

Miernik rezystancji kondensatorów



Układ przeznaczony do badania właściwości wszelkich kondensatorów elektrolitycznych, zwłaszcza do przetwornic i zasilaczy.

- * pomiar rezystancji szeregowej ESR
- * możliwość pomiaru pojemności
- * sprawdzenie wzrostu temperatury w warunkach pracy
- * łatwa, intuicyjna obsługa
- * współpraca z dowolnym oscyloskopem

Tytuł projektu może się wydać spektakularnym efektem działalności chochlika drukarskiego. Tak jednak nie jest. Opisany przyrząd jest przystawką, pozwalającą mierzyć rezystancję wewnętrzną kondensatorów. Tylko początkujący elektronicy uważają, że pojemność to jedyny istotny parametr kondensatora. Wprawdzie pojemność rzeczywiście jest najważniejsza, jednak w wielu wypadkach pominięcie rezystancji wewnętrznej spowoduje, że układ nie będzie pracował według założeń, a nawet może ulec uszkodzeniu.

Oto uzasadnienie. Obecnie wiele urządzeń zawiera przetwornice, zasilacze impulsowe i podobne układy, gdzie kondensatory elektrolityczne filtrują przebiegi o częstotliwościach rzędu dziesiątek a nawet setek kiloherców. Kondensatory te są gwałtownie ładowane i rozładowywane - płynnie przez nie znaczny prąd (zmienny) o dużej częstotliwości. W ogromnej większości przypadków nie trzeba wgłębiać się w szczegóły (które są krótko omówione w końcowej części artykułu). Wystarczy pamiętać o istnieniu rezystancji szeregowej, czyli rozpatrywać prościutki układ zastępczy z rysunku 1. Prąd zmienny przepływający przez kondensator płynie także przez rezystancję szeregową R_s , co oczywiście powoduje wydzielanie się ciepła (Joule'a). Moc strat cieplnych określa znany wzór:

$$P = I^2 * R_s$$

Kondensator podczas pracy niewątpliwie będzie się nagrzewał. Ponieważ rezystancja R_s nie jest stała, tylko zależy (między innymi) od częstotliwości, problem nadmiernego wzrostu temperatury „elektrolitów” daje o sobie znać głównie w układach przetwornic i zasilaczy impulsowych. Nic więc dziwnego, że dla kondensatorów elektrolitycznych podaje się żywotność w temperaturze +85°C lub +105°C. Kluczowe znaczenie ma tu nie maksymalna temperatura otoczenia, tylko podwyższona temperatura wnętrza kondensatora, związana z wydzielaniem się ciepła na rezystancji szeregowej.

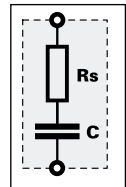
Z podanego uzasadnienia jasno widać, że zastosowanie w układzie filtra kondensatora o zbyt dużej rezystancji szeregowej R_s może doprowadzić do wzrostu temperatury wnętrza kondensatora znacznie powyżej +100°C, co w krótkim czasie doprowadzi do awarii.

Problem rezystancji szeregowej kondensatorów występuje także w innych dziedzinach, między innymi w obwodach antenowych nadajników radiowych, a w mniejszym stopniu także w obwodach filtrów klasycznych zasilaczy z transformatorem sieciowym 50Hz. Dlatego każdy elektronik powinien przynajmniej z grubsza rozumieć problem rezystancji kondensatorów i umieć ją zmierzyć.

Rezystancja R_s , pokazana na **rysunku 1**, nazywana jest bardzo często ESR - Equivalent Series Resistance, czyli dosłownie zastępczą rezystancją szeregową. W tym artykule, zamiast ESR, będzie ona konsekwentnie oznaczana R_s .

Niestety, szkodliwej rezystancji wewnętrznej z rysunku 1 nie można zmierzyć omiarem. Trzeba ją badać metodami nieco bardziej skomplikowanymi. Opisany dalej przyrząd jest przystawką, pozwalającą określić wartość tej rezystancji za pomocą jakiegokolwiek oscyloskopu. Układ przeznaczony

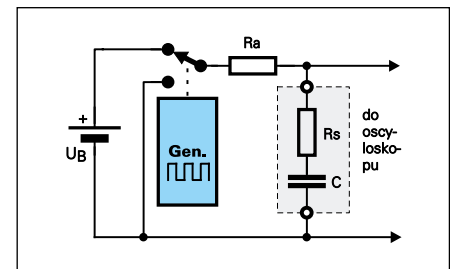
jest przede wszystkim do pomiaru „elektrolitów”, zarówno aluminiowych, jak i tantalowych, ale można nim mierzyć również rezystancję szeregową kondensatorów stałych (foliowych i ceramicznych) o pojemnościach powyżej 10nF. Układ nie jest natomiast przeznaczony do badań kondensatorów w.c.z. o małej pojemności.



