

Elektronika dla juniora (i seniora), czyli elektroniczne przedszkole

Spotkanie 7: Niedoskonałości kondensatorów

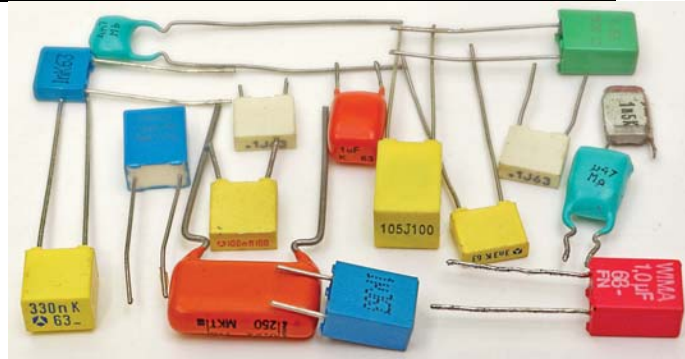
W EdW 1/2016, w związku z jubileuszem 20-lecia czasopisma, rozpoczęliśmy elementarny kurs podstaw elektroniki dla najmłodszych i starszych, którzy chcieliby przypomnieć sobie podstawy. Założeniem jest, że młodzieńki

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

Zgodnie z zapowiedzią zajmiemy się wadami kondensatorów. Otóż aby uzyskać dużą pojemność, kondensator powinien mieć jak największą powierzchnię elektrod oraz jak najcieńszy i „dobry jakościowo” dielektryk. Niestety, nie ma idealnego dielektryka i w związku z różnymi problemami i kompromisami, produkowano i produkuje się wiele rodzajów kondensatorów. Poszczególne rodzaje i odmiany mają swoje zalety i wady. Kondensator kondensatorowi nierówny i w wielu zastosowaniach zastosowanie jakichkolwiek, pierwszych z brzegu kondensatorów może okazać się dużym błędem. To szeroki temat, którego nie zgłębimy w ramach naszego kursu. Natomiast celem tego spotkania jest wyczerlenie Cię na problem niedoskonałości elementów elektronicznych, nie tylko kondensatorów.

Poszczególne odmiany kondensatorów oznaczane są w różny sposób. Zazwyczaj podaje się pojemność i napięcie maksymalne, czasem też tolerancję. Przykłady oznaczania masz na **rysunku 3**. Małutkie kondensatory ceramiczne do montażu powierzchniowego (SMD) zazwyczaj w ogóle nie mają żadnych oznaczeń na obudowie – **fotografia 4**.

Zasadniczo kondensator jest elementem niebiegunowym. Jednak kłopot z uzyskaniem dużej pojemności powoduje, że od dawna często wykorzystywane są tak zwane **kondensatory elektrolityczne**, zwane potocznie „elektrolitami”. Przykłady na **fotografii 5**. Z uwagi na specyficzną budowę, **kondensatory elektrolityczne są elementami biegunowymi** – w EdW 4/2016 na fotografii 8 na str. 28 pokazane było, co pozostaje po wybuchu takiego kondensatora, odwrotnie podłączonego do akumulatora. Duża pojemność wynika ze znikomej grubości dielektryka. W najpopularniejszych kondensatorach elektrolitycznych aluminiowych znakomitym izolatorem jest cienka warstwa tlenku glinu (Al_2O_3), wytworzona na powierzchni trawionej (matowej) folii aluminiowej, natomiast ciekły elektrolit wypełniający obudowę nie jest izolatorem, tylko przewodzącym składnikiem drugiej okładki kondensatora. Kondensatory elektrolityczne



Fot. 1



Fot. 2

Niedoskonałości kondensatorów

Od dziesięcioleci bardzo popularne są też **kondensatory ceramiczne**, gdzie dielektrykiem są odmiany spieków ceramicznych o różnym składzie. Dawniej produkowano jednak tylko kondensatory ceramiczne o niewielkiej pojemności. W ostatnich dziesięcioleciach opracowano nowe rodzaje ceramiki, pozwalające uzyskać dużą pojemność przy niewielkich rozmiarach. Niestety, nie ma nic za darmo: w zależności od typu zastosowanej ceramiki (typ I, II, III) uzyskujemy albo dużą stabilność parametrów (typ I), albo dużą pojemność (typ II, III). **Fotografia 2** pokazuje różne kondensatory ceramiczne w klasycznych obudowach przewlekanych (THT).

