

Elektronika dla juniora (i seniora), czyli elektroniczne przedszkole

Spotkanie 5: Spadek napięcia, rezystancje nieliniowe

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 przyjaciel.

W ramach tego spotkania będziemy zgłębiać zagadnienia bardzo ważne dla każdego elektronika, dlatego mam prośbę, żebyś zrealizował proponowane ćwiczenia – w ten sposób zdobędziesz, skutecznie przyswoisz sobie i utrwalisz bardzo ważne informacje, których brakuje elektronikom, którzy nigdy się do tego „nie dotykali”.

Zacznijmy od omówienia pewnej pułapki. Otóż występowanie napięcia nie oznacza, że musi płynąć prąd – oczywistym przykładem jest niepodłączona bateria: na jej zaciskach cały czas występuje napięcie, ale prąd nie płynie, gdy do baterii nic nie jest podłączone (gdy rezystancja obciążenia jest nieskończenie wielka). Czy wiesz, że analogicznie jest z prądem: np. w nadprzewodnikach (które mają rezystancję równą zero) prąd może płynąć bez obecności napięcia, co jest wykorzystywane do realizacji bardzo silnych magnesów. Zapamiętaj ten ważny szczegół!

Jednak dotyczy to nadprzewodników, a w życiu codziennym nie mamy do czynienia z przepływem prądu bez obecności napięcia. Możemy (w pewnym uproszczeniu) przyjąć, że jeżeli płynie prąd, to nieodłącznie związane jest z tym napięcie. Zapamiętaj więc, że prąd jest nierozłącznie związany z napięciem.

Ale uwaga: niektórzy *nieślusnie* wyobrażają sobie, że zawsze napięcie jest przyczyną, a przepływ prądu – skutkiem, co wydaje się wyrażać prawo Ohma i podstawowy wzór $I = U/R$.

NIE!

Wzór jest słuszny, jednak takie wyobrażenie napięcia jako przyczyny i prądu jako skutku to pułapka, bardzo przeszkadzająca w zrozumieniu ważnych zależności, np. dotyczących cewek czy tranzystora! Otóż są też sytuacje, gdzie za przyczynę należałoby uważać prze-

plyw prądu, a skutkiem jest występowanie napięcia, co z kolei wyraża wzór $U = I \cdot R$. Często przy analizie układów wygodnie jest wyobrażać sobie, że płynący prąd powoduje występowanie na rezystancji napięcia lub jak mówimy częściej *spadku napięcia* ($U = I \cdot R$). Takie wyobrażenia znakomicie ułatwiają analizę niektórych obwodów, na przykład dzielnika napięcia. Dlatego od początku odrzuć pojęcie przyczyny i skutku, a za to utrwal sobie stwierdzenie, że *prąd i napięcie są ze sobą nierozłącznie związane*.

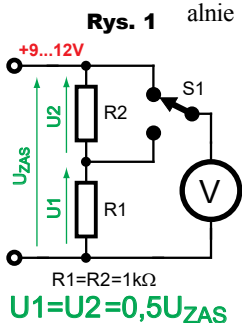
Jak związane?

Najczęściej związane są właśnie prawem Ohma (czytaj: oma) i opornością, ściślej rezystancją, oznaczaną literą R. To z kolei wyraża kolejny wzór z „wielkiej trójki”: $R = U/I$. Są jednak pewne „dziwne przypadki”. Niektóre zbadamy za chwilę, a inne, jeszcze dziwniejsze związki poznamy później, przy omawianiu kondensatorów i cewek. A teraz...

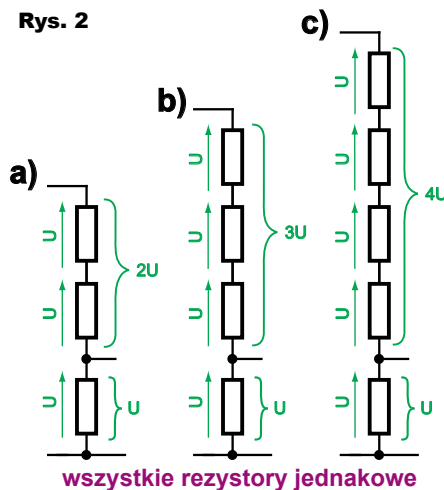
Dzielnik napięcia

Zestaw układ według rysunku 1. Jeżeli przez oba jednakowe rezystory płynie ten sam prąd, spadki napięć na obu powinny być jednakowe, a więc na wyjściu powinniśmy otrzymać połowę napięcia zasilania. Dodałem przełącznik S1, żeby w prosty sposób przełączać woltomierz. W jednej pozycji mierzy on napięcie zasilania, a w drugiej – napięcie na wyjściu dzielnika. Zmierź napięcie wyjściowe: z uwagi na tolerancję rezystorów (teoretycznie do $\pm 5\%$, w praktyce znacznie mniej) zapewne nie będzie idealnie równe połowie napięcia zasilającego.

