

Elektronika dla juniora (i seniora), czyli elektroniczne przedszkole

Spotkanie 6: Kondensatory, przebiegi zmienne

W EdW 1/2016, w związku z jubileuszem 20-lecia czasopisma rozpoczęliśmy elementarny kurs podstaw elektroniki dla najmłodszych i starszych, którzy chcieliby przypomnieć sobie podstawy. Założeniem jest, że młodzieńki

„uczeń” nie zostanie pozostawiony sam sobie, bo proponowane ćwiczenia ma wykonywać z kimś choć troszkę starszym i doświadczonym. Oprócz rodziców może to być starsze rodzeństwo albo ktoś z rodziny lub przyjaciół.

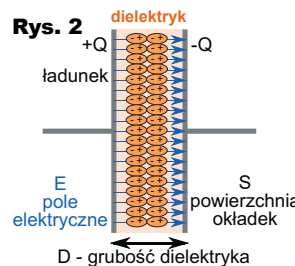
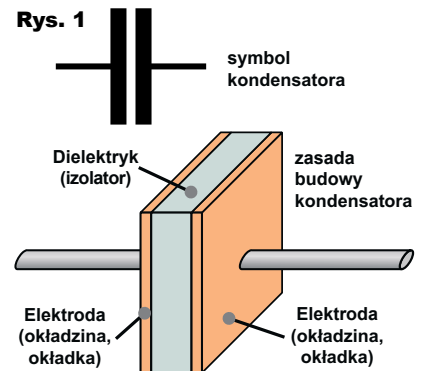
Drugie (obok rezystorów) najbardziej popularne elementy elektroniczne to **kondensatory**. Symbol i budowa kondensatora pokazane są na **rysunku 1**. Elektrody (okładki) są rozdzielone warstwą izolatora (dielektryka), więc zasadniczo *przez kondensator nie może płynąć prąd (stały)*. W przypadku kondensatora nie możemy mówić o jego rezystancji ($R = U/I$) bo przy napięciu stałym prąd jest równy zeru, więc rezystancja kondensatora dla napięcia/prądu stałego jest nieskończenie wielka.

Jednak przez kondensator może płynąć prąd – podczas ładowania i rozładowania. Jak pokazuje „podręcznikowy” **rysunek 2** (z Wikipedii), możliwa jest polaryzacja dielektryka (rozdzielenie ładunków). W największym uproszczeniu można to rozumieć, że w dielektryku ładunki elektryczne są uwięzione, ale nie „sztywno”, tylko umieszczone są „na sprężynkach”. Można je odchyłać od położenia równowagi, ale do tego potrzebna jest energia, dostarczona z zewnątrz. Z kolei „sprężynki” odchylone od położenia równowagi mogą posiadaną energię oddać. Już to wskazuje, że w kondensatorze można zgromadzić porcję energii. Następuje to, gdy z zewnątrz dołączymy doń źródło napięcia – wtedy przez chwilę popłynie tzw. *prąd ładowania* kondensatora, który spowoduje rozdzielenie ładunków (odchylenie sprężynek).

Mówimy wtedy, że na okładzinach kondensatora zgromadziły się ładunki. Gdy następnie odłączymy napięcie, kondensator pozostanie naładowany i będzie w nim zgromadzona (niewielka) porcja energii. Może on wtedy stać się źródłem zasilania, podobnie jak mała bateria – wtedy może popłynąć *prąd rozładowania* kondensatora.

Podstawowym parametrem jest wskazująca na zdolność gromadzenia energii **pojemność** oznaczana literą **C**, podawana w faradach [F] (nazwa jednostki pochodzi od nazwiska angielskiego uczonego Michaela Faradaya), drugim kluczowym parametrem jest **maksymalne napięcie**, powyżej którego może nastąpić przebicie dielektryka i uszkodzenie.