Kod cyfrowy (MIL)				
Oznaczenie	1 cyfra znacząca	2 cyfra znacząca	3 cyfra licząca zer	Wartość
471	4	7	0	=470
682	6	8	00	=6800
153	1	5	000	=15000
104	1	0	0000	=100000
335	3	3	00000	=3300000
226	2	2	000000	=22000000

Rezystory – rezystancja w **omach**
Kondensatory – pojemność w **pikofaradach**
Dławiki (cewki) – indukcyjność w **mikrohenrach**

	tolerancja	- napięcie pracy
N	±30%	m 25V
M	±20%	l 50V
K	±10%	a 63V
J	±5%	b 100V
G	±2%	c 160V
F	±1%	d 250V
D	±0,5%	e 400V
C	±0,25%	f 630V
B	±0,1%	h 1000V
W	±0,05%	i 1600V

Przykładowe oznaczenia	
Oznaczenie	Wartość
.1	0,1µF=100nF
3n3J	3,3nF 5%
22nMa	22nF 20% 63V
u47Kb	0,47µF 10% 100V
.47J63	0,47µF 5% 63V
1.K50	1µF 10% 50V
1u0M63	1µF 20% 63V
.001	0,001µF=1nF
1n0Kb	1nF 10% 100V

Rys. 3

mają wprawdzie dużą pojemność, ale za to pozostałe parametry gorsze od innych kondensatorów. O ile inne kondensatory i prawie wszystkie pozostałe elementy elektroniczne mają praktycznie nieograniczoną trwałość, „elektrolity” z upływem czasu tracą pojemność, zwłaszcza gdy pracują w podwyższonych temperaturach. Najtańsze mają maksymalną temperaturę pracy tylko +55°C, a lepsze +85°C albo +105°C.

Ich nominalna trwałość w tej maksymalnej temperaturze często wynosi tylko 2000...3000 godzin, czyli żałosne 3...4 miesiące ciągłej pracy, natomiast trwałość znacząco rośnie, gdy temperatura jest niższa (trwałość wzrasta dwukrotnie przy obniżeniu temperatury o każde 10°C). Chodzi o temperaturę otoczenia, ale temperatura wnętrza kondensatora zwykle jest wyższa – to kolejny ważny szczegół. Otóż kondensator to element magazynujący energię i zasadniczo nie powinny w nim występować straty ciepłne. Jednak rzeczywiste kondensatory, zwłaszcza elektrolityczne, nie są doskonałe. Podczas

przepływu prądu ładowania i rozładowania występują straty, co wynika głównie z pewnych niedoskonałości dielektryka – rzeczywisty kondensator zachowuje się tak, jakby wbudowana w nim była (nie wielka) rezystancja szeregowa, zwana ESR (Equivalent Series Resistance), jak pokazuje **rysunek 6**. Wiemy, że w rezystorach dostarczana energia elektryczna zamienia się na ciepło według zależności $P = U \cdot I = I^2 R$. Rezystancja zastępcza ESR danego kondensatora nie jest stała i zależy od kilku czynników.

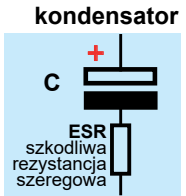
O ile kondensatory foliowe i wiele ceramicznych ma bardzo małe straty (reprezentowane przez bardzo małą rezystancję ESR), o tyle „alumińowe elektrolity” mają stosunkowo duże straty, zwłaszcza przy szybkich i częstych zmianach prądu i napięcia. Lepsze właściwości mają kondensatory elektrolityczne *tantalowe* i bardzo rzadko spotykane *niobowe*. W każdym razie nie ma kondensatorów idealnych, więc

wykorzystać wiadomości z poprzedniego spotkania i zmierzyć pojemność kondensatorów według **rysunku 7a** i **fotografii 8**. Najpierw naciśnij przycisk i zmierz napięcie zasilacza Uzas. Potem zgodnie z rysunkiem 10 z poprzedniego spotkania pomnóż to napięcie przez 0,368 (36,8%) i zapisz wynik jako U_{RC} . Następnie zmierz (wykorzystując stoper lub jakikolwiek zegarek z sekundnikiem) stałą czasową $T = C1 \cdot R_V$, czyli czas, jaki jest potrzebny, żeby po zwolnieniu przycisku napięcie od pełnej wartości U obniżyło się do wartości U_{RC} , czyli 36,8%U. Określił w ten sposób stałą czasową ($T = RC$), a pojemność badanego kondensatora obliczysz ze wzoru $C1 = T / R_V$. Chcąc zmierzyć pojemności większe niż 10uF, powinieneś według **rysunku 7b** dodać rezystor R1 o takiej wartości, żeby stała czasowa T nie była zbyt długa, a do wzoru zamiast rezystancji woltomierza podstawić wartość równoległego połączenia