Następnie zamień miejscami rezystory R1, R2 i sprawdź, jak zmieni się napięcie wyjściowe. W zestawie masz 10 rezystorów 1-kiloomowych, więc możesz sprawdzić, jaka jest wzajemna rzeczywista tolerancja poszczególnych egzemplarzy.



Rys. 2



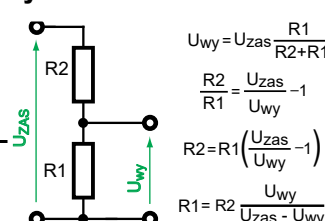
Następnie w miejsce R2 wstaw nie jeden, tylko dwa połączone szeregowo rezystory $1k\Omega$ według rysunku 2a. Ten sam prąd, płynąc przez wszystkie rezystory, wywoła jednakowe spadki napięcia, a napięcie na wyjściu dzielnika wyniesie $1/3$ napięcia zasilania. W wersji z rysunku 2b – $1/4U_{zas}$, a w wersji z rysunku 2c – $1/5U_{zas}$. W ogólnym przypadku $U_{wy} = U_{zas} \cdot R1 / (R1 + R2)$. Mając dany stosunek U_{zas}/U_{wy} , obliczamy potrzebny stosunek rezystorów: $R2/R1 = U_{zas}/U_{wy} - 1$ a stąd: $R2 = R1 \cdot [U_{zas}/U_{wy} - 1]$ oraz $R1 = R2 / [U_{zas}/U_{wy} - 1]$, co pokazuje też rysunek 3.

A teraz dwa z życia wzięte zadania dla Ciebie. Pomyśl, oblicz, zbuduj model i zmierz:

1. Często potrzebny jest dzielnik, dający na wyjściu $1/10$ napięcia wejściowego. Czy potrafisz z czterech rezystorów z zestawu EdWA10 zbudować taki dzielnik według rysunku 4?

2. W obwodach wejściowych sprzętu pomiarowego często potrzebne są drabinki rezystorowe dające napięcie według rysunku 5. Jakie powinny być wartości rezystancji R2, R3? Jak w praktyce uzyskasz potrzebną wartość R3?

Rys. 3



$$U_{wy} = U_{zas} \frac{R1}{R2 + R1}$$

$$\frac{R2}{R1} = \frac{U_{zas}}{U_{wy}} - 1$$

$$R2 = R1 \left(\frac{U_{zas}}{U_{wy}} - 1 \right)$$

$$R1 = R2 \frac{U_{wy}}{U_{zas} - U_{wy}}$$

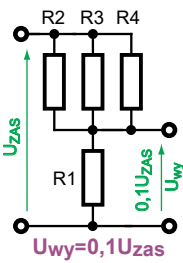
A teraz kolejna ogromnie ważna sprawa. Koniecznie wykonaj to ćwiczenie, bo pokazuje ono bardzo istotny problem praktyczny. Otóż jak wiemy, dwa jednakowe rezystory tworzą dzielnik 1:2. W układzie z **rysunku 6** jednorazowo zmierz napięcie zasilające U_{zas} . W miejsce R_1, R_2 wkładaj kolejno pary rezystorów o wartościach od 1kilooma do 10 megaomów i mierz napięcie wyjściowe. Wyniki wpisz do **tabeli 1**. Teoretycznie wszystkie wyniki powinny być zbliżone do $0,5U_{zas}$ (z dokładnością lepszą niż $\pm 5\%$), a tymczasem...

Przyczyną problemu występującego przy dużych rezystancjach jest obciążenie dzielnika przez woltomierz.

