

# Elektronika dla juniora (i seniora), czyli elektroniczne przedszkole

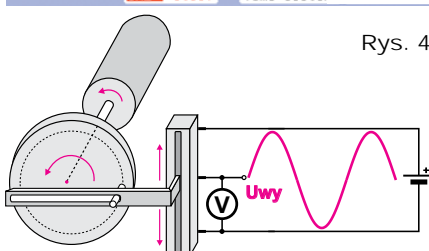
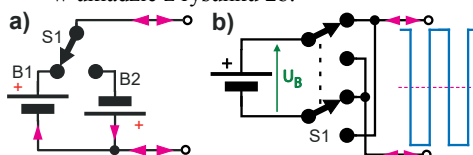
## Spotkanie 8: Napięcie i prąd zmienny

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 młodzieży

„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.

W naszym kursie do tej pory wykorzystywaliśmy zasilacz lub baterie, które są źródłami napięcia i prądu stałego. Jednak istnieją źródła, w którym napięcie (prąd) w określony sposób zmieniają swoją wartość. Nie będziemy analizować książkowych definicji napięć (prądów) *tętniących, jednokierunkowych, przemiennych, zmiennych, nieokresowych*, itp. W praktyce najczęściej mamy do czynienia z przebiegami, których wykres czasowy to albo *przebieg sinusoidalny*, albo *prostokątny*.

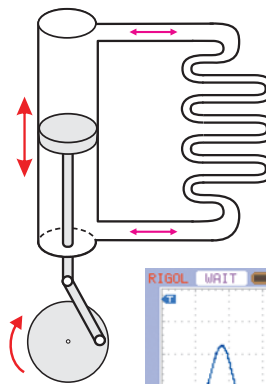
Bodaj najprostszy sposób wytworzenia *jednokierunkowych impulsów prostokątnych* pokazany jest na **rysunku 1**. Bardzo interesują nas także impulsy dwukierunkowe (na przemian dodatnie i ujemne), które można wytworzyć na przykład w układzie z **rysunku 2**. **Rysunek 3** pokazuje zrzut z ekranu oscyloskopu przy szybkim przełączaniu S1 w układzie z **rysunku 2b**.



Przebieg sinusoidalny można byłoby wytworzyć za pomocą liniowego potencjometru suwakowego, napędzanego silnikiem według **rysunku 4**. Hydraulicznym odpowiednikiem źródła napięcia sinusoidalnie zmiennego jest pompa z tłokiem według **rysunku 5**. Zapamiętaj, że **przebieg sinusoidalny jest ściśle związany z ruchem obrotowym**. Jednemu pełnemu obrotowi (okresowi) odpowiada kąt 360 stopni. Pół okresu to 180 stopni, a ćwierć okresu to 90 stopni, czyli kąt prosty.

Generalnie wirujące prądnice wytwarzają przebieg sinusoidalny lub bardzo podobny. **Rysunek 6** to wynik pomiaru oscyloskopem napięcia obracającego się dy noma rowe-

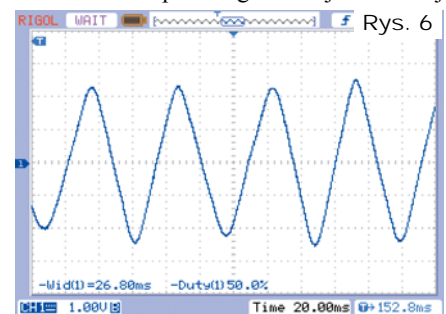
rowego z **fotografii 7** (analogiczny eksperyment z popularnym silnikiem komutatorowym da inny wynik, ponieważ komutator i szczotki tworzą tzw. *mechaniczny prostownik*). Generatory w elektrowniach obracają się z szybkością dokładnie 3000 obrotów na minutę, czyli 50 na sekundę. Dlatego w sieci energetycznej mamy prąd (napięcie) sinusoidalnie zmienny z częstotliwością **50 cykli na sekundę**, czyli o częstotliwości **50 herców (50Hz)**. Jeden pełny cykl, czyli okres, trwa 1/50 sekundy, czyli 20ms. Nazwa jednostki częstotliwości pochodzi od nazwiska niemieckiego uczonego Heinricha Hertza. Częstotliwość zwykle oznacza się literą **F** lub **f** od angielskiego *frequency* (np.  $f = 300\text{Hz}$ ). **Rysunek 8** pokazuje przebieg **śmiertelnie groźnego** napięcia sinusoidalnie zmiennego w domowym gniazdku sieci 230V (zmierzone oscyloskopem z bezpieczną sondą – dzielnikiem 1:100). Generatory w elektrowni wytwarzają „czysty” przebieg sinusoidalny, ale w gniazdku wierzchołki są spłaszczone z uwagi na specyficzne