Fot. 5

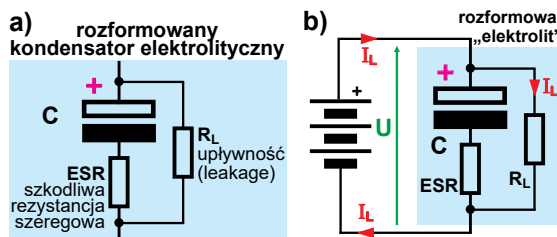
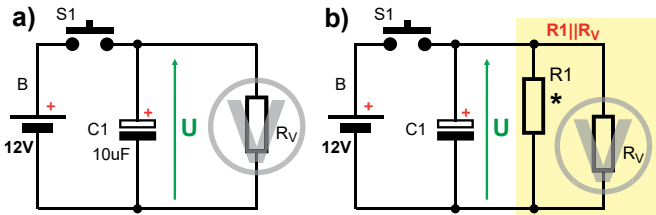
towana na schemacie zastępczym jak na **rysunku 9a**. Po dołączeniu takiego rozformowanego kondensatora pod napięcie naładuje się on, ale będzie też przezeń płynął niewielki stały prąd upływu według **rysunku 9b**. Rozformowanie nie jest wadą trwałą – aby na powrót zaformować „elektrolit”, po prostu podłącz go na kilka godzin do napięcia bliskiego napięciu nominalnemu.



Rys. 6

Sprawdź, czy posiadane przez Ciebie „elektrolity” są rozformowane. Możesz wykorzystać układ według **rysunku 10** i **fotografii 11**, gdzie duży kondensator C_P jest pomocniczym źródłem zasilania i gdzie zastosowana jest pomocnicza dioda Schottky'ego 1N5817...9, która spełni tam podwójną funkcję (wstępnie ładuje kondensator C_X i chroni miernik). Zaczynaj od kondensatora $C_X = 1000\mu F$. Aby zmierzyć upływność, podłącz badany kondensator C_X , nie przejmując się wskazaniami miernika (na najniższym zakresie amperomierza, czyli 200uA lub 2000uA) i na mniej więcej pięć sekund naciśnij przycisk S1. Naciśnięcie przycisku to zwarcie – dołączenie do kondensatora rezystancji szeregowej R bliskiej zero, stała czasowa RC ładowania też jest bardzo mała, bliska zero, więc w ciągu tych kilku sekund kondensator bez wątpienia powinien naładować się do pełnego napięcia zasilania. A jeśli kondensator będzie naładowany w pełni, to nie powinien przezeń płynąć żaden prąd ładowania. Należy podkreślić, że

Rys. 7



Rys. 9



Fot. 4

profesjonalni konstruktorzy muszą dobrze znać mocne i słabe strony poszczególnych typów i rodzajów. Hobbyści nie muszą się tym wszystkim tak mocno przejmować. Niemniej jeżeli do danego układu zalecany jest jakiś rodzaj czy typ kondensatora, warto właśnie taki zastosować, by uniknąć przykrych niespodzianek. A my zbadajmy teraz różne właściwości, w tym wady kondensatorów.

Pomiar pojemności. Znajdź rezystancję woltomierza swojego multimetru R_V (10MΩ albo 1MΩ zależnie od typu), możesz

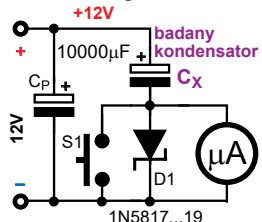
rezystancji $R1 || R_V$.

Wyniki takich pomiarów pojemności kondensatorów elektrolitycznych mogą różnić się od nominału z dwóch powodów. Po pierwsze, ich tolerancja może wynosić nawet 50%. To jest kolejna wada kondensatorów elektrolitycznych. Po drugie, z czasem niepodłączone „elektrolity” ulegają tak zwanemu *rozformowaniu*.