Rys. 1

Opis układu

Podstawową zasadą działania miernika, a właściwie oscyloskopowej przystawki do pomiaru rezystancji kondensatorów, ilustruje **rysunek 2**. Badany kondensator jest na przemian ładowany i rozładowywany znacznym prądem przez rezystor R_a .

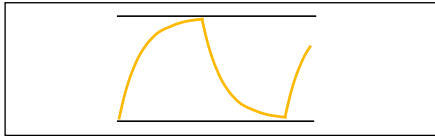


Rys. 2

Gdyby kondensator był idealny, przebiegi wyglądałyby na przykład tak, jak na **rysunku 3**. Ale żaden kondensator nie jest idealny. Jak pokazuje **rysunek 4a**, w czasie ładowania oscyloskop pokazuje sumę spadku napięcia na rezystancji R_s i napięcia na „czystej pojemności” C . Natomiast w czasie rozładowania napięcie na zaciskach kondensatora jest różnicą napięcia na „czystym kondensatorze” i spadku napięcia na rezystancji R_s - **rysunek 4b**

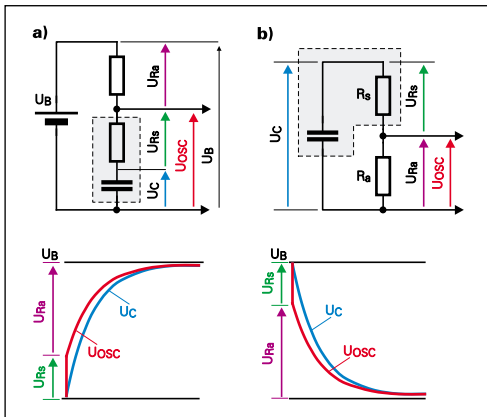
pokazuje sytuację, gdy kondensator został wcześniej naładowany do napięcia U_B . W pierwszej chwili po włączeniu tranzystora T3, napięcie na „czystym kondensatorze” wynosi U_B , a w obwodzie zacznie płynąć prąd o wartości

$$I = U_B / (R_s + R_a)$$

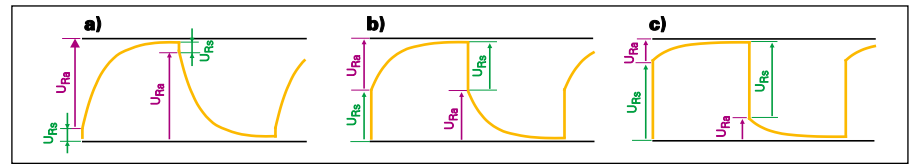


Rys. 3

Rys. 4



Jak widać, napięcie U_B podzieli się na dwie części: spadek napięcia na R_s oraz napięcie na R_a , obserwowane na oscyloskopie. Przebieg oglądany na oscyloskopie, zaznaczony linią czerwoną, będzie miał swego rodzaju „schodki” - w chwili przełączania pojawi się wyraźny pionowy odcinek, związany z obecnością rezystancji wewnętrznej R_s . **Rysunek 5** pokazuje kilka przypadków. Przy jakiejś niewielkiej rezystancji R_s przebiegi będą wyglądać jak na rysunku 5a. Rysunek 5b pokazuje sytuację,



Rys. 5

gdy $R_a = R_s$. Gdy rezystancja R_s jest większa od rezystancji R_a , wtedy przebiegi wyglądają mniej więcej tak, jak na rysunku 5c. Długości odcinków U_{Ra} , U_{Rs} z rysunków 4, 5 są proporcjonalne odpowiednio do zewnętrznej rezystancji R_a i rezystancji R_s kondensatora. Rysunek 4 pokazuje, że podana zależność jest słuszna w każdej chwili ładowania i rozładowania, ale w praktyce trzeba mierzyć wysokość „schodków” w chwili przełączania - zobacz rysunek 5. Tym samym rezystancję R_s można określić, mierząc na ekranie długość odcinków U_{Ra} , U_{Rs} i porównując z aktualną wartością R_a , wynikającą z ustawienia przełącznika P1 bądź P2.

W praktyce niekoniecznie trzeba obliczać dokładną wartość rezystancji R_s . Zresztą ze względu na niecodzienne właściwości kondensatora, omówione w dalszej części artykułu, dolna część „schodka” będzie zaokrąglona. Nie jest to istotne. Najważniejszy jest fakt, że kondensator podczas testów pracuje w warunkach zbliżonych do naturalnych i można w bardzo prosty sposób sprawdzić, na ile się grzeje. Grzanie to, jak wspomniano, wynika z przepływu prądu przez rezystancję szeregową R_s . Zazwyczaj wystarczy porównanie „na oko” właściwości kilku kondensatorów o różnych pojemnościach, napięciach pracy i różnej budowie. Czym wyższy „schodek”, tym większa rezystancja R_s i tym więcej będzie się grzał kondensator.

