

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 styroflexy 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 szekspirowskie 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 elektryczne (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.

Powinieliście 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: ϵ_0 - stała dielektryczna próżni (8,8542·10⁻¹²F/m)

ϵ_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. Al₂O₃ czy Ta₂O₅ stosowany w "elektrolitach")
- wreszcie przez zastosowanie dielektryka o dużej przenikalności względnej ϵ_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 wiedzy, 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 ϵ_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 okładek przy odległości d = 1mm, czy nawet 0,1mm.

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 mieliśmy 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 niedoskonałe dielektryki.

Czy potrafisz wyobrazić sobie kondensator zawierający dielektryk, którego przenikalność ϵ_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_{iz} 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!*

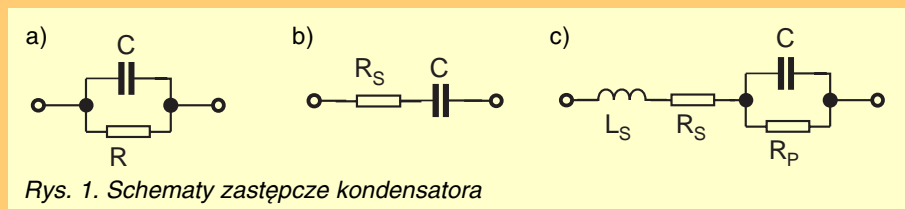
Tu musimy powrócić do właściwości dielektryka. Wszystkie dielektryki składają się z jakichś cząstek, atomów i molekuł (próżnia jest tu wyjątkiem, choć i w niej występuje zjawisko tworzenia wirtualnych cząstek i antycząstek). Te mikroskopowe składniki materii mają określone właściwości elektryczne, wynikające z istnienia ładunku elektrycznego i przestannego 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!

Ściślej 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

Rezystancja zastępcza kondensatora reprezentuje przede wszystkim straty mocy w dielektryku.



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, szeregową 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.

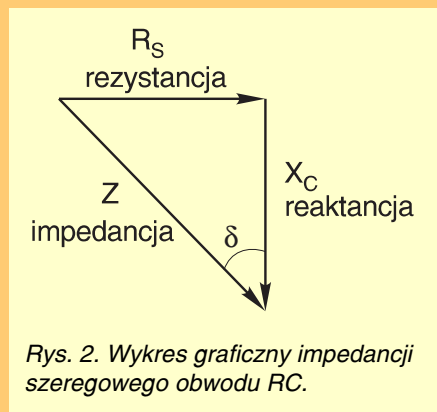
Jak by nie było, rozumiesz że na wypadkową oporność (impedancję) dla prądu zmiennego składa się oporność bierna (reaktancja), oraz nasza rezystancja ESR. Impedancja nie jest przy tym prostą, wyrażoną w omach sumą reaktancji i rezystancji ESR. Składniki dodaje się w sposób pokazany graficznie na **rysunku 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 rzecież nazywałeś się, że w kondensatorach prąd wyprzedza 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.cz. o mocy kilkudziesięciu watów, to płynący prąd zmienny spowoduje uszkodzenie takiego kondensatora, a przynajmniej skróci jego żywotność.

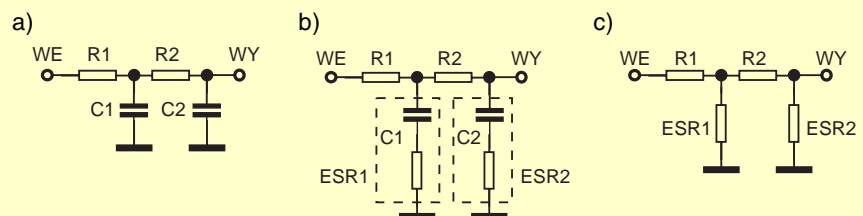
W większości typowych zastosowań nie musisz się tym przejmować, ale jeśli będziesz stosował kondensatory w obwodach prądu zmiennego o większej mocy, koniecznie zajrzyj do katalogów i przeanalizuj zawarte tam dane.

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 odsprzęgających napięcie zasilające (rys. 4). Teraz rozumiesz, dlaczego w praktycznych układach stosuje się dwa kondensatory - jeden "elektrolit", a drugi ceramiczny.

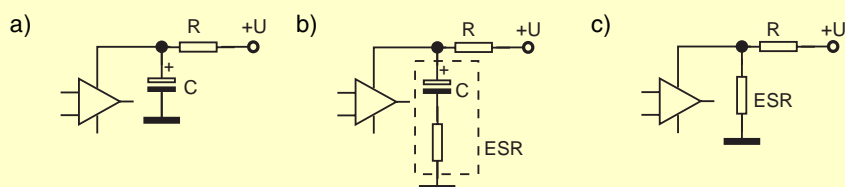
Także przy projektowaniu obwodów rezonansowych o dużej dobroci w niektórych przypadkach, na szczęście dość



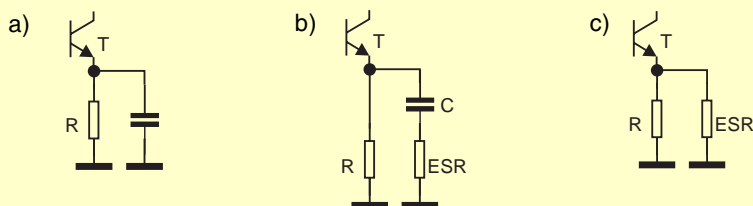
Rys. 3. Szeregowa rezystancja ESR zmniejsza skuteczność filtrowania w zakresie wysokich częstotliwości. Przy takich częstotliwościach kondensatory mają oporność (impedancję) znacznie większą niż wynika to ze wzoru na ich reaktancję pojemnościową:

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

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 odsprężenia 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? Policz, 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 0,0016Ω, czyli tyle, co nic. Jeśli jednak zmierzysz foliowy kondensator o takiej pojemności, nawet pochodzący od renomowanego wytwórcy, to jego reaktancja wyniesie około 3...10Ω (!) 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 najbliżej 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 zalakie-

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 zapominaj 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 uwzględnić, a kiedy nie mają żadnego wpływu na działanie układu.

A na dziś to wszystko.

Piotr Górecki