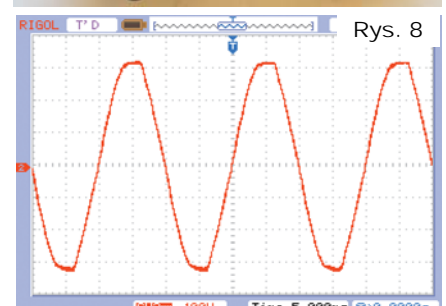
Rys. 5

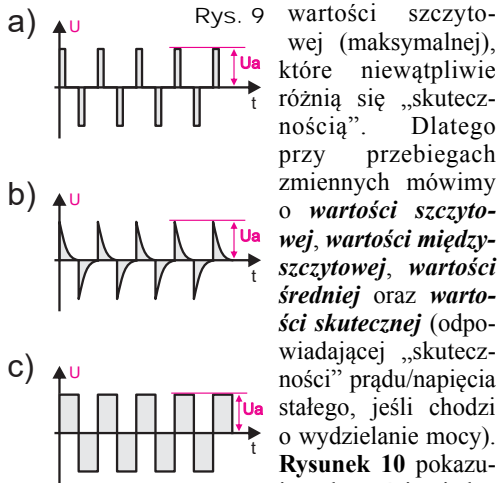
obciążenie sieci (układami elektronicznymi).

W przypadku przebiegów sinusoidalnych (i wszelkich innych zmiennych) jest pewien problem z określaniem ich wartości. **Rysunek 9** pokazuje kilka przebiegów o jednakowej



Fot. 7





Rys. 9 wartości szczyto-  
wej (maksymalnej),  
które niewątpliwie  
różnią się „skutecz-  
nością”. Dlatego  
przy przebiegach  
zmiennych mówimy  
o **wartości szczyto-  
wej, wartości między-  
szczytowej, wartości  
średniej** oraz **warto-  
ści skutecznej** (odpo-  
wiadającej „skutecz-  
ności” prądu/napięcia  
stałego, jeśli chodzi  
o wydzielanie mocy).

**Rysunek 10** pokazu-  
je zależności między  
nimi dla przebiegu  
sinusoidalnego. 230V  
to **wartość skuteczna**  
napięcia sieci ener-  
getycznej, więc jak  
potwierdza rysunek  
8, **wartość szczyto-  
wa** wynosi około  
325V, a międzyszczy-  
towa aż 650V!

Elektronik niekiedy  
ma do czynienia  
z przebiegami trójkąt-  
nymi i piłkkształtny-  
mi, ale zdecydowanie  
częściej z prostokąt-  
nymi. Wtedy oprócz  
amplitudy, częstotli-  
wości i czasów istotny  
jest też parametr:  
**wypełnienie**, (ang.  
*duty factor, duty cycle*)  
jak pokazuje **rysunek 11**.