Często okaże się, że „tantal”, o znacznie mniejszej pojemności, albo zwykły „elektrolit”, o mniejszej pojemności i większym napię-

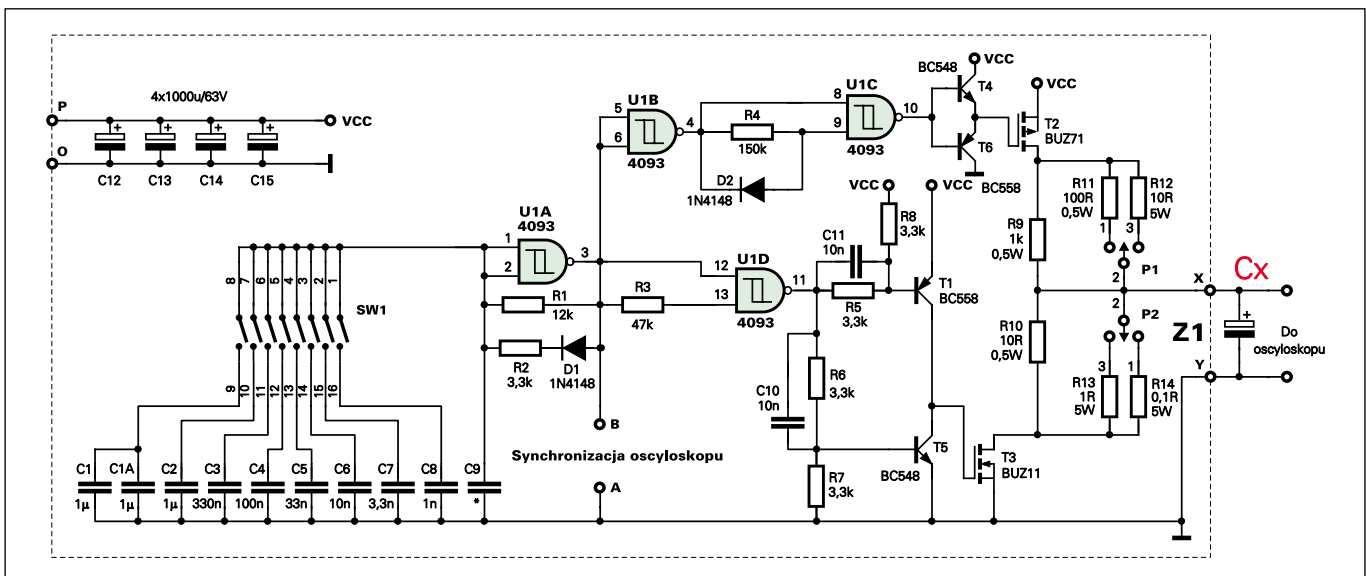
ciu pracy, jest znacznie lepszy od „elektrolita”, którego pojemność i napięcie pracy wydawałyby się wystarczające do danego zastosowania.

Schemat ideowy układu pomiarowego jest pokazany na **rysunku 6**. Bramka U1A jest generatorem przebiegu prostokątnego. Częstotliwość można zmieniać w bardzo szerokim zakresie, dołączając równolegle do C9 dowolne kondensatory C1...C8.

Ze względu na obecność diody D1 i rezystora R2, współczynnik wypełnienia przebiegu na nóżce 3 U1A wynosi około 20%. Przebieg ten steruje ładowaniem i rozładowaniem badanego kondensatora Cx, dołączonego do zacisku ARK2, oznaczonego Z1.

Gdy na wyjściu generatora U1A pojawia się stan niski, zostaje otwarty tranzystor T2, a T3 jest zamknięty. Badany kondensator Cx ładuje się przez obwód z rezystorami R9, R11, R12 (zależnie od ustawienia przełącznika P1). Gdy z kolei na wyjściu generatora U1A pojawi się stan wysoki, zatyka się T2 a odtyka T3. Badany kondensator zostaje rozładowany w obwodzie z elementami R10, R13, R14. Trzy pozycyjne przełączniki P1 i P2 umożliwiają zmianę rezystancji (prądu) ładowania i rozładowania w szerokich granicach. Nie bez przyczyny przewidziano czas ładowania znacznie dłuższy od czasu rozładowania, a prąd ładowania radykalnie mniejszy od prądu rozładowania - porównaj wartości rezystancji R9, R11, R12 oraz R10, R13, R14. Przyczyna jest jak najbardziej praktyczna. Kondensatory o dużej pojemności mają niewielką rezystancję szeregową, i aby ją zmierzyć, trzeba pracować przy odpowiednio dużych prądach. Opisywana przystawka podczas pracy będzie dołączona do jakiegoś zasilacza. Aby nie obciążać nadmiernie zasilacza,

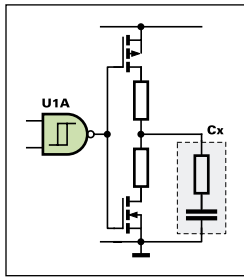
Rys. 6 Schemat ideowy



wykorzystano przebieg sterujący o niewielkim współczynniku wypełnienia. Tym samym kondensator można naładować stosunkowo niewielkim prądem przez dłuższy okres, a potem szybko rozładować dużym prądem, umożliwiając pomiar nawet niewielkiej rezystancji R_s . Dzięki temu zastosowany zasilacz nie musi mieć dużej wydajności prądowej - całkowicie wystarczy wydajność 1A, a nawet mniej.