Upływność. Rozformowanie dotyczy tylko najpopularniejszych kondensatorów elektrolitycznych alumińowych. Zwykle związane jest ze zwiększeniem pojemności, a dodatkowo, oprócz szeregowej rezystancji ESR, pojawia się też upływność, reprezen-

tuje upływność, czyli prąd I_L płynący przez kondensator C i rezystor R_L (upływność/leakage). W tym celu użyj dużej baterii U i woltomierza RV. W tym celu użyj dużej baterii U i woltomierza RV.

Rys. 10



Fot. 8



Fot. 11

prąd ładowania maleje do zera, zgodnie z krzywą z rysunku 10 z poprzedniego spotkania. Jeżeli jednak „elektrolit” będzie rozformowany, to zgodnie z rysunkiem 9b będzie przez niego ciągle płynął niewielki prąd upływu. W przypadku mojego zestawu EdWA10 kondensatory 1000uF miały upływność kilkunastu mikroamperów (fot. 11). Starsze kondensatory 1000uF z moich domowych zapasów miały dużo większe prądy, rzędu kilkudziesięciu uA, a jeden nawet ponad 200 mikroamperów. Natomiast upływność tego najbardziej rozformowanego kondensatora, zmierzona w układzie z rysunku 10 po 48 godzinach dołączenia do napięcia 12V, wynosiła poniżej 1nA.

1 nanoamper? Jak można zmierzyć tak mały prąd, jeśli rozdzielczość na najniższym zakresie amperomierza, który ma zakres 200uA, wynosi 0,1uA, czyli 100nA?

Po pierwsze, sam wewnętrzny układ pomiarowy multimetru ma ogromną, praktycznie niemierzalnie dużą rezystancję wejściową. Jak już wiesz, amperomierz to woltomierz na najniższym zakresie (zwykle 200mV), mierzący spadek napięcia na równoległej rezystancji. W wielu popularnych multimetrach na najniższym zakresie amperomierza 200uA sytuacja jest taka, jak na **rysunku 12a**, czyli rezystancja pomiarowa wynosi 1kΩ. Natomiast przy pracy w roli woltomierza w najtańszych miernikach serii 830 wykorzystywany jest dzielnik rezystorowy 1MΩ według **rysunku 12b** (w lepszych miernikach całkowita rezystancja dzielnika wynosi 10MΩ). A to oznacza, że woltomierz na najniższym zakresie 200mV... też jest bardzo czułym amperomierzem, w najtańszych miernikach serii ,830 o zakresie 0,2uA, czyli 200nA i rozdzielczości 0,1 nanompera, czyli 100 pikoamperów (w lepszych miernikach „10-megaomowych” zakres pomiarowy wynosi 20nA, a rozdzielczość 10pA).

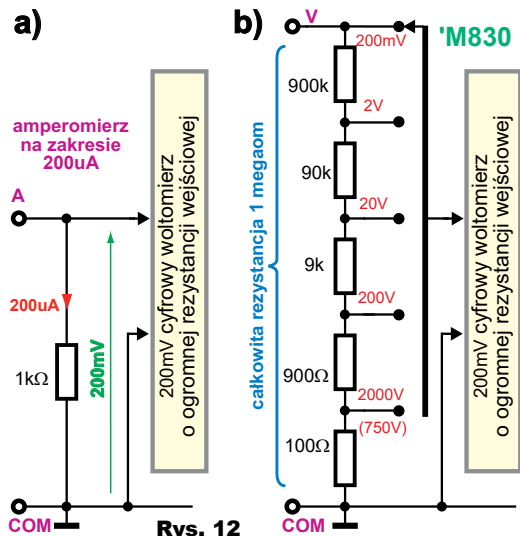
I właśnie w ten sposób możesz się przekonać, że upływność dobrze zaformowanych „elektrolitów” jest znikoma. Jak pokazuje **fotografia 13**, w kondensatorze o pojemności 1000uF jest nieco mniejsza od 1nA (9,5mV/10MΩ). Na czas tego testu wyjąłem diodę D1, ponieważ ona też może mieć w takich warunkach znaczący prąd, który zniekształciłby pomiar. Natomiast upływność kondensatorów foliowych i ceramicznych jest praktycznie równa zero. Jeżeli skrupulatnie przeprowadzisz opisane ćwiczenia dotyczące upływności, być może zauważysz, że kondensatory, nawet te lepsze, foliowe, zachowują się dziwnie. Być może jest to przejaw innej ich niedoskonałości...

