory z kondensatorami stałymi i dla uzyskania dużych czasów wykorzystać cyfrowe dzielniki (liczniki). Godna polecenia jest tu popularna kostka CMOS 4541, która w ten sposób pozwala zbudować zarówno generatory, jak i układy monostabilne o dowolnie długich czasach. Kostka taka będzie jednym z układów scalonych na przygotowywanej właśnie płytce wielofunkcyjnej PW-03.

W poprzednim odcinku obiecałem ci, że wreszcie coś zepsujemy. I zepsujemy! Ale najpierw, jeśli możesz, spróbuj zbadać właściwości posiadanych kondensatorów stałych.

Jeśli masz dostęp do miernika pojemności, sprawdź, jak zmienia się pojemność różnego typu kondensatorów pod wpływem temperatury. Sprawdź pojemność "w stanie zimnym" i po podgrzaniu. Przekonaj się, czy silne podgrzanie wyprowadzeń kondensatora podczas lutowania może trwale zmienić jego pojemność.

Przetestuj w ten sposób kondensatory różnych typów, o różnych pojemnościach. Jedna taka praktyczna lekcja będzie więcej znaczyć, niż kilka stron opisu właściwości tych elementów.. A jak już je pomierzysz, weź nóż, szcypce boczne, i zobacz, jak są zbudowane.

Piotr Górecki

*Nie stosuj małych kondensatorów ceramicznych o pojemności większej niż 1nF w precyzyjnych obwodach czasowych RC i LC.*

*Jeśli musisz stosować w precyzyjnych obwodach kondensatory elektrolityczne - stosuj w miarę możliwości "tantale", a jeśli mają to być zwykłe kondensatory aluminiowe, to muszą one stale pozostawać pod napięciem.*

W tej części weźmiemy pod lupę poszczególne rodzaje kondensatorów - podam ci ich najistotniejsze parametry, potem powrócimy do szerszego omówienia różnych dziedzin zastosowań i wreszcie podam ci szereg potrzebnych wskazówek i wzorów. Jak ci wspomniałem w poprzednim odcinku, nie musisz czytać tej części materiału. Chyba, że będziesz konstruował własne układy. W takim razie są to informacje dla ciebie.



## Kondensatory elektrolityczne

Omówiliśmy je przed dwoma miesiącami, podstawowych wiadomości nie będę ci powtarzał. Podam tylko cztery najważniejsze wykresy przedstawiające charakterystyki krajowych kondensatorów: aluminiowych (**rysunek 2**) i tantalowych (**rysunek 3**). "Tantale" 196D to najpopularniejsze różowe łezki, a "tantale" 164D mają obudowę cylindryczną z wyprowadzeniami osiowymi. Zwróć uwagę, jak bardzo zmniejsza się pojemność "elektrolitów" przy większych częstotliwościach, i jak rosną straty reprezentowane przez tgδ. Teraz chyba nie

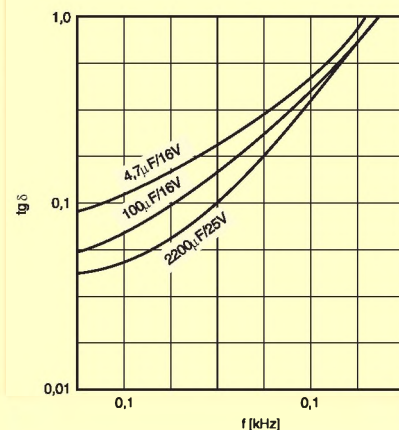
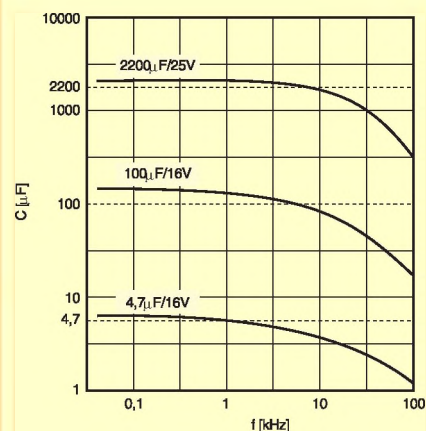
masz wątpliwości, że nie są to kondensatory przeznaczone do pracy przy wielkich częstotliwościach.

Kondensatory elektrolityczne mają największą awaryjność spośród wszystkich kondensatorów. Zapamiętaj zasadę, że niezawodność elektrolitów zmniejsza się mniej więcej dwukrotnie przy wzroście temperatury kondensatora o 10 stopni. Chodzi tu nie tylko o temperaturę otoczenia, ale przede wszystkim wzrost temperatury wywołany mocą strat (iloczyn skutecznej wartości przepływającego prądu zmiennego i rezystancji zastępczej ESR). Dotyczy to prze-

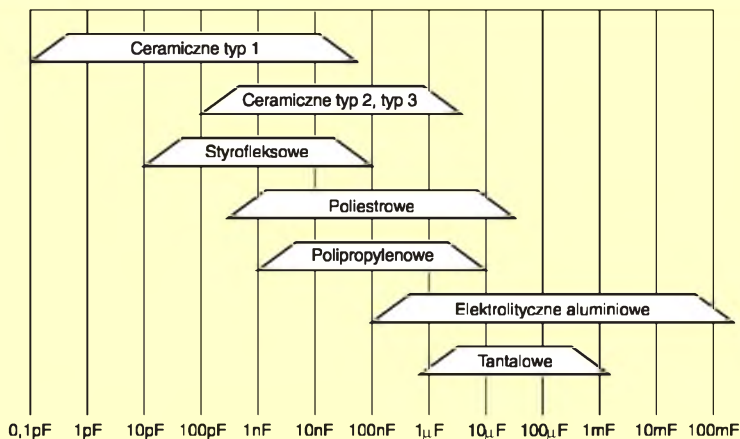
de wszystkim kondensatorów stosowanych w zasilaczach impulsowych, gdzie częstotliwości pracy są rzędu dziesiątek kiloherców.