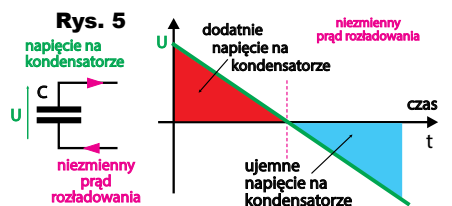
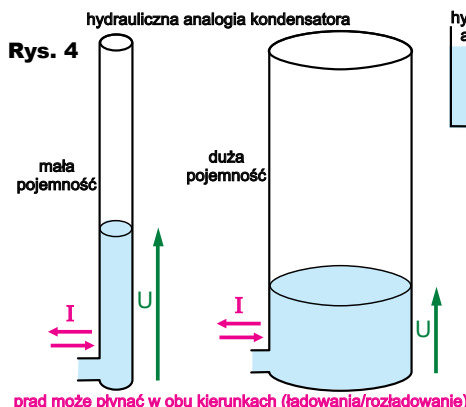
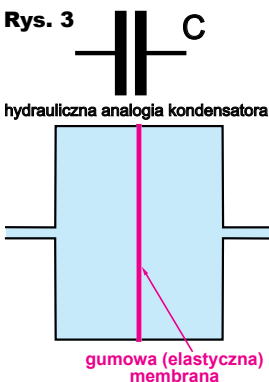
Za hydrauliczną analogię kondensatora należałoby w zasadzie uznać „puszkę z gumową przegrodą – membraną” według **rysunku 3**. Jednak ważne aspekty jego działania lepiej obrazuje zbiornik, pionowa rura według **rysunku 4**, gdzie przekrój rury jest odpowiednikiem pojemności **C**, a wysokość – maksymalnego dopuszczalnego napięcia. Podczas pracy poziom wody w rurze odpowiada napięciu **U**, jakie

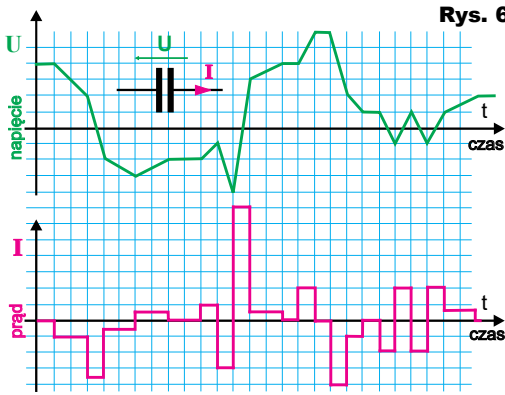


aktualnie występuje na końcówkach kondensatora. Ilość zgromadzonej energii zależy i od pojemności (przekroju rury), i od napięcia (wysokości słupa wody):

$$E = 0,5 \cdot C \cdot U^2$$

Właściwości naładowanego kondensatora są podobne, ale nie w pełni, do małej baterii/akumulatora, której hydrauliczny odpowiednik też jest pokazany na rysunku 4. Model „z membraną” rysunku 3 jest o tyle dobry, że kondensator jest elementem niebiegunowym, czego nie obrazuje w pełni model „z rurą”. Mianowicie można naładować kondensator napięciem o jakiejś biegunowości i tym samym zgromadzić w nim porcję energii. Jeżeli potem wymusimy przepływ niezmiennego prądu „rozładowującego”, to napięcie będzie liniowo zmniejszać się do zera. To akurat dobrze obrazuje też model „z rurą”. Ale jeśli nadal wymuszony będzie przepływ prądu w tym samym kierunku, to kon-



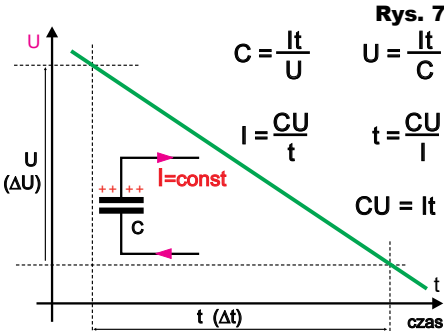


Rys. 6 przez kondensator. Przeanalizuj rysunek 6 i „poczuj” zależność prądu i napięcia w kondensatorze. Jak już wiesz, w „klasycznym” rezystorze prąd I wiąże z napięciem U rezystancja R : $I = U/R$. Natomiast w kondensatorze mamy dość prostą, ale dziwną zależność między prądem i napięciem, gdzie w grę wchodzi szybkość zmian, a więc... czas. Możemy to zapisać prostym wzorem:

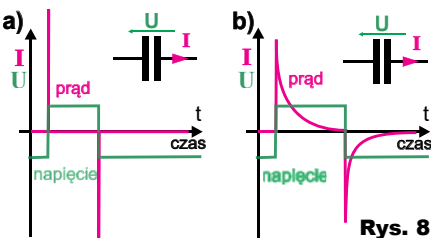
$$I = C \cdot dU/dt$$

gdzie dU/dt to właśnie *szybkość zmian napięcia* (U) w czasie (t).