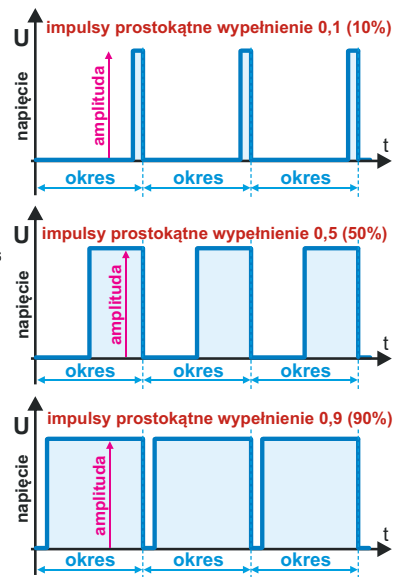
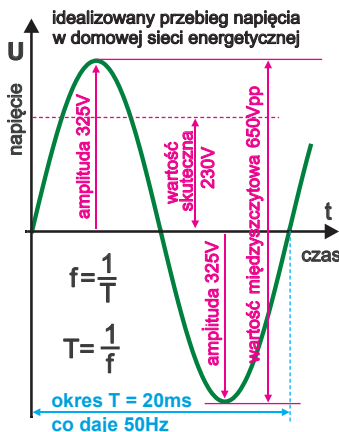
A teraz rozwiązanie  
zagadki. Otóż w  
dwóch ostatnich odcin-  
kach pojawiło się  
bardzo ważne pytanie:  
**czy istnieje taki  
przebieg, przy którym  
w kondensatorze  
i kształt prądu, i napięcia  
są jednakowe?**

Wiemy, że przez  
kondensator prąd płynie  
tylko wtedy, gdy  
zmienia się napięcie  
na kondensatorze i że  
przebiegi napięcia  
na kondensatorze  
zwykle mają inny  
kształt niż przebiegi  
jego prądu, bo prąd  
jest proporcjonalny  
nie do wartości napięcia,  
tylko do **szybkości  
zmian napięcia**.  
Ale istnieje jeden  
szczególny, „magiczny”  
przypadek: gdy zmiany  
napięcia i prądu mają  
kształt... **sinusoidy**,  
przebiegi napięcia  
i prądu wyglądają  
jak na **rysunku 12a**.  
W każdym momencie  
prąd jest proporcjonalny  
do szybkości zmian  
napięcia. Między  
sinusoidalnymi przebie-  
gami napięcia i prądu  
występuje przesunięcie  
fazy o 1/4 cyklu (okresu),  
czyli 90 stopni  
( $\pi/2$  radianów).  
Rysunek 12a jest  
obrazem z oscyloskopu,  
mierzącego przebiegi  
w układzie z **rysunku**



**12b.** Źródłem sy-  
gnału sinusoidalnego  
160Hz jest genera-  
tor – przy tej wła-  
śnie częstotliwości  
kondensator 1 $\mu$ F  
ma reaktancję 1k $\Omega$ .  
Jeden kanał oscylo-  
skopu mierzy napię-  
cie zasilające, ale  
w praktyce jest to  
napięcie  $U_C$  na kon-  
densatorze (przebieg  
czerwony), ponieważ  
napięcie na rezystorze  
pomiarowym  $R_P$  jest  
bardzo małe (czułość  
kanału 2 mierzącego  
napięcie to 1V/dz,  
a czułość kanału 1  
jest stokrotnie więk-  
sza: 10mV/dz). Drugi  
kanał oscyloskopu  
mierzy to małe napię-  
cie (kolor niebieski)  
na małym rezystorze,  
a tym samym płynący  
prąd ( $I = U_P/R_P$ ).

Sinusoida okazuje  
się przebiegiem nie  
tyle „magicznym”,  
co podstawowym,  
elementarnym, fun-  
damentalnym. W  
elektronice bardzo  
często mamy do  
czynienia z przebie-  
gami sinusoidalnymi  
i wtedy... otwiera  
się dodatkowa moż-  
liwość. Porównaj  
przebiegi z **rysunku 13**.  
Oczywiście są zgodne  
z podstawową zależ-  
nością: **prąd płynący  
przez kondensator  
jest wprost proporcjo-  
nalny do szybkości  
zmian napięcia (du/dt)  
i do pojemności C**,  
co możemy zapisać  
jako matematyczną  
operację różniczkowa-  
nia:  $i = C du/dt$ .  
Ale tu mamy coś  
więcej: czym więk-  
szy kondensator,  
tym większy prąd  
i przypomina nam  
to sytuację z rezysto-  
rami o różnej  
oporności. Wygląda  
na to, że kondensator  
o większej pojem-  
ności ma mniejszą  
oporność. Słusznie!  
Jednak jest to „inna  
oporność”. Nie  
jest to rezystancja  
R, tylko **reaktancja  
pojemnościowa**,

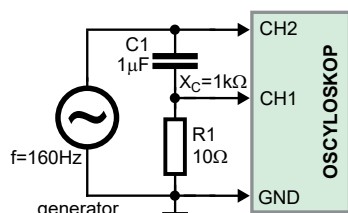


Rys. 10  
oznacza-  
na  $X_C$ ,  
w y r a -  
ż a n a . . .