### Czy wiesz, że...

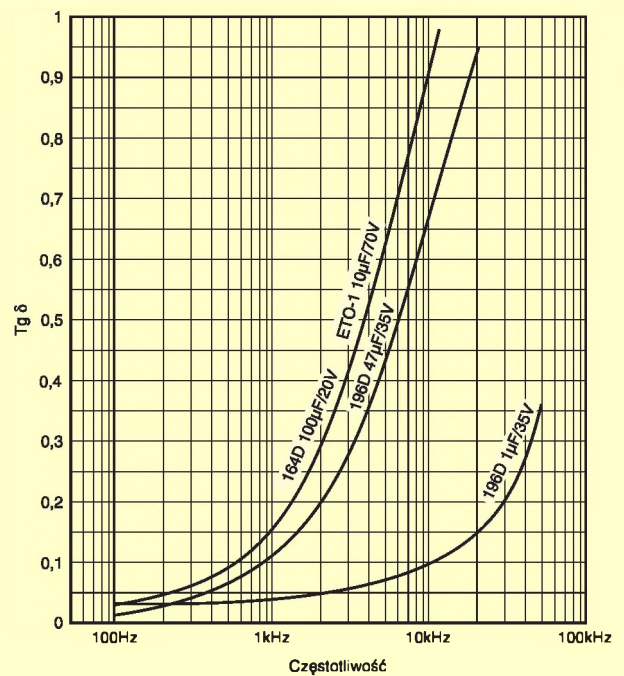
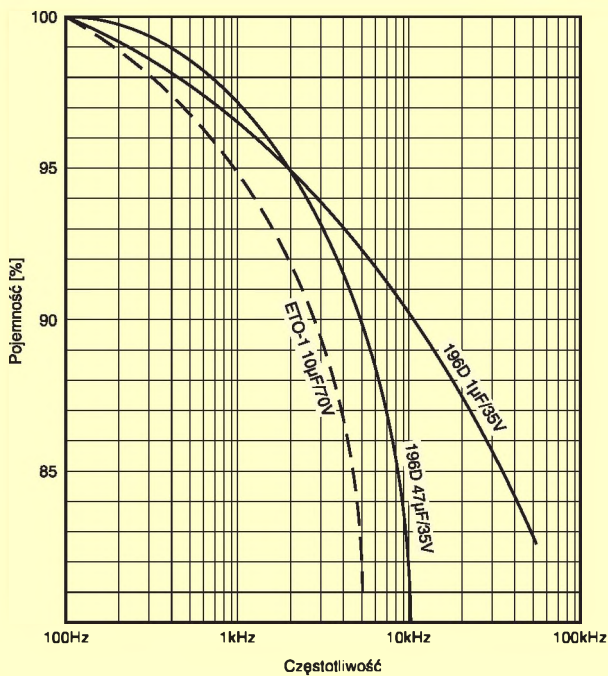
Niezawodność kondensatorów elektrolitycznych zmniejsza się mniej więcej dwukrotnie przy wzroście temperatury kondensatora o 10 stopni.



Rys. 2. Pojemności i tgδ kondensatorów elektrolitycznych aluminiowych w funkcji częstotliwości.



Rys. 1. Typy i zakresy pojemności produkowanych kondensatorów.



Rys. 3. Pojemności i  $tg \delta$  kondensatorów elektrolitycznych tantalowych w funkcji częstotliwości.

## Kondensatory ceramiczne

Kondensatory ceramiczne dzielą się wyraźnie na trzy grupy.

### Typ 1

Tak zwany typ 1 produkowany jest z użyciem dielektryka o przenikalności względnej  $\epsilon_r$  w granicach 10...600. Kondensatory te charakteryzują się małymi stratami i, co ciekawe, są produkowane ze ściśle określonym współczynnikiem temperaturowym w zakresie -1500...+150ppm/K. Umożliwia to łatwą kompensację temperaturową obwodów rezonansowych.

Niektóre katalogi (w tym krajowe) zawierają oznaczenia współczynnika temperaturowego w postaci np. N750, NP0, P150 itp. co oznacza odpowiednio -750,  $\pm 0$ , +150ppm/K (czyli -0,075,  $\pm 0$ , +0,015%/°C). W większości zachodnich

katalogów zamiast NP0 znajdziesz określenia C0G lub nowsze CG, które wskazują, że kondensatory te mają zero-wy współczynnik temperaturowy.

Kondensatory ceramiczne typ 1 to bodaj najlepsze z popularnych kondensatorów, ale niestety zakres ich pojemności jest ograniczony do co najwyżej kilku...kilkunastu nanofaradów.

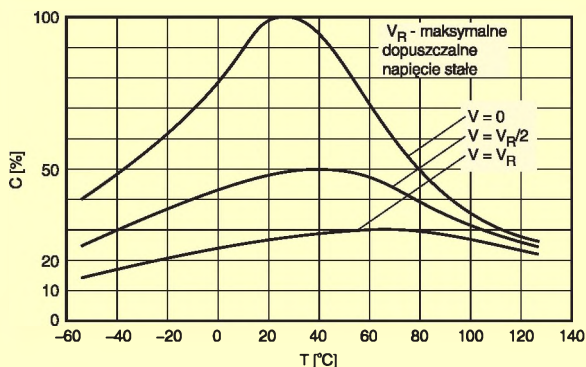
### Ferroelektryczne (typ 2)

Kondensatory ferroelektryczne (typ 2) mają znaczną pojemność przy małej objętości. Niestety okupione jest to pogorszeniem wielu parametrów. Na rysunku 4 znajdziesz krzywe obrazujące zależność pojemności od częstotliwości i od przyłożonego napięcia stałego dla kondensatorów o symbolu dielektryka 2F4. Zwróć uwagę, z jak dużymi, wręcz ogromnymi zmianami pojemności trzeba się liczyć - rzeczywista pojemność może

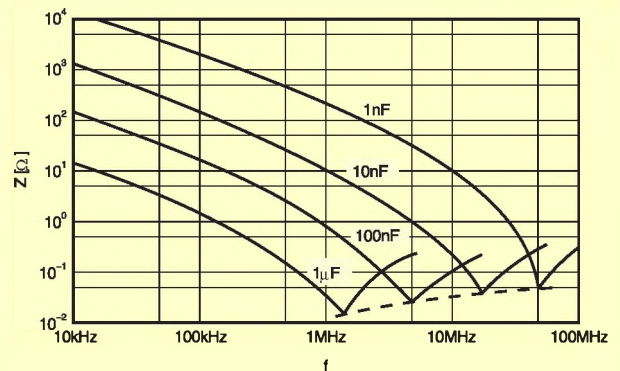
być nawet pięciokrotnie mniejsza (!) od pojemności nominalnej. Jedyne rozwiązanie szeregowo i  $tg \delta$  są względnie małe w dość szerokim zakresie częstotliwości.

Częstotliwość rezonansu szeregowego kondensatorów ferroelektrycznych o pojemności 100nF z wyprowadzeniami drutowymi, stosowanych typowo w obwodach odsprężania zasilania, wynosi mniej więcej 5...10MHz, a przy pojemności 10nF - kilkadziesiąt megaherców; pokazuje to **rysunek 5**. Kondensatory bez wyprowadzeń, przeznaczone do montażu powierzchniowego, mają częstotliwości rezonansowe o około 50% większe.

Na podstawie rysunku 5 można też oszacować wartość ESR takich kondensatorów - jest ona niewielka, rzędu kilkadziesiąt miliomów.



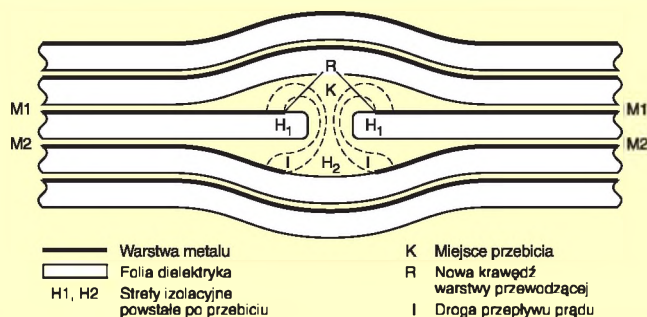
Rys. 4. Pojemność w funkcji częstotliwości kondensatorów ceramicznych ferroelektrycznych.



Rys. 5. Impedancja w funkcji częstotliwości kondensatorów ceramicznych ferroelektrycznych.