Absorpcja dielektryczna. Spróbujmy zbadać kolejną wadę kondensatorów według **rysunku 14**. Najpierw ustaw woltomierz na zakresie 20V. Naciśnij przycisk S1 i policz do dziesięciu, by w pełni naładować kondensator C1 (R1 ogranicza prąd ładowania). Po zwolnieniu przycisku woltomierz pokaże napięcie zasilania, które będzie pomaleńku się zmniejszać, zgodnie ze stałą czasową $C_X R_V$. Gdy na kilka sekund (znów możesz policzyć do dziesięciu) naciśniesz przycisk rozładowujący S2, jednocześnie przełącz woltomierz na najniższy zakres 200mV – podczas naciskania S2 napięcie spadnie do zera, czyli kondensator zostaje całkowicie rozładowany.

Całkowicie?

A co się stanie, gdy po kilkusekundowym naciskaniu S2 zwolnisz przycisk? **Fotografia 15** pokazuje, że u mnie po kilku minutach od zwolnienia S2 na kondensatorze 1000uF napięcie wzrosło od zera do prawie 200mV (potem napięcie to pomalutku zmniejsza się do zera wskutek rozładowania przez rezystancję miernika).

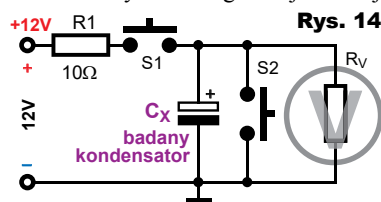
Kondensatory foliowe generalnie są dużo lepsze od elektrolitycznych, ale i w nich daje o sobie znać badana teraz wada. U mnie na połączonych równolegle czterech kondensatorach 1uF (4uF) po zwolnieniu S2 napięcie wzrosło do prawie 4 miliwoltów. Natomiast bez żadnego kondensatora miernik (z powodu jeszcze innych szkodliwych czynników, niezwiązanych z kondensatorami) pokazywał napięcie w zakresie $\pm 1,5$ mV. W każdym razie po na pozór całkowitym rozładowaniu, na kondensatorze pojawia się niewielkie napięcie. A to wskazuje, że rozładowanie nie było całkowite i że w kondensatorze pozostała jakaś energia. Nie będziemy wchodzić w szczegóły, dlaczego tak jest – naj-



Rys. 12

prościej mówiąc, jest to efekt niedoskonałości zastosowanego w kondensatorze dielektryka (tzw. absorpcja dielektryczna), co ma praktyczne znaczenie tylko w bardzo nielicznych, precyzyjnych układach. Być może przy wcześniejszych pomiarach upływności zaobserwowałeś też dziwne efekty wynikające właśnie z istnienia absorpcji dielektrycznej i być może (bez kondensatora C_X) dały o sobie znać różne zakłócenia, powodujące wahania wskazań miernika, ale nie będziemy wchodzić w szczegóły. Wrócimy do innej niedoskonałości dielektryka i do szkodliwej rezystancji szeregowej ESR.

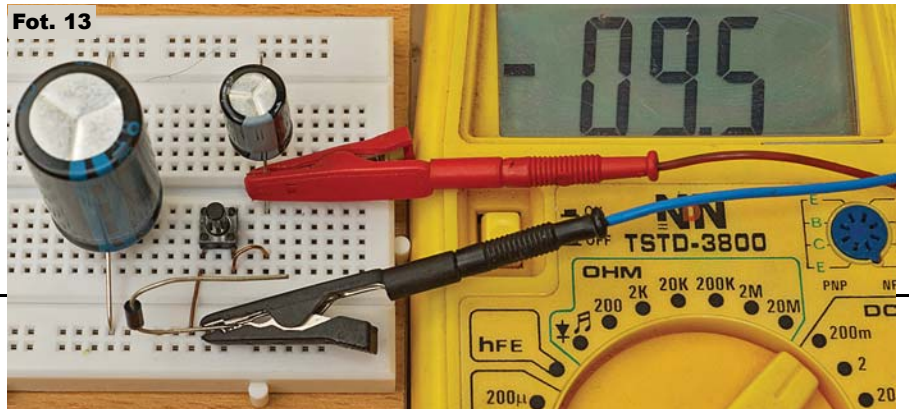
Rezystancja ESR. Jeżeli masz oscyloskop, możesz w prosty sposób zmierzyć rezystancję ESR z rysunku 6 i porównać pod tym względem poszczególne rodzaje kondensatorów. Ja najpierw wykorzystałem pro-