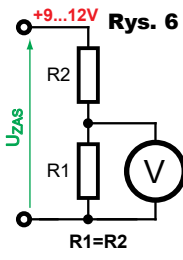
Idealny woltomierz miałby nieskończenie dużą rezystancję wewnętrzną, więc nie obciążałby badanego obwodu, to znaczy nie pobierałby zeń żadnej energii (mocy). Praktyczne woltomierze mają skończoną rezystancję wewnętrzną i pobierają z badanego obwodu jakąś niewielką ilość prądu (i energii). Na **rysunku 7** prąd $I_2 = I_1 + I_V$. Rezystancja wewnętrzna woltomierza jest wtedy połączona równolegle z R_1 , co zmienia „dół dzielnika”. Gdy rezystancje R_1, R_2 są niewielkie, dużo większa rezystancja wewnętrzna woltomierza (R_V) nie ma zauważalnego wpływu, ponieważ prądy dzielnika I_1, I_2 są wtedy wielokrotnie większe niż prąd I_V .

I tu szczególnie bardzo praktyczny: woltomierz w najtańszych multimetrach z serii M830 ma na wszystkich zakresach rezystancję wewnętrzną $1M\Omega$, natomiast wszystkie lepsze mają rezystancję $10M\Omega$, dlatego nieprzypadkowo wcześniej namawiałem na zakup miernika lepszego, choćby z serii M890.

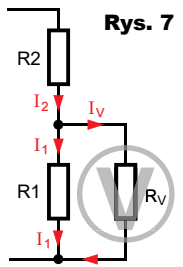
Dołączenie obciążenia do wyjścia dzielnika zmienia występujące tam napięcie, ale można zmierzyć napięcie dowolnego dzielnika tak zwaną metodą kompensacyjną, zilustrowaną na **rysunku 8a**. Mając zasilacz o płynnie regulowanym napięciu, trzeba tak dobrać jego napięcie, żeby woltomierz V_1 pokazywał zero, to znaczy, że napięcie w punktach A, B są identyczne i przez woltomierz nie płynie prąd – dzielnik napięcia nie jest obciążony. Woltomierz V_2 pokazuje napięcie dzielnika. W praktyce taki pomiar można też zrealizować z wykorzystaniem potencjometru według **rysunku 8b**.



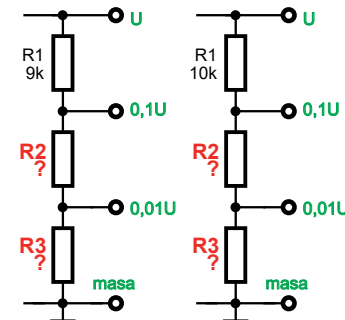
Rys. 4



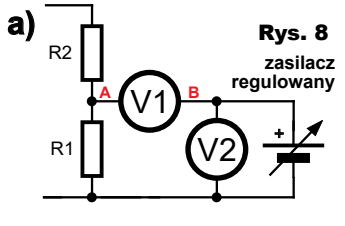
Rys. 6



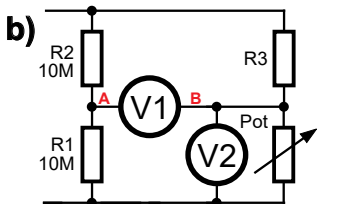
Rys. 7



Rys. 5



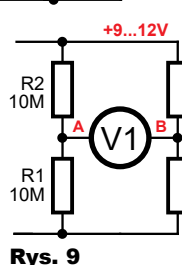
Rys. 8 zasilacz regulowany



A tak przy okazji: schemat z **rysunku 8b** pokazuje przykład mostka pomiarowego - taka idea mostka jest często wykorzystywana w elektronice.

W zestawie EdWA10 nie mamy potencjometru, ale w układzie z **rysunku 9** woltomierz pokaże napięcie U_{AB} bliskie zero, a to oznacza, że także na nieobciążonym dzielniku 10-megaomowym napięcie jest praktycznie równe połowie napięcia zasilania (napięcie U_{AB} nie będzie dokładnie równe zero z uwagi na tolerancję użytych rezystorów).

Omówiliśmy tu problem obciążenia dzielnika i jednocześnie niedoskonałość woltomierzy. Podobnie niedoskonałe są amperomierze, które powinny mieć rezystancję wewnętrzną równą zero, a w rzeczywistości są woltomierzami mierzącymi spadek napięcia na niewielkiej rezystancji R_p - **rysunek 10**. W przypadku popularnych, tanich multimetrów ten spadek napięcia na końcu zakresu wynosi zwykle 200mV, a wartość R_A jest zależna od zakresu I pomiaru prądu ($R_A = 200mV/I$).