## Czy wiesz że...

Kondensatory metalizowane mają cenną właściwość autoregeneracji. Jeśli w jakimś miejscu folia stanowiąca dielektryk jest cieńsza lub ma jakiś defekt, to po przyłożeniu pełnego napięcia pracy może w tym miejscu nastąpić przebicie, czyli przeskok iskry. Kondensator nie zostanie jednak uszkodzony, ponieważ temperatura powstającego łuku elektrycznego (około 6000°C) powoduje odparowanie zarówno fragmentu dielektryka jak i sąsiadujących fragmentów warstw metalizacji. Łuk gaśnie i kondensator nadal jest sprawny, bowiem wokół miejsca przebicia nie ma już metalizacji, co skutecznie zapobiega powtórному powstaniu przebicia w tym samym miejscu. Pokazano to schematycznie na rysunku.



Choć więc kondensatory typu 2 nie nadają się do zastosowań precyzyjnych, to jednak ze względu na niską cenę znajdują szerokie zastosowanie do odsprzęgania zasilania, sprzęgania poszczególnych stopni itp.

## Półprzewodnikowe (typ 3)

Kondensatory ceramiczne tzw. półprzewodnikowe są właściwościami podobne do ferroelektrycznych, tyle że mają jeszcze mniejsze gabaryty. Uzyskano to dzięki odmiennej konstrukcji, opartej na gąbkopodobnym porowatym spieku, trochę podobnie jak w kondensatorach elektrolitycznych tantalowych. W poprzednio omówionych dwóch grupach "ceramików" kondensator tworzyły metalowe okładziny umieszczone z obu stron dielektryka ukształtowanego w postaci płaskiej płytki ceramicznej (lub wielu takich płytek). Dla amatora wewnętrzna budowa nie ma specjalnego znaczenia - wszystkie małe kondensatory ceramiczne, zarówno typ 2, jak i typ 3 traktuje on jako kondensatory ferroelektryczne.

## Kondensatory foliowe

Klasyczne kondensatory foliowe to dwie wstęgi folii aluminiowej przedzielone dielektrykiem - folią z tworzywa sztucznego. Większość spotykanych na rynku kondensatorów foliowych ma jednak inną budowę - są to tak zwane kondensatory metalizowane. Okładziny stanowi cieniutka warstwa metalu (aluminium) naniesiona próżniowo na jedną lub obie strony folii z tworzywa. Kondensatory metalizowane można łatwo od-

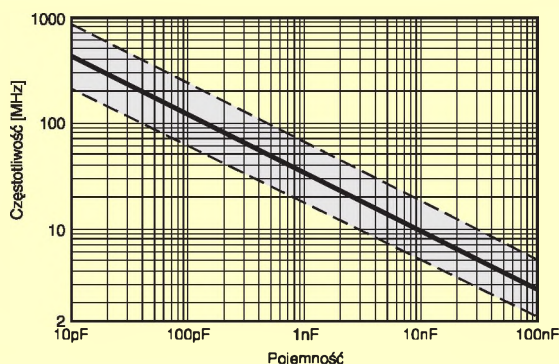
kondensatorów mikowych, które też mają literkę M w oznaczeniu).

Zapewne wiesz, że jako dielektryk stosuje się folię wykonaną z różnych materiałów, różne są zatem właściwości otrzymanych kondensatorów.

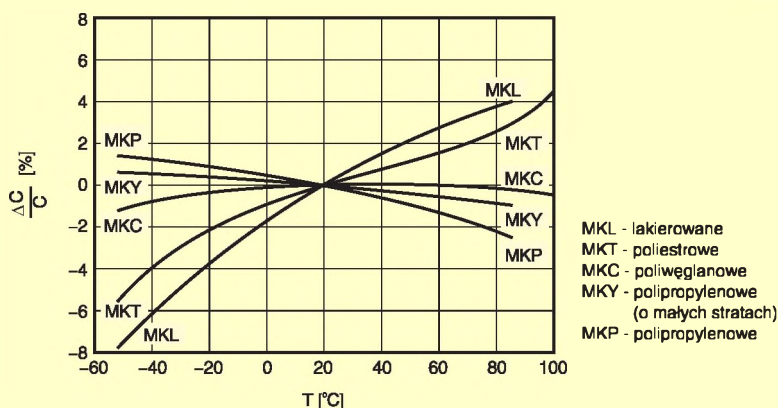
## Polistyrenowe

Kondensatory polistyrenowe (styrofleksowe) w kraju mają oznaczenie KSF, w Europie - KS. Są one najbardziej stabilne spośród popularnych kondensatorów foliowych.

Pojemność "styrofleksów" praktycznie nie zależy od częstotliwości, co wśród kondensatorów foliowych jest chlubnym wyjątkiem. Pojemność niewiele zmienia się też z upływem czasu - co najwyżej 0,2...0,5% w ciągu kilku lat. Kondensatory te mają niewielki ujemny współczynnik temperaturowy około -130ppm/K i niewielką zależność od wilgotności otaczającego powietrza (+60...+200ppm/K). Straty dielektryczne są małe: tgδ typowo jest mniejszy niż 0,0005. Indukcyjność własna wynosi około 1nH na 1mm długości kondensatora i jego czynnych wyprowadzeń. Wraz z pojemnością kondensatora indukcyjność ta tworzy szeregowy obwód rezonansowy, co ogranicza górną częstotliwość pracy tych konden-



Rys. 6. Częstotliwość rezonansu własnego kondensatorów styrofleksowych.



Rys. 7. Zmiany pojemności w funkcji temperatury różnych kondensatorów foliowych.

## Czy wiesz że...

Niektóre kondensatory, na przykład styroflexowe, mają zaznaczoną okładzinę zewnętrzną, która może służyć jako ekran izolujący okładzinę wewnętrzną od wpływu zakłóceń elektrycznych. Ma to znaczenie w obwodach o dużej czułości. Wyprowadzenie okładziny zewnętrznej, zaznaczone zwykle paskiem, należy dołączać do punktu o mniejszej impedancji, czyli np. do masy, plusa zasilania, wyjścia wzmacniacza itp."

satorów. **Rysunek 6** pokazuje zależność częstotliwości rezonansu własnego od pojemności kondensatorów styroflexowych pewnej znanej firmy.

W związku z dobrymi parametrami, tylko te kondensatory są wykonywane z wąską tolerancją, nawet  $\pm 0,5\%$  (np. krajowe KSF-022).

Kondensatory polistyrenowe stosowane były powszechnie w obwodach w.c.z. i p.c.z, ale obecnie są wypierane przez kondensatory ceramiczne typu 1. Inną ważną dziedziną zastosowania precyzyjnych kondensatorów styroflexowych były wszelkiego rodzaju filtry stosowane w telekomunikacji. Ujemny współczynnik temperaturowy kondensatorów kompensował zmiany temperaturowe ferrytowych cewek. Obecnie, w związku z postępującą "cyfryzacją" telekomunikacji, i ten obszar zastosowań znacznie się skurczył.

Inne kondensatory foliowe są nieco mniej stabilne i nie są przewidziane do zastosowań precyzyjnych, a więc

w katalogach nie podaje się szczegółowo tak wielu parametrów. Z reguły są to kondensatory metalizowane. Wykonywane są z tolerancją w najlepszym wypadku  $\pm 5\%$ , zwykle  $\pm 10$  i  $\pm 20\%$ .

Na **rysunku 7** dla orientacji podaję ci zależność pojemności od temperatury kilku typów kondensatorów foliowych, i analogicznie na **rysunku 8** zależność tg od temperatury. Pod wpływem lutowania, upływu czasu, zmian temperatury, wilgotności itd... ich pojemność może zmieniać się nawet o kilka procent. Jak widzisz, niezbyt dobrze nadają się one do zastosowań wymagających dużej stałości parametrów.