Ponieważ zastosowany zasilacz może mieć kiepskie parametry wyjściowe, w przystawce przewidziano miejsce na cztery duże kondensatory filtrujące. Kondensatory o wyższym napięciu nominalnym mają rezystancję R_s mniejszą niż podobne o niższym napięciu pracy. Choć w czasie pracy przyrząd będzie zasilany napięciem w zakresie 8...15V, kondensatory filtrujące C12...C15 powinny mieć napięcie nominalne 63V, ostatecznie 50V. Chodzi o to, by obwód zasilania miał jak najmniejszą rezystancję wewnętrzną. W tym wypadku jest to nader istotne, ponieważ przebieg na oscyloskopie ma odzwierciedlać tylko właściwości badanego kondensatora C_x , a nie kondensatorów filtrujących C12...C15.

O ile ogólna zasada działania przyrządu jest jasna, o tyle wyjaśnienia wymaga budowa obwodów sterujących z bramkami U1B...D i tranzystorami T1, T4...T6. Teoretycznie bramki MOSFET-ów T2, T3

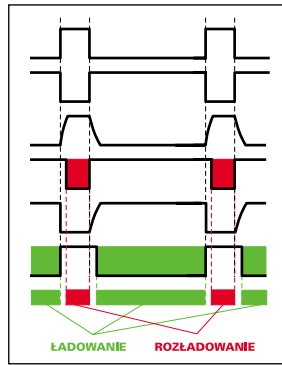


Rys. 7

mogłyby być sterowane wprost z wyjścia generatora U1A według rysunku 7 albo w inny prosty sposób. W pierwszej wersji przyrządu (o czym świadczy płytka modelu pokazanego na fotografii) przewidziano dodatkowe obwody podwajaczy napięcia z kondensatorami, które umożliwiałyby pełne otwieranie MOSFET-ów nawet przy napięciu zasilającym 4...6V. Próby wykazały, że obwody takie zdają egzamin przy mniejszych częstotliwościach. Jednocześnie podczas testów okazało się możliwe i celowe poszerzenie możliwości pomiarowych przez zwiększanie częstotliwości generatora. Dlatego przekonstruowano obwody sterujące, nadając im kształt jak na rysunku 6. Pary tranzystorów T1, T5 oraz T4, T6 umożliwiają szybkie ładowanie pojemności wejściowej tranzystorów MOSFET. T4 i T6 tworzą najprostszą symetryczny wtórnik. Tranzystory T1, T5 pracujące w układzie OE zastosowano tylko dlatego, by nie stosować jeszcze jednej bramki z następnej kostki CMOS. To wymusiło obecność rezystorów R5...R8 i kondensatorów przyspieszających C10, C11.

Zagadką może być obecność elementów R3, R4. Pełnią one ważną rolę. W pierwotnej wersji przewidziano były dwa dodatkowe kondensatory włączone między nóżki 9, 13 a masę. Testy wykazały, że kondensatory takie nie są potrzebne - całkowicie wystarczy pojemność wejściowa bramek CMOS, wynosząca 5...10pF. Rolę elementów opóźniających ilustrują przebiegi czasowe, pokazane na rysunku 8.

Jak widać, elementy R3, R4 zapobiegają jednemu z esnemu przewodzeniu tranzystorów T2, T3, a jednocześnie opóźniają przebiegi, umożliwiając obserwację na jakimkolwiek oscyloskopie wszystkich zbroczy kluczowych przebiegów. W większości przypadków, gdy na ekranie oscyloskopu widoczny będzie jeden pełny okres albo kilka okresów przebiegu, opóźnienie nie jest potrzebne. Przy bardziej szczegółowych badaniach, gdy obserwowany jest tylko początek przebiegu rozładowania, obwód opóźniania jest wręcz niezbędny. Wtedy oscyloskop jest synchronizowany (wyzwalany) zewnętrznym przebiegiem z generatora, czyli z punktu B, i dzięki opóźnieniu wprowadzanemu przez R3, R4 na ekranie oscyloskopu na pewno będzie widoczne całe



Rys. 8

zbrocze. Kto nie do końca zrozumiał, o co chodzi, przekona się o zaletach takiego opóźnienia podczas praktycznych prób.

Montaż i uruchomienie

Przystawkę można zmontować na płytce, pokazanej na rysunku 9. Montaż nie sprawi trudności. Montaż należy rozpocząć od wlotowania elementów najmniejszych. Pod układ scalony można dać podstawkę. Przelączniki P1, P2, zgodnie z fotografią, należy wlotować w płytkę. Rezystory R11...R14 należy wlotować nieco wyżej nad płytkę, co polepszy warunki ich chłodzenia.