Rys. 9



Rys. 10 amperomierz

Rezystancja nieliniowa

A teraz kolejna bardzo ważna sprawa i niespodzianka: znajdź w zapasach małą samochodową, czyli 12-woltową żarówkę o mocy 2W (1W...5W, nie więcej). Zmierz jej rezystancję omomierzem. Na **fotografii 11** masz wynik pomiaru żarówki samochodowej 12V/2W – omomierz pokazuje 9 omów, ale uwzględniając rezystancję przewodów pomiarowych i styków wynosi nieco powyżej 8 omów.

Tymczasem 12-woltowa 2-watowa żarówka zgodnie z zależnością $P=U \cdot I$ powinna pobierać 2/12 ampera prądu ($2W/12V = 1/6A \sim 0,167A$). A jeśli napięcie wynosi 12V i prąd 0,167A, to zgodnie ze wzorem $R = U/I$ jej rezystancja wynosi około 72 omów. A pomiary omomierzem dały dramatycznie mniejsze wyniki!

Aby to zbadać nieco dokładniej, wykorzystaj uniwersalny zasilacz z przełącznikiem i przy różnych napięciach zasilania zmierz rezystancję Twojej żarówki metodą techniczną. Polega to na zmierzeniu napięcia U , prądu I , a następnie obliczeniu $R = U/I$. Jeżeli masz dwa multymetry, możesz wykorzystać układ z **rysunku 12a**. Jeden multimetr (woltomierz) wystarczy w układzie z **rysunku 12b**. Mierz napięcie na rezystorze szeregowym R_1 o niewielkiej rezystancji, a dzieląc to napięcie przez wartość rezystancji R_1 , obliczysz prąd ($I = U_1/R_1$). W przypadku gdy $R_1 = 1\Omega$, wartość napięcia w miliwoltach odpowiada prądowi w miliamperach. Wyniki wpisz do **tabeli 2**.

Rezystancja nie jest stała!
Wyjaśnienie zagadki jest proste: włókno klasycznej żarówki wykonane jest z metalu – wolframu. A metal ten, podobnie jak inne metale, zwiększa swą rezystancję pod wpływem temperatury. Wprawdzie współczynnik cieplny rezystancji wolframu nie jest duży (niecałe 0,5%/°C), jednak włókno żarówki rozgrzewa się od temperatury pokojowej około +20°C do około +2000...+3000°C i dlatego jego rezystancja tak bardzo wzrasta.

Rezystancja nie jest stała!

Wyjaśnienie zagadki jest proste: włókno klasycznej żarówki wykonane jest z metalu – wolframu. A metal ten, podobnie jak inne metale, zwiększa swą rezystancję pod wpływem temperatury. Wprawdzie współczynnik cieplny rezystancji wolframu nie jest duży (niecałe 0,5%/°C), jednak włókno żarówki rozgrzewa się od temperatury pokojowej około +20°C do około +2000...+3000°C i dlatego jego rezystancja tak bardzo wzrasta.

Fot. 11



Tabela 1

$U_{zas} = \dots\dots\dots V$	
$0,5U_{zas} = \dots\dots\dots V$	
$R_1=R_2$	$U_{wy} [V]$
1k Ω	
10k Ω	
100k Ω	
1M Ω	
10M Ω	

żarówka 12V/.....W
 rezystancja zmierzona omomierzem =Ω

Tabela 2

napięcie zasilacza	napięcie U ₁	prąd I=U ₁ /R ₁	napięcie U _z	rezystancja R = U/I
	V	A	V	Ω
3V				
4,5V				
6V				
9V				
12V				

Dioda LED niebieska

Tabela 3

R _s	napięcie U _F	napięcie U ₁	prąd I I=U ₁ /R ₁	rezystancja R = U _F /I
	V	V	A	Ω
500Ω				
1kΩ				
10kΩ				
100kΩ				
(1MΩ)				

Jeżeli chodzisz do szkoły, to mam dla Ciebie radę, a właściwie prośbę: na wszelki wypadek **nie dyskutuj z nauczycielami** na temat tego, czy żarówka i diody podlegają prawu Ohma...