### Poliestrowe

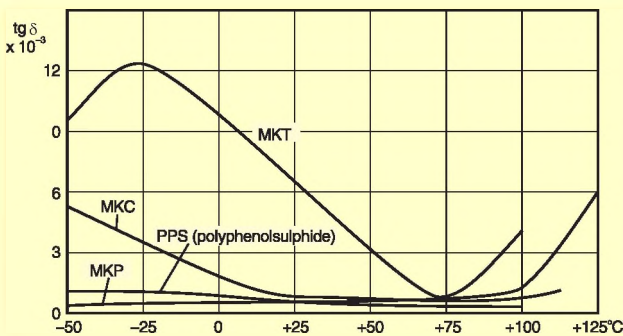
Kondensatory poliestrowe (ang. polyethylene tetraptalate) - krajowe oznaczenie MKSE, europejskie - MKT. Obecnie są to najpopularniejsze kondensatory foliowe - stosowane są powszechnie we wszelkim sprzęcie elektronicznym w zakresie małych i średnich częstotli-

wości. W literaturze angielskojęzycznej bardzo często proponuje się zastosowanie "dobrych kondensatorów mylarowych" (mylar capacitors). Ja przed laty długo i niepotrzebnie się zastanawiałem skąd wziąć takie egzotyczne kondensatory; nie wiedziałem bowiem, że są to po prostu kondensatory MKT, czyli krajowe MKSE.

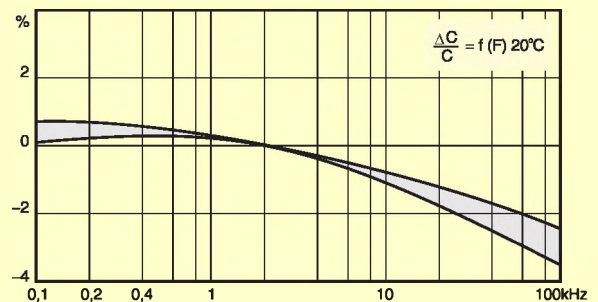
Zapewne przyda ci się informacja, że pojemność kondensatorów poliestrowych zależy od częstotliwości - pokazuje to **rysunek 9**.

Ponieważ są to najczęściej używane kondensatory, powinieneś znać dokładniej zależność ich pojemności od temperatury dla różnych częstotliwości - pokazuje to **rysunek 10**. Z kolei **rysunek 11** przedstawia impedancję w funkcji częstotliwości i częstotliwość rezonansu własnego dla kondensatorów o różnej pojemności. Są to bardzo istotne informacje, pokazują bowiem w przybliżeniu, w jakim zakresie częstotliwości kondensatory te powinny być stosowane, i jaka jest ich rezystancja strat ESR. Oczywiście bez sensu byłoby pracować z częstotliwościami znacznie przekraczającymi częstotliwość rezonansu własnego - przy wielkich częstotliwościach należy stosować kondensatory o mniejszej pojemności, które w sumie i tak będą mieć mniejszą impedancję.

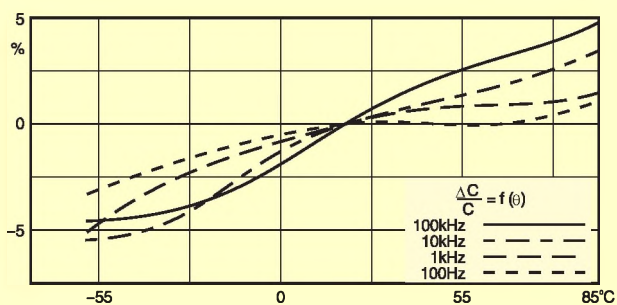
Rysunki 9...11 dotyczą kondensatorów produkcji Thomsona stosowanych



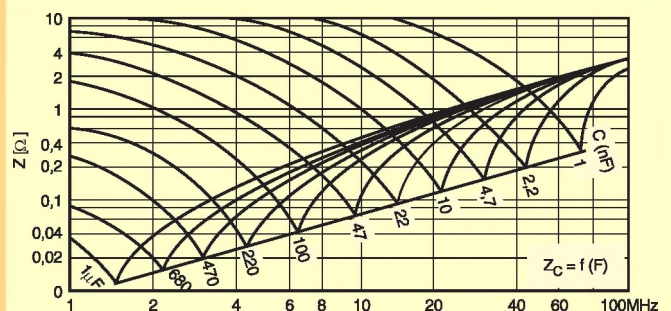
Rys. 8. Tangens kąta strat w funkcji temperatury różnych kondensatorów foliowych.



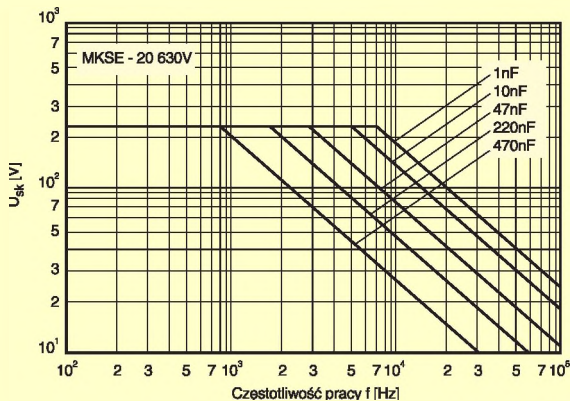
Rys. 9. Pojemność w funkcji częstotliwości kondensatorów poliestrowych.



Rys. 10. Pojemność w funkcji temperatury kondensatorów poliestrowych.



Rys. 11. Impedancja w funkcji częstotliwości kondensatorów poliestrowych.



Rys. 12. Dopuszczalne zmienne napięcie pracy w funkcji częstotliwości kondensatorów poliestrowych MKSE-20 630V.

powszechnie w zestawach AVT. Porównaj jeszcze rysunki 11 i 5. Zauważ, że współczesne kondensatory foliowe dzięki odpowiedniej budowie mają małą indukcyjność, porównywalną z kondensatorami ceramicznymi. To samo dotyczy rezystancji strat. Wygląda na to, że mogłyby być stosowane zamiennie - w obwodach odsprężania zasilania powszechnie stosuje się jednak znacznie tańsze "ceramiki".

Kondensatory poliestrowe mają przyzwoitą (ale wcale nie rewelacyjną) wartość  $tgd$  w granicach 0,001...0,01. Jednak w dziedzinach, gdzie są one stosowane, nie ma to zazwyczaj żadnego znaczenia praktycznego.

Choć w zasadzie kondensatory poliestrowe nie są przeznaczone do pracy przy znacznych napięciach i prądach zmiennych, jednak z powodzeniem mogą być stosowane w zasilaczach beztransformatorowych jako elementy ograniczające prąd bez strat mocy (o czym będzie mowa w następnej części). W żadnym wypadku nie mogą to być kondensatory o napięciu nominalnym

250V lub 400V, bowiem te mogą być stosowane przy napięciu przemiennym co najwyżej odpowiednio 160V i 200V. W obwodach sieci energetycznej 220V muszą być użyte kondensatory poliestrowe na napięcie pracy (stałe) 630V!