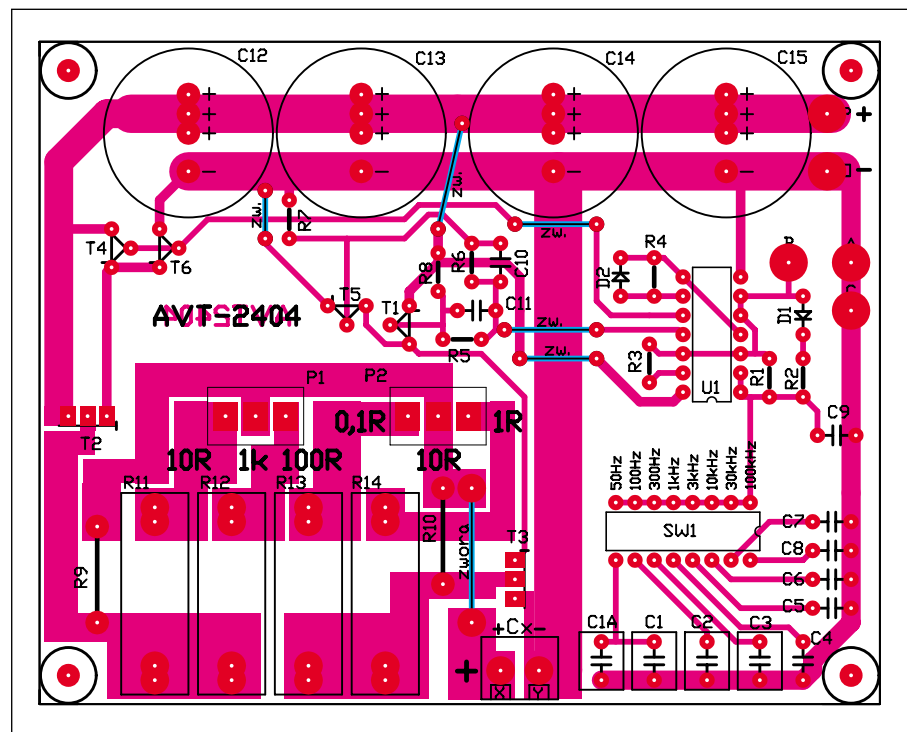
Nie należy oszczędzać na kondensatorach filtrujących C12...C15. Powinny mieć jak największą pojemność i jak najwyższe napięcie pracy. W modelu zastosowano dwa o pojemności 4700µF/50V.

Ponieważ układ jest przystawką i nie będzie używany codziennie, nie przewidziano obudowy. W rogach płytki umieszczono otwory, które mogą posłużyć do zmontowania nóżek.

Jak wspomniano, po testach modelu wprowadzono do układu zmiany, dlatego model pokazany na fotografii różni się kilkoma szczegółami od schematu i płytki z rysunków 6 i 9.

W egzemplarzu modelowym pokazanym na fotografii nie wmontowano kondensatora C9, a uzyskany zakres częstotliwości generatora okazał się całkowicie wystarczający do pomiaru wszelkich elektrolitów, których pojemność nie jest mniejsza niż 1µF. Kto chciałby jeszcze bardziej przesunąć w górę zakres częstotliwości generatora U1A i mierzyć

Rys. 9 Schemat montażowy



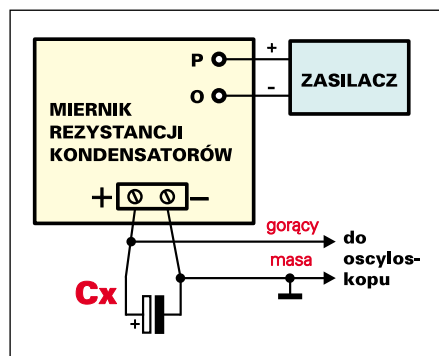
kondensatory stałe (foliowe i ceramiczne) o mniejszej pojemności, może proporcjonalnie zmniejszyć wartość R1 i R2, np. do 3kΩ, 1kΩ.

Pomiary

Pomiary wbrew pozorom przeprowadza się w bardzo prosty sposób. Co bardzo ważne, podobnie jak w przypadku miernika cewek, nie trzeba od razu rozumieć wszystkich szczegółów. Wystarczy pół godziny eksperymentów z różnymi kondensatorami, a wszystko stanie się jasne. Dlatego nie ma sensu tłumaczenie w artykule wszystkich zależności i opisywanie drobiazgowo możliwych przypadków. Trzeba po prostu trochę poeksperymentować przy różnych częstotliwościach i różnych ustawieniach przełączników P1, P2.