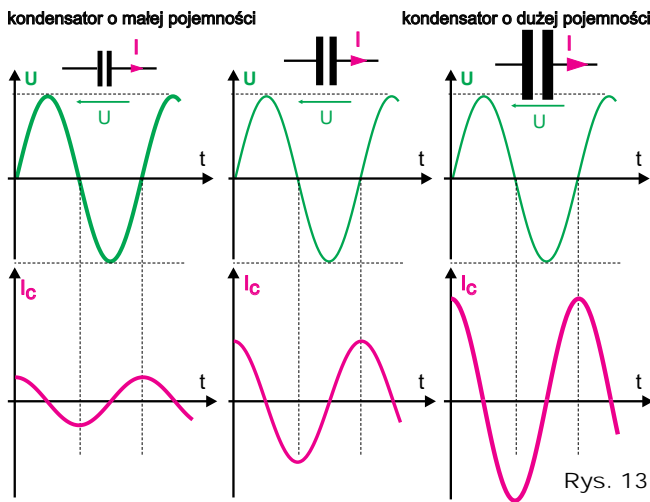
w omach, której  
wartość nie jest  
stała, tylko  
zależy i od  
pojemności C,  
i od częstotli-  
wości f (a tym  
samym od  
szybkości  
zmian):

$$X_C = 1/2\pi fC$$

Ale podkreślam: **pojęcie  
reaktancji pojem-  
nościowej  $X_C$  ma sens  
TYLKO dla prze-  
biegów sinusoidal-  
nych**, ponieważ  
tylko wtedy przebiegi  
i prądu, i napięcia  
są sinusoidalne.  
Oczywiście reaktancji  
 $X_C$  nie można  
zmierzyć omomierzem  
(wykorzystującym  
prąd stały) przy  
prądzie stałym,  
który ma częstotli-  
wość zero. Przy  
częstotliwości zero  
reaktancja  $X_C$  jest  
nieskończenie  
wielka. Podobnie  
nieskończenie  
wielka jest rezystancja  
między wypro-  
wadzeniami (idealnego)



Rys. 12b



Rys. 13

kondensatora.

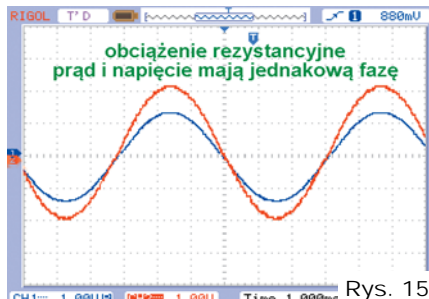
A teraz kolejna,  
bardzo ważna sprawa.  
Otóż choć i rezystancję  
R, i reaktancję  $X_C$   
wyrażamy w omach,  
coś je różni. Oto przy-  
kład. Jeżeli połączy-  
my w szereg dwa  
rezystory 1k $\Omega$ , to  
oczywiście sumaryczna  
rezystancja będzie  
sumą rezystancji  
składowych i ona  
wyzaczy wartość  
prądu. W układzie  
według **rysunku 14a**,  
gdzie generator daje  
napięcie sinusoidalne  
o **wartości skutecznej**  
2V, popłynie prąd  
sinusoidalny o wartości  
skutecznej 1mA  
(2V/2k $\Omega$ ).  
Analogicznie będzie  
przy szeregowym  
połączeniu dwóch  
kondensatorów.  
Ich reaktancje się  
dodadzą i prąd też  
będzie wynosił 1mA,  
jak pokazuje  
**rysunek 14b**.