**Rysunek 12** pokazuje zależność dopuszczalnego napięcia przemiennego od częstotliwości dla krajowych kondensatorów MKSE-020 630V. Ograniczenia przy większych częstotliwościach wynikają ze strat w dielektryku, które powodują nagrzewanie kondensatora; rysunek ten pośrednio wskazuje więc także na wartość ESR w funkcji częstotliwości.

### Poliwęglanowe

Kondensatory poliwęglanowe (polycarbonate); w kraju nie są produkowane - europejskie oznaczenie MKC. Zaletą jest około pięciokrotnie mniejsza niż w kondensatorach MKT zależność pojemności od częstotliwości, mała zależność pojemności od temperatury ( $\pm 1\%$  w zakresie  $-20...+70^{\circ}\text{C}$ ), kilkukrotnie mniejsza wartość  $tgd$  - patrz rysunki

## Czy spotkałeś już kondensatory z oznaczeniem GoldCap?

Kondensatory takie mają ogromną pojemność rzędu faradów i mogą pracować przy napięciach rzędu pojedynczych voltów. Z uwagi na olbrzymią pojemność właściwie są czymś pośrednim między kondensatorami i akumulatorami. Są stosowane jako źródła energii (zastępują akumulatory i baterie) w urządzeniach o małym poborze prądu. Kondensatory GoldCap znajdują miejsce w różnych urządzeniach wymagających nieprzerwanego zasilania jako bateria rezerwowa, pracująca w razie zaniku napięcia sieciowego.

7 i 8. Niestety, z nieznanym mi względów (być może ze względu na większe gabaryty) kondensatory te nie są popularne, tak że nawet nie wszystkie znane firmy mają je w swej ofercie handlowej.

### Polipropylenowe

Kondensatory polipropylenowe; krajowe oznaczenia KMP, KFMP, europejskie MKP. Przeznaczone są przede wszystkim do pracy w obwodach impulsowych, gdzie występują napięcia i prądy o znacznej stromości. Takie właśnie kondensatory stosuje się w obwodach odchylenia odbiorników telewizyjnych i sieciowych zasilaczach impulsowych. My będziemy je stosować przede wszystkim w wspomnianych już zasilaczach beztransformatorowych i być może w jakichś układach impulsowych - na przykład do gasików lub filtrów przeciwzakłóceńowych.

Piotr Górecki

Jeżeli nie jesteś, i nie chcesz być konstruktorem, tej części materiału też nie musisz czytać. Jeśli cię to jednak interesuje, otrzymasz teraz szereg kolejnych wskazówek praktycznych. Są to rady co stosować, a czego unikać w poszczególnych rodzajach budowanych układów.



## Zasilacze sieciowe (klasyczne)

Do filtrowania napięcia całkowicie wystarczają zwykle kondensatory elektrolityczne aluminiowe. W zasilaczach niekiedy stosuje się dodatkowo niewielkie kondensatory ceramiczne umieszczone przed mostkiem prostowniczym, mające za zadanie ograniczenie ewentualnych zakłóceń impulsowych przedostających się z sieci energetycznej przez transformator. Na **rysunku 13** znajdziesz schematy, przebiegi napięcia i wskazówki dotyczące doboru pojemności w zależności od pobieranego prądu. Oczywiście wymaganą pojemność można uzyskać łącząc równolegle kilka mniejszych kondensatorów.

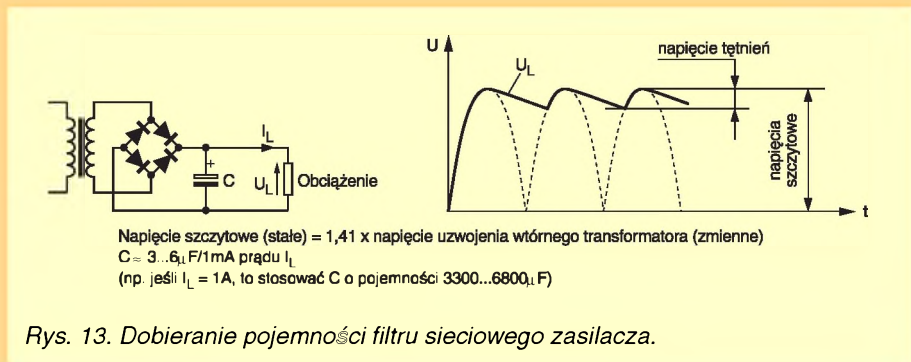
Natomiast na **rysunku 14a** pokazaliśmy ci sposób łączenia szeregowego kondensatorów elektrolitycznych w przypadku, gdy trzeba uzyskać kondensator o większym napięciu pracy. Koniecznie należy zastosować rezystory bocznikujące ze względu na możliwość wystąpienia znacznego prądu upływu w kondensatorach, które przez jakiś czas pozosta-

ną bez napięcia. Jeśli to możliwe, lepiej jest zastosować układ z **rysunku 14b**.

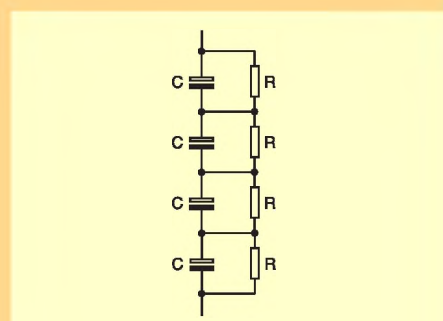
## Zasilacze impulsowe

Zasilacze takie pracują przy częstotliwościach rzędu 15...100kHz. Trzeba koniecznie pamiętać, że w tym zakresie pojemności zwykłe kondensatory elektrolityczne mają pojemność znacznie, nawet kilkakrotnie, mniejszą od pojemności nominalnej; na dodatek, co jeszcze gorsze, przy takich częstotliwościach występują w nich duże straty mocy na rezystancji szeregowej ( $tgd > 1$ ). Do filtrów takich zasilaczy produkuje się specjalne kondensatory elektrolityczne o podwyższonej niezawodności, małych stratach (low ESR) i wysokiej dopuszczalnej temperaturze pracy. Dużo, może nawet większość, zagranicznych kondensatorów o większej pojemności ma parametry pozwalające na zastosowanie ich w zasilaczach impulsowych. Zwykle można je poznać po zaznaczonej na obudowie dopuszczalnej górnej temperaturze pracy równej  $+105^{\circ}\text{C}$  (zwykle elektrolity:  $+70...+85^{\circ}\text{C}$ ). Nie każdy hobbysta ma jednak dostęp do ta-

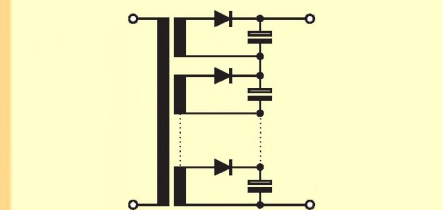
kich kondensatorów; są one też dość drogie. Warto więc wiedzieć, że w zasilaczach i przetwornicach pracujących z częstotliwościami 15...25kHz można też stosować zwykłe, krajowe "elektrolity". Przecież ze względu na znaczną częstotliwość pracy, wymagane pojemności filtru są kilkadziesiąt razy mniejsze niż w zasilaczach sieciowych 50Hz (100Hz). Zaleca się tu jednak stosowanie kondensatorów na napięcie pracy znacznie wyższe niż rzeczywiste napięcie pracy, ponieważ kondensatory takie przy swych większych gabarytach mają mniejszą wartość rezystancji ESR. Ko-