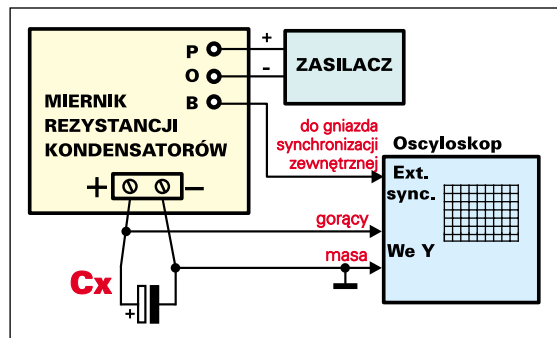
W większości przypadków należy zestawić układ według **rysunku 10**. Sondę oscyloskopu najlepiej dołączyć wprost do końcówek badanego kondensatora.

* Przy sprawdzaniu kondensatorów elektrolitycznych należy zwrócić baczną uwagę na biegunowość - odwrotne włączenie „elektrolita” spowoduje jego wybuch i poważne niebezpieczeństwo dla zdrowia (np. wybite oka).



Rys. 10

Rys. 11



Bardziej wnikliwi eksperymenciści, którzy będą chcieli zbadać bliższe szczegóły, wykorzystają wejście synchronizacji zewnętrznej oscyloskopu według **rysunku 11**.

Wartość napięcia zasilającego nie jest krytyczna. Nie powinno być niższe niż 8V ze względu na konieczność pełnego otwarcia MOSFET-ów. Nie może być większe niż

18V ze względu na obecność kostek CMOS. W większości przypadków układ będzie zasilany napięciem 9V lub 12V z zasilacza o wydajności 1A lub ostatecznie nawet 0,5A.

Przełącznik (DIP-switch) SW1 umożliwi dobór potrzebnej częstotliwości. Jeśli badany kondensator ma pracować w przetwornicy czy zasilaczu impulsowym, częstotliwość generatora U1A powinna być zbliżona do planowanej częstotliwości roboczej, by warunki pomiaru były jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych. Oczywiście generalnie biorąc, kondensatory można badać przy dowolnej częstotliwości pracy, co pozwoli zbadać zmiany rezystancji Rs w funkcji częstotliwości.

Przełączniki P1, P2, współpracujące z rezystorami R9...R14, umożliwiają skokową regulację prądu ładowania i rozładowania.

Aby obliczyć rezystancję Rs, należy ustawić za pomocą SW1 potrzebną częstotliwość (za pomocą oscyloskopu), dołączyć badany kondensator do zacisków Z1 i obserwować na oscyloskopie przebieg ładowania i rozładowania. Przełączając P1 i P2 należy doprowadzić do sytuacji, gdy wysokość „schodka” będzie wynosić 10...90% napięcia zasilającego.

Jak wyjaśniono wcześniej, porównując wysokość „schodka” z rezystancją ładowania lub lepiej rozładowania, można ze znaczną dokładnością oszacować wartość rezystancji szeregową.

W praktyce nie jest to konieczne.

Wystarczy porównać wysokość „schodka” kilku kondensatorów i sprawdzić wzrost temperatury w warunkach pracy zbliżonych do naturalnych.

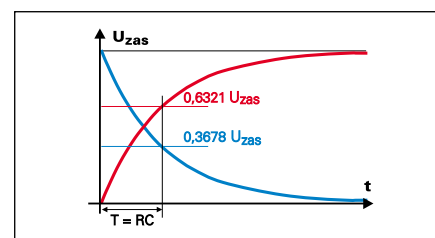
Na podstawie kształtu krzywej ładowania i rozładowania można także określić pojemność kondensatora. O ile rezystancję szeregową mierzy się przy dużych prądach, o tyle pojemność należy mierzyć przy prądach możliwie najmniejszych, czyli przy ustawieniach przełączników P1, P2 w środkowych położeńach. Wtedy „schodek” będzie mały, a wynik bardzo zbliżony do prawdy. Przy jak najmniejszej częstotliwości generatora należy odczytać na oscyloskopie stałą czasową $T = RC$, gdzie C to „czysta pojemność”, a R to suma rezystancji wewnętrznej Rs i rezystancji (roz)ładowania - czyli R10 bądź R9. Znając stałą czasową T, można obliczyć C

$$C = T / R$$

Stała czasowa $T=RC$ to czas, w którym napięcie na kondensatorze wzrośnie od zera do 63% napięcia zasilającego, albo też opadnie ze 100 do 37 procent wartości napięcia zasilającego. Ilustruje to **rysunek 12**. Tyle o pomiarze pojemności.

Oprócz sprawdzenia wysokości „schodka”, podczas pomiarów konieczne trzeba zwracać uwagę na temperaturę badanego

kondensatora. Testy układu modelowego wykazały, że przy najwyższych częstotliwościach i większych prądach bardzo łatwo przegrzać i nieodwracalnie uszkodzić nieduże, zwykłe, aluminiowe „elektrolity”.