Nie będę Ci mącił w głowie rozważaniami na temat słuszności i zakresu obowiązywania prawa Ohma. Odnotujmy kluczowy fakt: **rezystancja wielu elementów nie jest stała**, tylko zależy od różnych czynników. Ale zawsze możemy mówić o rezystancji elementu ($R = U/I$) w danych warunkach, czyli o **rezystancji w danym punkcie pracy**.

W przypadku rezystora zakładamy, że jego rezystancja jest niezmienna (co jest bliskie prawdy, ale tak naprawdę jego rezystancja też zmienia się odrobinę, zarówno pod wpływem temperatury, jak też pod wpływem napięcia, co trzeba uwzględnić w najbardziej precyzyjnych zastosowaniach). A teraz kolejna ważna sprawa:

Charakterystyki prądowo-napięciowe

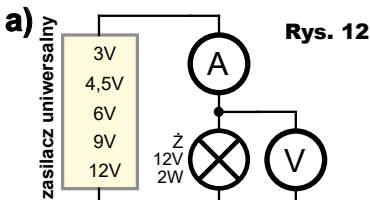
Wyniki pomiarów żarówki 12V/2W możemy przedstawić jako charakterystykę prądowo-napięciową na **rysunku 13**: Zaznacz punkty i połącz je linią (która zaczyna się w punkcie 0,0). Jak się przekonasz, **żarówka jest elementem nieliniowym**. Gdybyśmy podobnie zmierzili rezystory, charakterystyki byłyby liniami prostymi o nachyleniu zależnym od rezystancji (czyim większa rezystancja, tym bardziej „płaski” wykres).

Zbadajmy też koniecznie inne elementy nieliniowe: diody. Wcześniej stwierdziliśmy, że napięcie na diodach LED niewiele zależy od wartości prądu. Dokładniej zbadaj szczegóły! Dla diody niebieskiej (i wszystkich diod LED) wykorzystaj sposób pomiaru według **rysunku 14** i **fotografii 15**. W jednej pozycji przełącznika woltomierz mierzy napięcie na diodzie. W drugiej pozycji S1 pokazuje spadek napięcia na rezystorze pomiarowym R1 (10Ω), co pozwala obliczyć prąd ($I = U_1/R_1$).

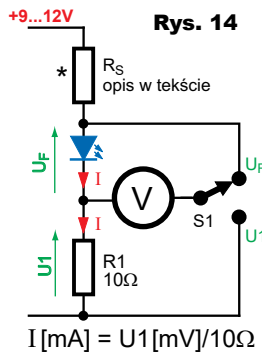
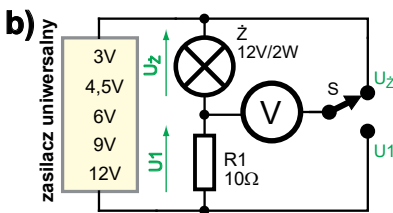
Pomiary wykonaj dla różnych wartości rezystancji R_s, wartości U_F, U₁ wpisz do **tabeli 3** i oblicz wartości prądu oraz rezystancji. Rezystancję 500Ω oczywiście złożysz z dwóch rezystorów 1kΩ połączonych równolegle. Przy wartości R_s 1MΩ prąd będzie bardzo mały, nie musisz go mierzyć (należałoby zwiększyć wartość R₁), ale zwróć uwagę, czy widać świecenie diody.

Dane z zaznaczonych żółtym kolorem dwóch kolumn tabeli 1 zaznacz na **rysunku 16** jako punkty niebieskim flamastrem lub długopisem i punkty te połącz linią. Uzyskasz charakterystykę prądowo-napięciową niebieskiej diody LED: nieliniową, „wygiętą do góry”, bowiem w przeciwieństwie do żarówki, rezystancja diody maleje wraz ze wzrostem napięcia i prądu.

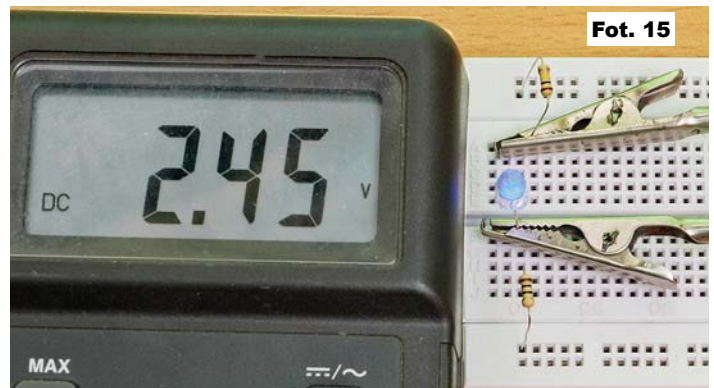
Jeśli masz trochę czasu, wykonaj takie pomiary dla „zwykłych” diod LED o innych kolorach. Ich charakterystyki możesz nanieść odpowiednimi kolorami na **rysunku 16**. To jest zadanie nieobowiązkowe.