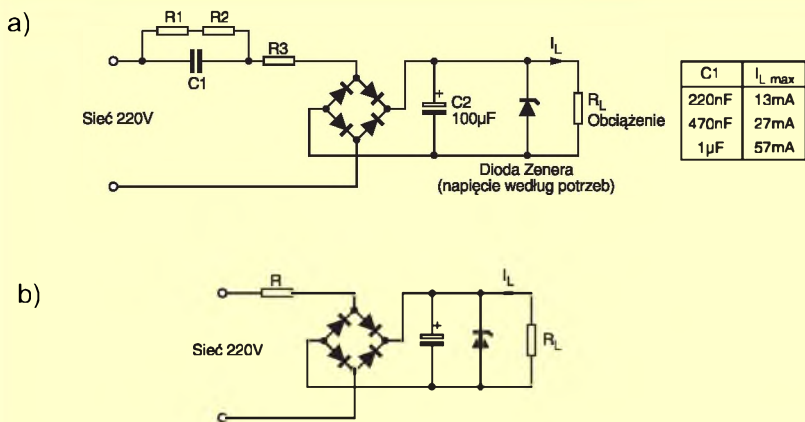
Rys. 13. Dobieranie pojemności filtru sieciowego zasilacza.



Rys. 14a. Łączenie szeregowe jednakowych kondensatorów elektrolitycznych.



Rys. 14b. Zasilacz wykorzystujący transformator wielouzwojowy.



Rys 15. Zasilacz beztransformatorowy.

rzystnie jest też zastosowanie kilku kondensatorów o mniejszej pojemności, zamiast jednego o pojemności większej.

## Zasilacze beztransformatorowe

W prostych zasilaczach beztransformatorowych (rysunek 15a) elementem ograniczającym prąd jest zwykle kondensator - C1. Jak już wiesz, powinien to być kondensator polipropylenowy KMP (MKP) na napięciu 400V lub poliestrowy MKSE (MKT) na napięciu 630V. Rezystory R1 i R2 o wartości rzędu megaoma są niezbędne do rozładowania kondensatora po odłączeniu od sieci - bez nich przypadkowe dotknięcie zacisków wejściowych mogłoby spowodować przykry udar prądowy. Celowo narysowałem ci tu dwa szeregowo połączone rezystory, bowiem miniaturowe rezystorki mają napięcie pracy rzędu 150...250V, tymczasem na kondensatorze występuje napięcie zmienne o wartości szczytowej prawie 300V. Z kolei rezystor R3

jest niezbędny ze względu na ograniczenie do bezpiecznej dla diod wartości prądu w momencie dołączania do sieci. Bez niego, w przypadku dołączenia do sieci w momencie szczytu napięcia (ponad 300V), przez kondensator i diody popłynąłby przez moment prąd rzędu kilkuset (!) amperów, który uszkodziłby diody prostownicze. Ze względu na możliwość wystąpienia znacznych impulsów prądowych, w zasilaczu powinny być stosowane diody prostownicze o prądzie nominalnym przynajmniej 1A, np. typu 1N4001...4007.

Niektórzy nowicjusze do ograniczania prądu stosują wyłącznie rezystory (rys. 15b) i efektem jest znaczna moc strat, rzędu kilku, kilkunastu watów, wydzielająca się w tych rezystorach.

Przy zastosowaniu prostowania dwópolówkowego w układzie z rysunku 15a, zależnie od pojemności C1 otrzymuje się prąd użyteczny zgodnie z zamieszczoną tabelką.

Oczywiście taki zasilacz nie zapewni bezpieczeństwa użytkownika zasilane-

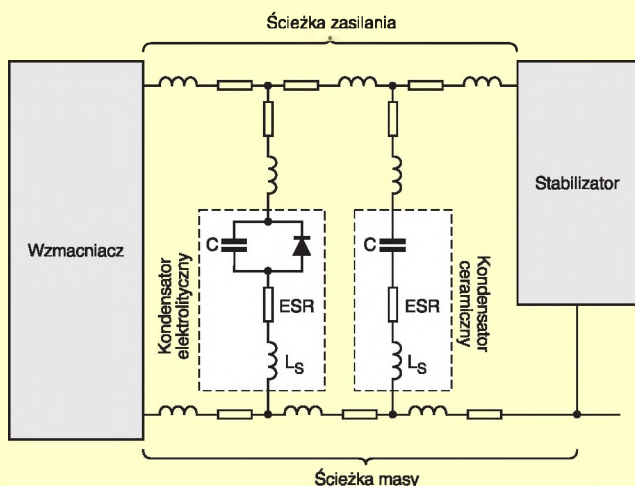
go układu, i w skrajnym przypadku dotknięcie go grozi śmiertelnym porażeniem. Dlatego nie stosuj tego sposobu zasilania, jeśli to nie jest konieczne. Standardowo używaj zwykłych zasilaczy transformatorowych, i to firmowych, mających certyfikat bezpieczeństwa.

## Odsprężanie zasilania

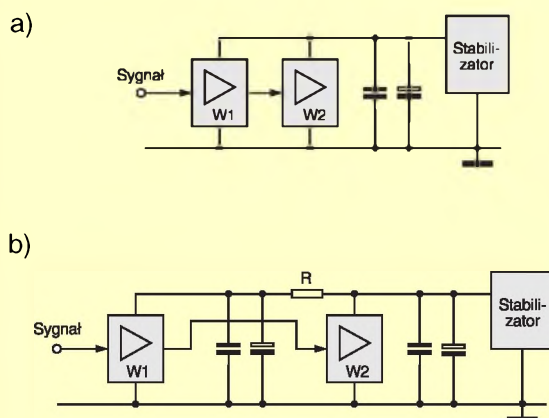
Jak ci wcześniej podałem, odsprężanie zasilania jest konieczne praktycznie we wszystkich układach elektronicznych zawierających elementy wzmacniające. Bez prawidłowego odsprężenia szyn zasilających układ może się wzbudzić lub będzie podatny na różne zakłócenia. Wiesz już, że do odsprężania szyn zasilających standardowo stosuje się równoległe połączenie "elektrolita" i ceramicznego "lizaczka".

Chcę ci jednak jeszcze bardziej przybliżyć ten temat. Nie przestrasz się, ale sprawa jest znacznie bardziej skomplikowana. Popatrz na rysunek 16 - przecież wszystkie przewodzące ścieżki i przewody mają pewną indukcyjność. Dowiedziałeś się też, że w zakresie wysokich częstotliwości nawet kondensatory potrafią zachowywać się jak cewki. Jeśli nawet do odsprężania zastosujesz naprawdę bezindukcyjne kondensatory monolityczne typu "chip", to i tak musisz się liczyć, że ich pojemność z występującymi szkodliwymi indukcyjnościami stworzy jakieś równoległe obwody rezonansowe LC (przy omawianiu kondensatorów mówiliśmy o szeregowych obwodach LC).

Dla częstotliwości bliskich rezonansu, impedancja równoległego obwodu LC jest duża, więc skuteczność odsprężania może być znikoma, wręcz żadna! No i co tu zrobić? Na szczęście takie obwody rezonansowe zawierają zawsze ja-



Rys. 16. Schemat zastępczy obwodów zasilania.