A jeżeli połączymy w szereg kondensator i rezystor według **rysunku 14c**?

Logika słusznie podpowiada, że tu też wypadkowa oporność będzie sumą oporności składowych.

Słusznie! Ale reaktancja  $X_C$  jest „dziwną opornością” (nie tylko dlatego, że nie można jej zmierzyć omomierzem). W układzie z rysunku 14c wypadkowa oporność nie będzie równa  $2k\Omega$ , a prąd nie będzie miał wartości  $1mA$ . A jak będzie?

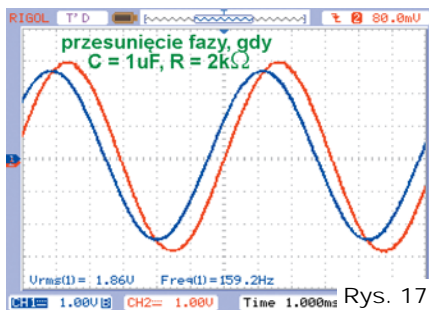
Kluczem do tajemnicy jest przesunięcie fazy między napięciem i prądem. Otóż w układzie z dwoma rezystorami po  $1k\Omega$  według rysunku 14a przebiegi prądu i napięcia będą wyglądać mniej więcej jak na **rysunku 15** (pomijając kwestie amplitud obu przebiegów). Przy obciążeniu rezystancyjnym prąd zawsze jest w fazie z napięciem, czyli przesunięcie



Rys. 15



Rys. 16



Rys. 17

fazowe wynosi 0 stopni. W układzie z kondensatorem o reaktancji  $2k\Omega$  według rysunku 14b wartość prądu wyniesie  $1mA$ , a przebiegi prądu i napięcia będą przesunięte o  $1/4$  okresu (obrotu), czyli o 90 stopni, tak jak na rysunku 12. Niewątpliwie reaktancja  $X_C$  też jest jakoś związana z kątem 90 stopni (przypominam, że przebieg sinusoidalny jest związany z ruchem obrotowym i jeden pełny obrót, czyli okres, to kąt 360 stopni, inaczej  $2\pi$  radianów).

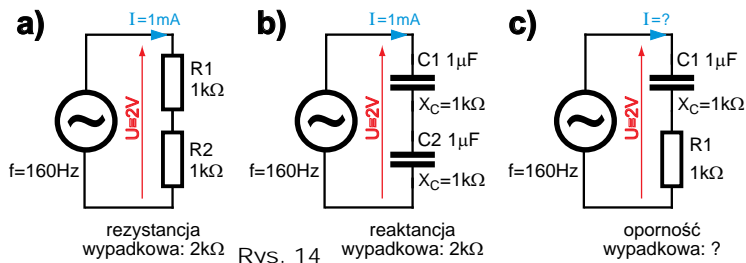
No to jak będzie w wersji z rysunku 14c?

Logika słusznie podpowiada, że prąd i napięcie też będą przesunięte, tylko o połowę mniej.

Bingo! Przebiegi będą wyglądać jak na **rysunku 16** i w idealnym przypadku przesunięcie wyniesie dokładnie 45 stopni.

Jak widać, kluczem jest przesunięcie fazowe w kondensatorze, wynoszące 90 stopni. W rezystorze przesunięcie fazy wynosi 0 stopni. Składając reaktancję pojemnościową  $X_C$  i rezystancję  $R$  o różnych wartościach, możemy uzyskać inną wartość prądu oraz przesunięcia fazowego między napięciem i prądem. **Rysunek 17** pokazuje zrzut ekranu z układu z **fotografii 18** z kondensatorem  $1\mu F$  i rezystancją  $2k\Omega$  – przesunięcie fazowe jest mniejsze.

W praktyce nie rysujemy takich przesuniętych przebiegów sinusoidalnych, tylko w uproszczeniu rysujemy jedynie wektory, których długość jest równa wartości napięcia, prądu, rezystancji czy reaktancji oraz kąt między nimi. Na **rysunku 19** masz tak zobrazowany prąd i napięcie w trzech przypadkach z rysunku 14.