To oznacza, że najwzyczajniejszy kondensator przeprowadza matematyczną operację **różniczkowania** (różniczkuje napięcie). Jednocześnie przeprowadza też matematyczną operację **całkowania** (całkuje prąd – napięcie na kondensatorze jest całką prądu w czasie). Kilkadziesiąt lat temu wykorzystywano kondensatory w tzw. komputerach analogowych właśnie do realizacji różniczkowania i całkowania. Ty jednak nie musisz zwracać sobie głowy matematyką, poczuj tylko podstawową zależność prądu i szybkości zmian napięcia. W praktyce przy liniowych zmianach prądu (przy jednostajnym wzroście lub zmniejszaniu napięcia kondensatora w czasie) powyższy wzór możemy zapisać w postaci $I = C \cdot \Delta U/\Delta t$, a nawet uprościć go jeszcze bardziej: $I = CU/t$. Dość często wykorzystujemy też przekształcone formy tej prostej



Rys. 7



Rys. 8

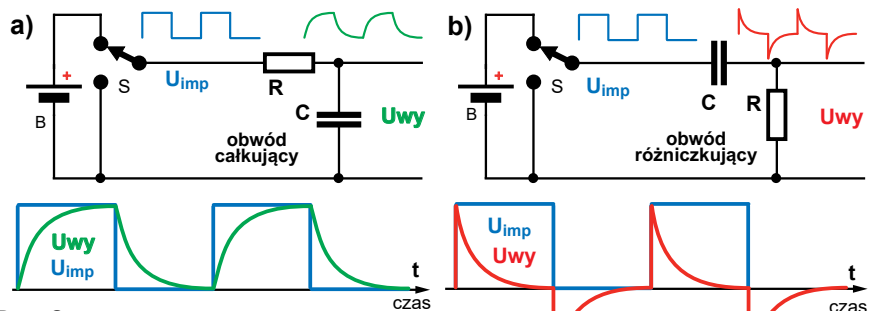
densator zacznie się ładować napięciem o przeciwnym kierunku, jak pokazuje to rysunek 5. Tym szczegółem na razie nie musisz się zajmować.

Ważniejsza jest inna sprawa. Otóż uproszczony model „z rurą” z rysunku 4 dobrze ilustruje ogromnie ważną, choć na pozór oczywistą właściwość kondensatora. Zwróć na to uwagę, bowiem będzie to bardzo potrzebne przy omawianiu właściwości cewek, które mają właściwości „odwrotne” niż kondensatory. Otóż **kondensator „bardzo nie lubi” gwałtownych zmian napięcia** (bo „nie lubi” gwałtownych zmian energii). Nagła zmiana poziomu wody w rurze (napięcia kondensatora) musiałaby wiązać się z błyskawicznym napływem lub odpływem dużej ilości wody (ogromnego prądu). *Nie można nagle, skokowo zmienić napięcia kondensatora, bo musiałoby to się wiązać z przepływem nieskończenie wielkiego prądu.* W kondensatorze występuje specyficzna, ale w sumie prosta zależność: **prąd płynący przez kondensator jest wprost proporcjonalny do szybkości zmian napięcia.** Patrząc z drugiej strony: **szybkość zmian napięcia w czasie jest wprost proporcjonalna do prądu, jaki (chwilowo) płynie**

zależności: $C = It/U$, $U = It/C$, $t = CU/I$. Zilustrowane jest to na rysunku 7. Prąd ma tu stałą wartość, a zmiany napięcia są liniowe.