Rys. 17. Praktyczne obwody odsprężania napięcia zasilającego.

kieś (szkodliwe) rezystancje. Tym razem rezystancje te są naszym sojusznikiem, bowiem zmniejszają dobroć obwodów rezonansowych oraz ich impedancję. Mam nadzieję, że rozumiesz o co chodzi? Bardzo często okazuje się więc, iż takie łagodne rezonanse nie mają wpływu na pracę urządzenia. Dlatego też wersja z **rysunku 17b** jest lepsza niż z **rysunku 17a**. Szeregowy rezystor wpływa korzystnie na filtrację zarówno w zakresie małych, jak i wielkich częstotliwości.

Trzeba też mieć świadomość, iż jeśli omawiane teraz częstotliwości rezonansu równoległego będą leżeć w zakresie setek megaherców lub jeszcze wyżej, to wtedy niebezpieczeństwo dla układów m.cz. nie jest aż takie duże.

Czy jednak mamy jakikolwiek wpływ na takie rezonanse? Tak! I to znaczny!

Czym krótsze ścieżki i wyprowadzenia, tym mniejsze indukcyjności, a więc większe częstotliwości rezonansowe. Przy większych częstotliwościach rezonanse są łagodniejsze wskutek rosnących strat i mniej groźne, bo leżą powyżej pasma przenoszenia elementów wzmacniających.

Najmniejszą indukcyjność, rzędu pojedynczych nanohenrów mają kondensatory ceramiczne typu "chip" - przeznaczone do montażu powierzchniowego oraz ceramiczne "lizaczki", o ile tylko montowane są jak najbliższej płytki. Kondensatory foliowe z natury mają nieco większą indukcyjność - kilka...kilkanaście nanohenrów w zależności od wymiarów i konstrukcji zwijki.

W przypadku kondensatorów elektrolitycznych nie mówi się o indukcyjności doprowadzeń, bowiem z innych względów stosowane są one przy częstotliwościach rzędu co najwyżej setek kiloherców i indukcyjność doprowadzeń nie ma wtedy znaczenia.

Jeśli więc zaprojektujesz "półhektarową" płytkę drukowaną zawierającą szybkie tranzystory czy wzmacniacze operacyjne, a kondensatory odsprzęgające "przezornie" umieścisz tuż przy zasilaczu sieciowym, to nie dziw się, że układ może się wzbudzić, lub pojawią się inne kłopoty. Przyzwyczajaj się więc do możliwie małych płytek. Oczywiście, doświadczony konstruktor poradzi sobie w każdym przypadku, ale ty na razie

przyjmij jako zasadę projektowanie możliwie małych, zwartych płytek z szerokimi ścieżkami i zawsze przemyśl rozmieszczenie kondensatorów odsprzęgających.

*Kondensatory odsprzęgające zasilanie powinny być umieszczone jak najbliżej odsprzęganych obwodów i półprzewodników. Prawdopodobieństwo samowzbudzenia układu zmontowanego na dużej powierzchni jest większe niż tego samego układu zmontowanego na małej powierzchni i objętości.*

zdanie stosuje się też kondensatory zmienne, w tym trymery powietrzne, ceramiczne, foliowe.

Warto też wspomnieć o pewnym problemie dotyczącym kondensatorów stosowanych w obwodach mocy - przepływające prądy w.cz. powodują wydzielenie się znacznej mocy strat na rezystancjach ESR.

Układy w.cz. to specyficzny zakres zastosowań, którego nie da się omówić w kilku zdaniach. Poza tym ja nie jestem specjalistą w tej dziedzinie.

Zainteresowanym mogą tylko polecić literaturę specjalistyczną, na przykład dobrą książkę Zdzisława Bieńkowskiego "Poradnik Ultra-krótkofalowca".

Ogólnie rzecz biorąc, kwestia stabilności pojemności traci coraz bardziej znaczenie wskutek powszechnego stosowania układów cyfrowej syntezy częstotliwości oraz filtrów kwarcowych i ceramicznych z fałą powierzchniową.

## Wzmacniacze elektroakustyczne

Stosowane tu są praktycznie wszystkie typy kondensatorów: od małych "ceramików" typu 1 w obwodach kompensacji częstotliwości przez foliowe kondensatory blokujące i sprzęgające, aż do potężnych elektrolitów o pojemności dziesiątek tysięcy mikrofaradów. We wzmacniaczach końcowych dużej

mocy rodzaj zastosowanych kondensatorów zwykle nie jest krytyczny.

Jednak w niskoszumnych przedwzmacniaczach nie można zaniedbać właściwości kondensatorów.

Pierwszy stopień przedwzmacniacza obowiązkowo powinien zawierać obwody dodatkowej filtracji napięcia zasilającego. Potrzebne one są zarówno ze względu na szumy, jak i dla zapobiegania samowzbudzeniu i przenikaniu zakłóceń z zasilacza sieciowego. Z zasady nie stosuje się tu zwykłych elektrolitów aluminiowych, a tylko tantalowe. Dobrze jest też dać mały, lokalny stabilizator, np. 78L15, 79L15 czy podobny.

Jak wiadomo, rezystancja zastępcza ESR, podobnie jak każda rezystancja, szumi "sama z siebie". Dotyczy to przede wszystkim kondensatorów sprzęgających i filtrujących, umieszczonych w pierwszym stopniu przedwzmacniacza. Dlatego w urządzeniach najwyższej klasy w roli kondensatorów sprzęgających zamiast kondensatorów elektrolitycznych stosuje się często kondensatory foliowe: poliestrowe i polipropylenowe, i to nie pojedynczo, tylko po kilka sztuk połączonych równolegle dla uzyskania pojemności rzędu 10...50μF! Czy jest to konieczność, czy tylko szpan, mający wzbudzić podziw ewentualnego obserwatora? To bywa rozmaicie - aby się przekonać, należałoby policzyć jaki wpływ na szumy całkowite mają poszczególne elementy: źródło sygnału, rezystory, kondensatory i półprzewodniki. To jest jednak historia z zupełnie innej bajki. Zagadnienie walki z szumami jest zbyt szerokie, abym mógł ci je dogłębnie wyjaśnić w tym krótkim omówieniu. Jeśli cię to interesuje, napisz do mnie, wtedy w jednym z listów podam ci szereg dalszych szczegółów.

Ja w roli wejściowych kondensatorów sprzęgających, gdzie tylko się da, stosuję kondensatory foliowe o pojemności 470nF, 1μF lub 2x1μF, i to nie tyle ze względu na szumy, co raczej z lenistwa, dla własnej wygody. Nie muszę się potem martwić o biegunowość ewentualnie występujących stałych napięć polaryzujących.

W każdym razie unikaj stosowania zwykłych, aluminiowych elektrolitów w stopniach wejściowych niskoszumnych przedwzmacniaczy. Jeśli możliwe,

## Obwody

### W.CZ.

W obwodach sygnałowych w.cz. stosuje się zwykle kondensatory ceramiczne: w obwodach rezonansowych typu 1, a do blokowania prądów w.cz, sprzęgania stopni i filtrowania zasilania - ferroelektryczne, typu 2.

Praktycznie jedynie w tej dziedzinie stosuje się też kondensatory zmienne, w tym trymery powietrzne, ceramiczne, foliowe.