Rys. 14



Fot. 15

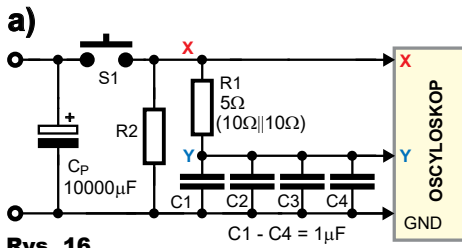


Fot. 13

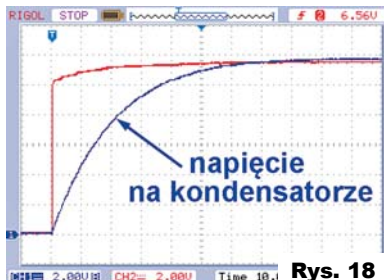
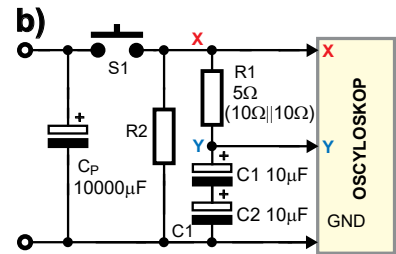
ciutki układ według rysunku 16a i fotografii 17. W spoczynku rezystor R2 rozładuje badany kondensator C_X . Natomiast w chwili naciśnięcia S1 napięcie zasilania podajemy na szeregowy obwód $R1C_X$. Duży kondensator C_P pełni wtedy funkcję pomocniczego źródła energii. W układzie z kondensatorami foliowymi przebiegi w punktach X, Y, pokazane na rysunku 18, zmierzone oscyloskopem (przy pomiarach „jednorazowych” Single Shot), są niemal idealne. Jak obrazuje niebieski przebieg, kondensator ładuje się prawidłowo, zgodnie ze znaną nam już krzywą (RC). Natomiast po zmianie czterech kondensatów foliowych (4uF) na dwa szeregowo połączone elektrolityczne 10uF (o wypadkowej pojemności 5uF) według rysunku 16b, przebiegi wyglądają jak na rysunku 19 – w pierwszej chwili po naciśnięciu przycisku występuje duży „schodek”...

W idealnym przypadku (rysunki 16a, 18), w pierwszej chwili po wciśnięciu S1, gdy kondensatory są puste i stanowią zwarcie, prąd ładowania jest ograniczony tylko przez wartość R1 (przy zasilaniu 12V powinien wynosić $12V/5\Omega = 2,4A$). W układzie z mocno niedoskonałymi „elektrolitami”, w pierwszej chwili po wciśnięciu S1 prąd jest ograniczony przez sumę rezystancji R1 i ESR kondensatorów. Jak pokazuje rysunek 20, w pierwszej chwili po podaniu napięcia na dwójnik RC kondensator jest pusty, stanowi zwarcie, a więc tworzy się rezystorowy dzielnik napięcia R1, ESR. I właśnie on powoduje „schodek” o wielkości wprost proporcjonalnej do rezystancji ESR. Kondensatory foliowe też mają jakąś rezystancję ESR, ale jest ona wielokrotnie mniejsza, więc przebiegi z rysunku 18 są bliskie ideału.

Warto jednak wiedzieć, że szkodliwa rezystancja ESR w „elektrolitach” mimo



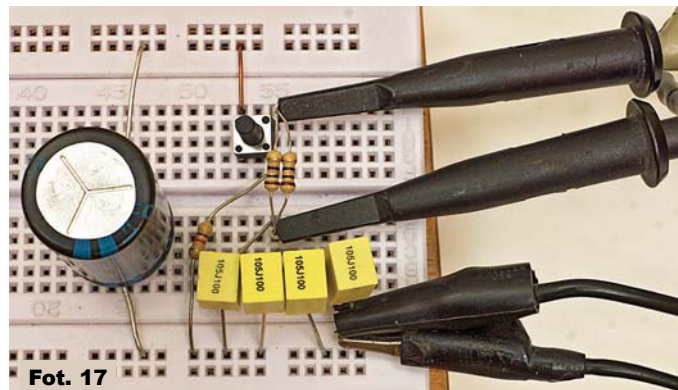
Rys. 16



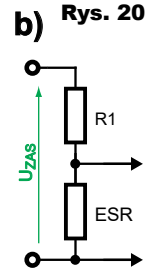
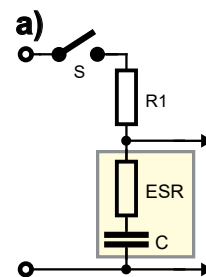
Rys. 18