Rys. 12

Tylko dla dociekliwych - schematy zastępcze

Każdy kondensator ma specyficzne właściwości i uproszczony schemat zastępczy z rysunku 1 zupełnie ich nie uwzględnia. Rysunek 13 pokazuje schemat zastępczy kondensatora, spotykany w wielu podręcznikach. Nie jest to wydumana teoria. Rzeczywisty kondensator naprawdę zachowuje się tak, jakby oprócz „czystej pojemności” miał wewnątrz rezystory i cewkę. Ma to duże znaczenie w układach w.c.z. Okazuje się bowiem, że przy odpowiednio dużych częstotliwościach kondensator zachowuje się... jak rezystor albo jeszcze gorzej, jak kiepskiej jakości cewka.

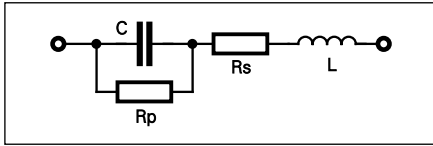
Rezystancja równoległa, oznaczona Rp, reprezentująca prąd upływu, zazwyczaj ma bardzo dużą wartość. Najczęściej można ją pominąć. Jedyne w niezaformowanych kondensatorach elektrolitycznych prąd upływu jest znaczny.

Gorzej jest ze znaną rezystancją szeregową Rs. Wynika ona z wielu czynników i niestety nie jest stała - zależy między innymi od częstotliwości.

Przy bardzo dużych częstotliwościach, rzędu megaherców, trzeba też uwzględnić indukcyjność doprowadzeń i elektrod. Indukcyjność ta (oznaczona L) powoduje, że kondensator zachowuje się jak szeregowy obwód rezonansowy. Dla jakiejś częstotliwości fg jego oporność (moduł impedancji) jest najmniejsza. Tylko poniżej tej częstotliwości kondensator jest godny swej nazwy. Powyżej tej częstotliwości zachowuje się jak cewka - jego oporność rośnie ze względu na wzrost reakcji indukcyjnej. Generalnie, czym większa pojemność kondensatora, tym mniejsza częstotliwość rezonansowa fg. Rysunek 14 pokazuje przebieg oporności (modułu impedancji) różnych kondensatorów: foliowych MKT, ceramicznych oraz „elektrolitów” o pojemnościach 1nF, 10nF, 100nF, 1μF, 10μF i 100μF.

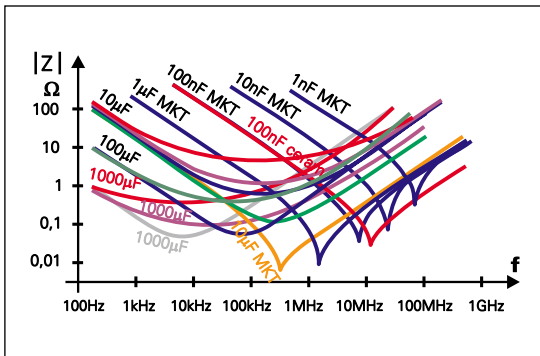
Początkującym elektronikom wydaje się, że zwiększenie pojemności kondensatora filtrującego czy (od)sprzęgającego nigdy nie zaszkodzi. Tymczasem **rysunki 13 i 14**

wskazują, że przy dużych częstotliwościach kondensatory o wysokich nominałach mogą się okazać nawet gorsze od mniejszych kondensatorów stałych. Tłumaczy to także, dlaczego zaleca się równolegle do „elektrolitów” stosować w obwodach zasilania równolegle kondensatory ceramiczne o wartości 10...100nF.

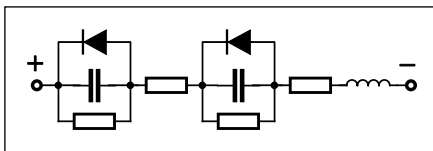


Rys. 13

Rys. 14

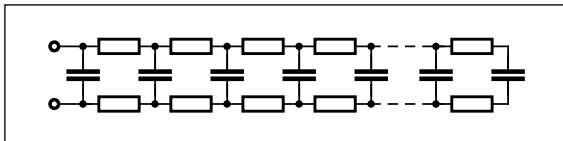


Trzeba lojalnie przyznać, że schemat zastępczy z rysunku 13 też nie uwzględnia wszystkich właściwości kondensatora. Zwłaszcza w kondensatorach elektrolitycznych występują nieoczekiwane zjawiska. Dlatego czasem w podręcznikach spotyka się inne schematy zastępcze „elektrolita”, na przykład jak na rysunkach 15 i 16. Łańcuch ogniwi RC z rysunku 16 na pewno powoduje jakieś opóźnienie - tym większe, im większa jest rezystancja. Ponadto, ze względu na to opóźnienie, czym większa częstotliwość, tym mniej sekcji jest czynnych. Przy dużych częstotliwościach czynne będą tylko pierwsze sekcje.