Rys. 14

Ten sposób wykorzystujemy też przy szeregowym połączeniu oporności: trzeba je dodawać, ale wektorowo, jak na **rysunku 20**. W układzie z rysunku 20c wypadkowa oporność (zwana **impedancją**, oznaczana literą  $Z$ ) powstająca z dodania rezystancji  $R=1k\Omega$  i reaktancji  $X_C=1k\Omega$  będzie mieć wartość (tak zwany moduł impedancji)  $\sqrt{2} \cdot 1k\Omega \sim 1,41k\Omega$ , ale co ważne, jak najbardziej będzie związana z kątem 45 stopni.

Początkującym nie bardzo mieści się w głowie, że reaktancja pojemnościowa  $X_C$  jest w jakiś sposób „przesunięta o 90 stopni”. A jest, bo chodzi o kąt przesunięcia między prądem i napięciem. Tym bardziej początkującym nie mieści się w głowie niepodważalny fakt, że impedancja  $Z$  to nie tylko wartość w omach (moduł), ale też kąt przesunięcia (faza)...

Jak to zapisać? Jak to liczyć?

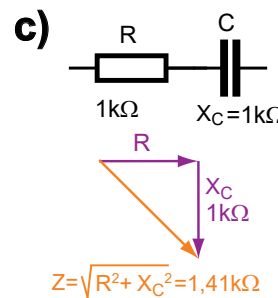
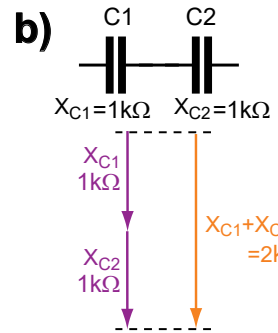
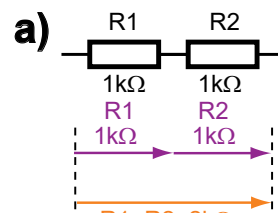
Otóż w najprostszych przypadkach można wykorzystać metodę graficzną (rysunek 20), natomiast do matematycznych obliczeń wykorzystuje się tak zwane **liczby zespolone**. Bez liczb zespolonych (i słynnego pierwiastka z minus jeden, a ściślej tzw. jednostki urojonej  $j$ ) obliczenia w elektronice byłyby ogromnie utrudnione. Nie bój się tego wszystkiego – zapamiętaj tylko, że pojęcie reaktancji ma sens wyłącznie dla przebiegów sinusoidalnych i że z uwagi na przesunięcie prądu i napięcia reaktancja pojemnościowa  $X_C$  jest niejako przesunięta względem rezystancji o kąt 90 stopni (ściślej o  $-90$  stopni).

Na początek tyle teorii wystarczy.

A w następnym odcinku zajmiemy się transformatorem, prostownikami i zasilaczami.

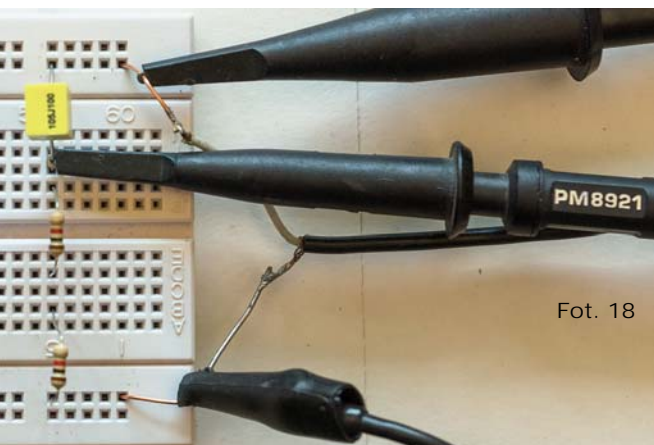
Piotr Górecki

Rys. 20



Rys. 19

- a) napięcie zasilające → prąd
- b) napięcie zasilające → prąd (faza - kąt przesunięcia 90°)
- c) napięcie zasilające → prąd (faza - kąt przesunięcia 45°)



Fot. 18