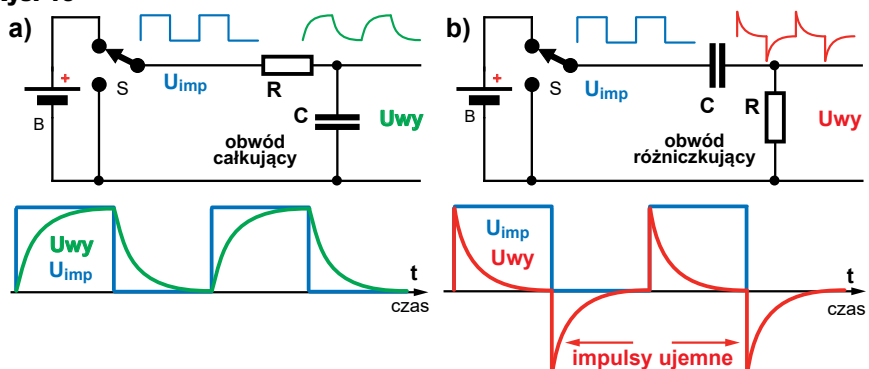
Działanie kondensatora jest naprawdę bardzo proste: *prąd jest proporcjonalny do szybkości zmian napięcia*. O ile na rysunku 7 mamy niezmienny prąd rozładowania i liniowe zmiany napięcia, o tyle w większości przypadków zmiany te będą nieliniowe. Na przykład przy nagłej, gwałtownej zmianie napięcia, na przykład po dołączeniu do baterii, prąd kondensatora powinien być... nieskończenie wielki (przez nieskończenie krótką chwilę), jak pokazuje rysunek 8a. (porównaj rysunek 6). Tak! Teoretycznie tak. Ale prąd nie będzie nieskończenie wielki, bo każda bateria ma ograniczoną wydajność prądową, reprezentowaną przez jej rezystancję wewnętrzną. Nie wchodząc w szczegóły: przebiegi wyglądałyby raczej jak na rysunku 8b.

W praktyce często mamy do czynienia z tak zwanymi obwodami całkującymi – opóźniającymi oraz różniczkującymi, skracającymi według rysunku 9a, gdzie występują przebiegi, pokazane na rysunku 9b. W pierwszej chwili po dołączeniu baterii kondensator jest pusty i w tej pierwszej chwili... stanowi zwarcie – napięcie na nim (U_C) jest równe zero, a prąd ma wartość maksymalną $I_{max} = U_R/I = U_{ZAS}/R$. Potem napięcie na kondensatorze U_C płynnie rośnie, bo kondensator ładuje się płynnym



Rys. 9

Rys. 10



prądem, a przez to zmniejsza się napięcie na rezystorze U_R (ich suma zawsze jest równa napięciu zasilania U_{ZAS}). Prąd ($I = U_R/R$) zmniejsza się tak samo jak napięcie U_R . W związku z takim odejmowaniem napięć, przebiegi napięcia i prądu w czasie są opisane dziwnymi wzorami, zawierającymi liczbę e (2,7182818...) – podstawę logarytmów naturalnych, podniesioną do ujemnej potęgi. We wzorach występuje też tzw. stała czasowa RC ($T=RC$). Jest to czas, po którym napięcie/prąd zmienia się o 63,2% względem wartości maksymalnej, jak pokazuje dokładniej rysunek 10.

Ćwiczenia

A teraz bardzo ważne ćwiczenia, gdzie kondensator pracuje jako mały, pomocniczy zbiornik energii.

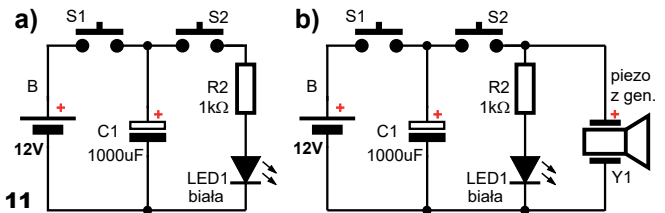
Otóż bardzo trudno zbudować kondensator o pojemności jednego farada (1F). Istnieją wprawdzie „superkondensatory” o pojemnościach od 0,05 do nawet 3000 faradów (!), ale jak na razie są bardzo rzadko używane. W praktyce wykorzystujemy kondensatory o pojemności od 1pF (jednej bilionowej farada) do kilkudziesięciu milifaradów (czyli poniżej 0,1 farada). Ilość gromadzonej w nich energii jest niewielka. Naładowany duży kondensator (elektrolityczny) o pojemności 10000 mikrofaradów ($10000\mu F = 10mF$) przy napięciu 1,5V gromadzi energię tylko 0,011J (dziesiąta wateosekundy). Przy napięciu 9V ilość zgromadzonej energii to 0,4J (0,4Ws), a przy maksymalnym dla tego kondensatora napięciu 25V zgromadzi on około 3Ws. A tymczasem alkaliczny „mały paluszek” AAA zawiera około 4000Ws, czyli 1,1Wh (watogodziny), a 9-woltowy „błoczek” około 13000Ws (=3,6Wh), czyli tysiące razy więcej.