Rys. 15

Rys. 16



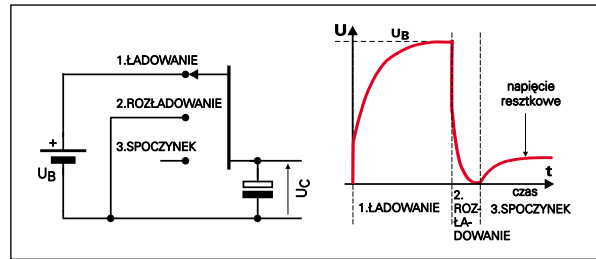
Nawet takie bardzo uproszczone rozumowanie tłumaczy, dlaczego wraz ze zwiększaniem częstotliwości pojemność kondensatora elektrolitycznego znacząco

maleje. To również ma znaczenie przy doborzeniu „elektrolitów” do filtrów przetwornic i zasilaczy impulsowych, pracujących przy częstotliwościach 15kHz...500kHz. Często się okazuje, że warto zastosować kilka mniejszych kondensatorów zamiast jednego większego.

Schemat zastępczy z rysunku 16 oraz rysunek 17 w pewnym stopniu ilustrują kolejne szkodliwe zjawisko. Chodzi o to, że kondensatory (nie tylko elektrolityczne) nie dają się w pełni rozładować w krótkim czasie. Kondensator naładowany ze źródła napięcia o jakiejś rezystancji wewnętrznej, po zwarciu zacisków zostaje rozładowany przez niewielką rezystancję ścieżek i przewodzącego tranzystora MOSFET. Niestety, nie rozładuje się całkowicie. Choć w drugiej fazie napięcie na zaciskach kondensatora szybko zmaleje do zera, jednak po rozwarciu zacisków znów pojawi się na nich jakieś napięcie. Co ciekawe, napięcie to narasta stopniowo. Właśnie schemat zastępczy z rysunku 16 tłumaczy zachowanie kondensatora podczas takiej próby (w niektórych kondensatorach stałych także występuje podobne zjawisko, ale napięcie resztkowe jest znacznie mniejsze - w grę wchodzi tam inne subtelne zjawisko, tzw. absorpcja dielektryczna). Nie tłumaczy go natomiast ani najprostszy schemat zastępczy z rysunku 1, ani z rysunku 14. Gdyby kondensator zachowywał się jak układ zastępczy z rysunku 1, po zwarciu i rozwarciu końcówek ewentualne napięcie resztkowe (rys. 17) pojawiałoby się skokowo.

Oprócz tych cech, można rozpatrywać jeszcze inne - np. wpływ temperatury, starzenie, itp. Nie jest to jednak temat artykułu. W każdym razie praktyczne konsekwencje opisywanych zjawisk dają się boleśnie odczuć nie tylko w układach filtrów przetwornic, ale na przykład przy próbach skonstruowania generatora przebiegu prostokątnego o małym współczynniku wypełnienia - kondensatory, zwłaszcza wszelkie elektrolity, nie dadzą się szybko rozładować - porównaj rysunki 16 i 17. Właśnie kłopoty z takim generatorem zaowocowały powstaniem opisywanego przyrządu.

Powyższe rozważania wskazują, że nawet tak „prymitywny” element jak kondensator może w niektórych układach spowodować przykre niespodzianki. Dlatego każdy, kto próbuje konstruować jakiegokolwiek układy elektroniczne, powinien wykonać opisany miernik, przetestować posiadane kondensatory i wyrobić sobie jasną opi-



Rys. 17

nię o rezystancji szeregowej zwykłych aluminiowych „elektrolitów”, „tantali” oraz kondensatorów stałych foliowych i ceramicznych o większych pojemnościach (powyżej 100nF).

Piotr Górecki
Zbigniew Orłowski

Wykaz elementów

Rezystory

R1	.....	12kΩ
R2,R5-R8	.....	3,3kΩ
R3	.....	47kΩ
R4	.....	150kΩ
R9	.....	1kΩ 0,5W
R10	.....	10Ω 0,5W
R11	.....	100Ω 0,5W
R12	.....	10Ω 5W
R13	.....	1Ω 3W
R14	.....	0,1Ω 5W

Kondensatory

C1,C1A,C2	.....	1μF
C12-C15	... 4szt. 1000μF/63V lub 2szt. 2200μF/63V lub 2szt. 4700μF/50V	
C3	.....	330nF
C4	.....	100nF
C5	.....	33nF
C6,C10,C11	.....	10nF
C7	.....	3,3nF
C8	.....	1nF
C9	.....	0...82pF (75pF)

Półprzewodniki

D1,D2	.....	1N4148
T1	.....	BC558
T2	.....	BUZ71
T3	.....	BUZ11
T4,T5	.....	BC548
T6	.....	BC558
U1	.....	4093

Pozostałe

P1,P2	....	przełącznik 3-pozycyjny jednoobwodowy
SW1	.....	DIP SWITCH 8
ARK2	.....

Komplet podzespołów z płytką jest dostępny w sieci handlowej AVT jako kit szkolny AVT-2404