*W obwodach sygnałowych wzmacniaczy wysokiej klasy unikaj w miarę możliwości kondensatorów ceramicznych ferroelektrycznych.*

*W niskoszumnych przedwzmacniaczach nigdy nie stosuj zwykłych aluminiowych "elektrolitów", a tylko kondensatory foliowe i tantalowe.*

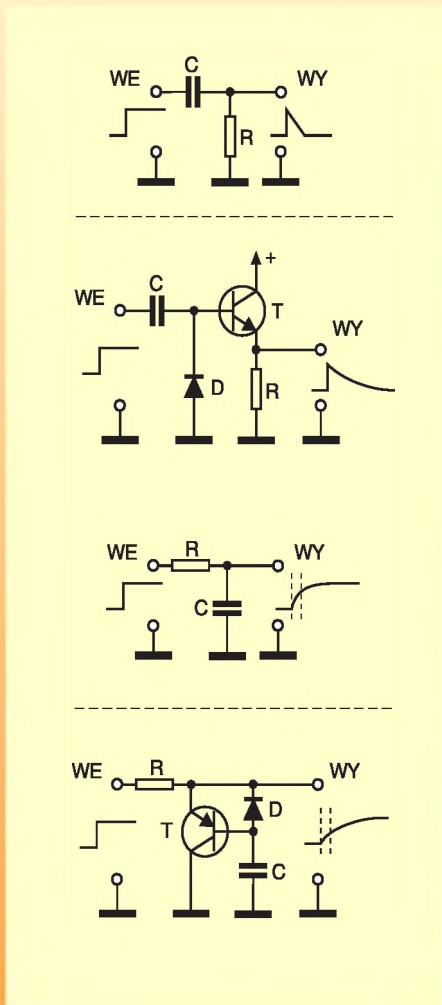
## Zwiększanie stałej czasowej obwodu RC

Istnieje bardzo prosty sposób zwiększania stałej czasowej obwodu RC przez zastosowanie tranzystora.

Wypadkowa stała czasowa jest b-krotnie większa od iloczynu RC (gdzie  $b$  jest wzmocnieniem stałoprądowym tranzystora). Wydawałoby się, że jest to idealny sposób na pozbycie się zawodnych "elektrolitów" na przykład z obwodów czasowych prostych urządzeń alarmowych, gdzie potrzebne są czasy rzędu kilkudziesięciu i więcej sekund.

Sposób ten ma jednak pewną wadę i jest rzadko stosowany w układach wymagających dużej niezawodności. Mianowicie przy dużej wartości rezystancji  $R$  i dużym wzmocnieniu tranzystora, prąd bazy, czyli prąd ładowania kondensatora, może mieć wartość rzędu nanoamperów. Tymczasem tego rzędu wartość może mieć prąd upływu w zakurzonyj i zabrudzonej płytce umieszczonej w urządzeniu pracującym bez przerwy kilka lat. Jeśli więc zastosujesz gdzieś takie rozwiązanie, musisz pomyśleć o skutecznym zabezpieczeniu płytki i elementów dobrym lakierem izolacyjnym lub nawet zalewą silikonową.

Jednak radzę ci raczej zastosowanie generatora i układu licznikowego, choćby wspomnianej już kostki CMOS 4541.



stosuj sprzężenie bezpośrednie - galwaniczne. Gdy potrzeba, wykorzystaj kondensatory foliowe i tantalowe. W urządzeniach wysokiej klasy ferroelektryczne ceramiki stosuj tylko w układach odsprężania zasilania. Starannie unikaj stosowania ich w obwodach sygnałowych. Wcześniej celowo pokazałem ci na rysunku 4, jak zmieniają się parametry tych kondensatorów pod wpływem choćby zmian napięcia - może to spowodować (uważaj!) pojawienie się dodatkowych zniekształceń nieliniowych. Tak! Ferroelektryczne ceramiki tak naprawdę nie są wcale elementami liniowymi, choć pewno się naczytałeś w książkach, że standardowe rezystory i kondensatory to elementy liniowe.

### Generatory i filtry m.cz.

W układach tych zachodzi konieczność używania kondensatorów o pojemnościach w granicach 1nF...10μF. Jeśli wymagana jest duża stabilność,

wtedy w zakresie do kilkudziesięciu...kilkuset nanofaradów najlepiej jest stosować kondensatory ceramiczne typ 1: NPO (G0C) lub styroflexowe, nawet gdy wymagana pojemność trzeba złożyć z kilku mniejszych.

Dość dobrą alternatywą byłyby użycie kondensatorów poliwęglanowych (MKC), ale dla polskiego hobbysty mogą się one okazać zbyt trudne do zdobycia.

Dlatego w wielu przypadkach zastosujesz najpopularniejsze kondensatory poliestrowe (MKSE-20 lub MKT). Przy stosowaniu tych kondensatorów oprócz temperaturowych zmian pojemności (nieliniowych - patrz rysunek 10) musisz liczyć się z wpływem innych czynników, które mogą zmienić pojemność nawet o 1...3%.

Generalnie przy wszelkich kondensatorach musisz zwracać uwagę na warunki lutowania. Wiele kondensatorów może trwale zmienić swą pojemność o 0,2...2% wskutek podgrzania przy lu-

towaniu. Jak pamiętasz, takie same zjawisko zaobserwowaliśmy podczas badania rezystorów (EdW1/96). Nie należy więc przegrzewać kondensatorów, a w uzasadnionych przypadkach można montować krytyczne elementy na trochę dłuższych wyprowadzeniach.

Jeśli tylko masz możliwość dokładnego pomiaru pojemności, to proponuję ci przeprowadzenie szeregu prób w tym zakresie. Sam przekonaj się, na ile trzeba się tym przejmować, a na ile nie warto zwracać sobie głowy. Weź więc kilka różnych rodzajów kondensatorów i zmierz pojemność "dziewiczą" i potem sprawdź, jak zmienia się ona po kolejnym wlutowaniu i wylutowaniu elementu. Pewnie przekonasz się, że nie warto idealnie dokładnie dobierać pojemności na cyfrowym mostku, bo rozjedzie się ona po wlutowaniu w płytkę. Raczej należałoby przeprowadzać korektę częstotliwości generatora lub filtra RC (dolutować dodatkowe niewielkie kondensatory lub rezystory) po zmontowaniu i sprawdzeniu układu.

Na pewno masz świadomość, że od zwykłych aluminiowych elektrolitów nie można oczekiwać stabilności - zmiany pojemności z upływem czasu mogą znacznie przekroczyć 10%. Jedyne w miarę stabilne elektrolity to tantal, ale jeśli tylko masz dość miejsca, użyj raczej "baterii" kondensatorów MKSE (MKT) i zwiększaj współpracujące rezystancje. Masz tu do dyspozycji kondensatory MKSE-25 i stare MKSE-012 i -018, które co prawda są dość duże, ale mają pojemność aż do 10μF. Bez trudu dostaniesz też miniaturowe kondensatory MKSE-20 lub MKT o pojemności 1μF lub nawet 2,2μF.

### Podsumowanie

Cykl artykułów o kondensatorach dobiegł do końca. Jeszcze raz cię zachęcam, żebyś w miarę możliwości przeprowadził zalecane pomiary kondensatorów i nabrał przekonania o stałości ich parametrów. Nie zapominaj o odsprężaniu zasilania we wszystkich budowanych układach.

Zapisz sobie na widocznym miejscu najważniejsze informacje o kondensatorach lub zrób odbitkę ksero stron 54-55 z EdW 5/96.

Piotr Górecki