Rys. 19



Fot. 17



Rys. 20

wszystko jest dużo mniejsza niż rezystancja wewnętrzna baterii i zasilaczy. Dlatego praktycznie we wszystkich układach elektronicznych w obwodach zasilania włączane są kondensatory według rysunku 21a. Ponieważ przy szybkich zmianach kondensatory elektrolityczne są gorsze od innych, w praktyce bardzo często w obwodach zasilania, oprócz kondensatora elektrolitycznego, włącza się jeden lub kilka kondensatorów ceramicznych według rysunku 21b. Często nazywane są kondensatorami filtrującymi, ale ponieważ stanowią niewielkie lokalne źródło energii o niewielkiej rezystancji wewnętrznej ESR, można je nazywać wspomagającymi. W układach

z rysunku 16 rolę tę odgrywa duży kondensator C2.

Opisane ćwiczenia są bardzo ważne, bowiem pokazują, że w praktyce często mamy do czynienia z elementami niedoskonałymi, ułomnymi. Dotyczy to nie tylko kondensatorów, ale też wszelkich innych elementów elektro-

nicznych. W niektórych zastosowaniach ta niedoskonałość może powodować różne dziwne zjawiska i błędy. Niezorientowani teoretycy gotowi są uznać, że w elektronice zdarzają się niewytłumaczalne przypadki z pogranicza magii, łamiące naukowe zasady. Nie!

W elektronice wszystko jest zgodne z zasadami fizyki, tylko często dają o sobie znać niedoskonałości rzeczywistych elementów

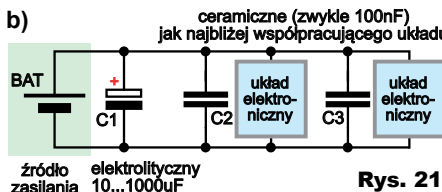
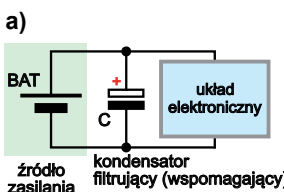
A teraz dla relaksu zrealizuj piszczykogigacz według rysunku 22 i fotografii 23, gdzie migająca dioda LED i rezystor R1 pełnią funkcję podobną jak przełącznik. Podczas ładowania i rozładowywania prąd płynie przez C1 na przemian w obu kierunkach (jak wskazują strzałki) i właśnie dzięki temu na przemian impulsowo działają zarówno brzęczyk Y1, jak też „odwrotnie” włączona dioda LED2.

A na koniec zagadka, bardzo istotna dla każdego elektronika: zwróć uwagę, że omawiane na poprzednim spotkaniu przebiegi napięcia kondensatora mają inny kształt niż przebieg jego prądu (bo prąd jest proporcjonalny nie do wartości napięcia, tylko do szybkości zmian napięcia). A teraz bardzo ważne pytanie: czy istnieje taki przebieg, przy którym w kondensatorze i kształt prądu, i napięcia są

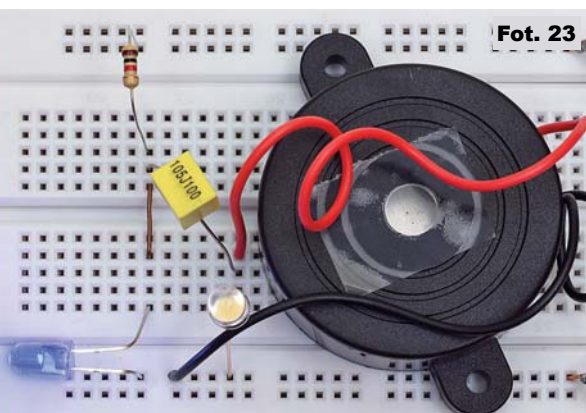
Rys. 22 jednakowe?

Na to naprawdę bardzo ważne pytanie odpowiemy podczas następnego spotkania.

Piotr Górecki



Rys. 21



Fot. 23