Przekonajmy się, jak to wygląda w praktyce W układzie z rysunku 11a (uwaga na biegunowość!) najpierw naciśnij S1 na co najmniej sekundę i naładuj kondensator C1 (1000uF) napięciem 9...12V. Następnie naciśnij S2 przez co do kondensatora dołączysz białą diodę LED zasilaną przez rezystor 1kΩ. Jak długo dioda będzie świecić sensownym blaskiem?

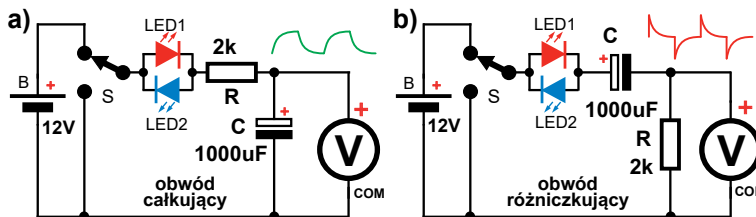
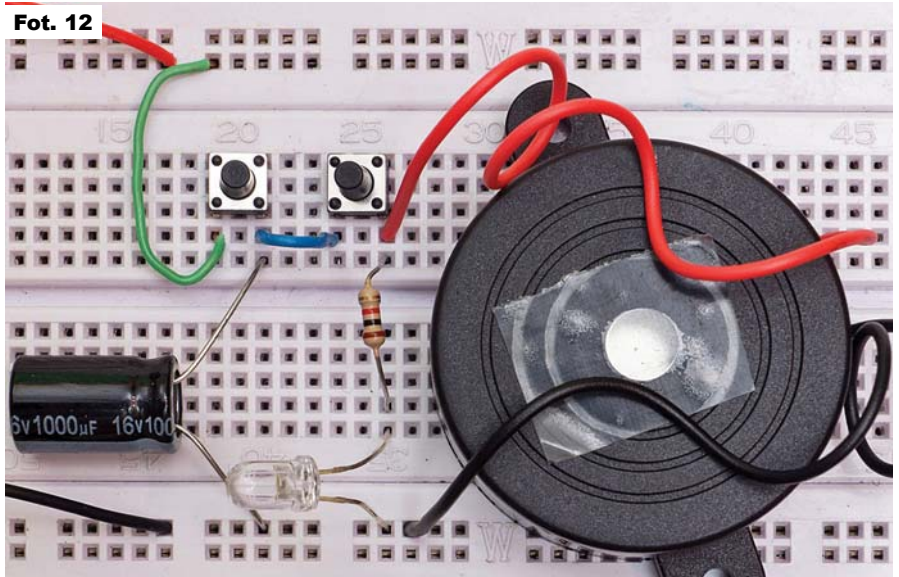
Następnie obok diody LED dołącz też brzęczyk piezo według rysunku 11b i fotografii 12. Na jak długo starcza takie źródło zasilania? A jak będzie po wymianie C1 na 10000uF? A na 100uF, 10uF i 1uF?

Przeprowadź te ćwiczenia – każdy elektronik powinien mieć orientację, ile energii można zgromadzić w kondensatorze.

Rys. 11



Fot. 12



Rys. 13

Zbadaj też właściwości obwodów całkującego (pozwalającego opóźnić zmiany napięcia) oraz różniczkującego (pozwalającego wytwarzać krótkie impulsy) według rysunku 13 i fotogra-

fii 14. Diody LED1, LED2 pokażą przepływ prądu – jego kierunek i wielkość, natomiast woltmierz to monitor napięcia wyjściowego. Możesz zmieniać wartości C i R. Zwróć uwagę na biegunowość napięcia wskazywanego przez miernik. Czy przebiegi odpowiadają tym z rysunków 9, 10?

Na następnym spotkaniu omówimy oznaczenia oraz niedoskonałości kondensatorów.

Piotr Górecki

Fot. 14