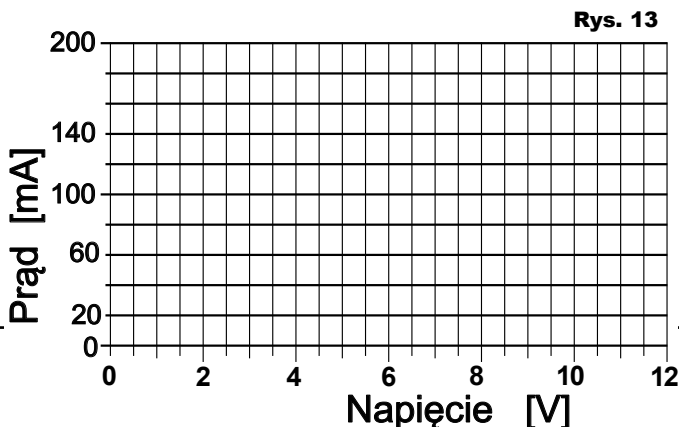
Rys. 12



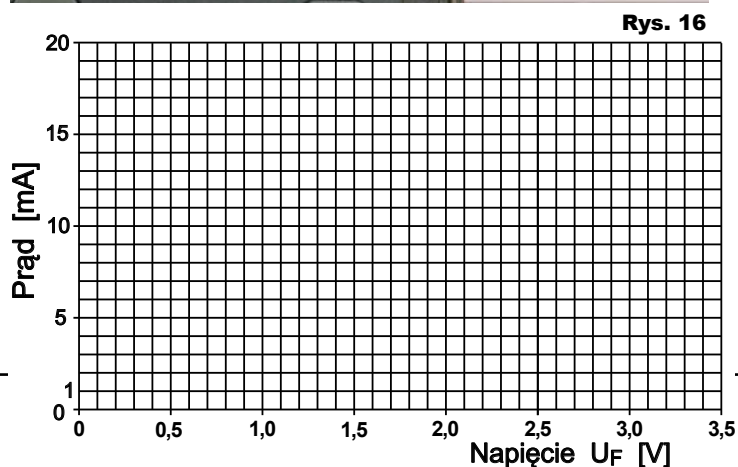
Rys. 14



Fot. 15

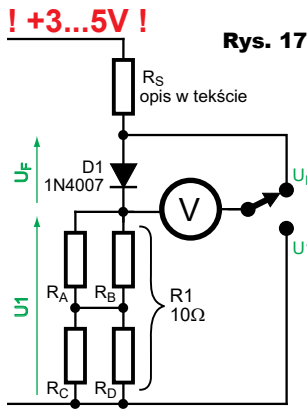


Rys. 13



Rys. 16

Natomiast **obowiązkowo trzeba przeprowadzić pomiary klasycznej diody 1N4007**. Aby zakres prądów był szerszy, wykonaj je według **rysunku 17 przy obniżonym napięciu zasilania, najlepiej 3V, najwyżej 5V**. Rezystancję 10 omów złóż, łącząc szeregowo/równolegle 4 rezystory 10Ω – podczas pomiaru przy najwyższych prądach staną się one gorące. Tak połączone jednakowe rezystory mają w sumie rezystancję taką, jak jeden z nich, ale moc (obciążalność) jest 4 razy większa. W tych pomiarach obciążalność jest ważna, bo będziemy też pracować przy dość dużej wartości prądu i rezystory te będą się grzać. Zacznij od rezystancji $R_s=0$ - wstaw zworę. Rezystancję 5Ω zrób z dwóch połączonych równolegle rezystorów 10Ω, a 20Ω – z ich połączenia szeregowego. Analogicznie 50Ω, 200Ω i tak dalej. Przy napięciu zasilania 4..5V także rezystancję $R_s=10\Omega$ należałoby zestawić z czterech rezystorów 10Ω, jak na rysunku 17.



Rys. 17

cia na diodzie (U_F) niewiele zależy od prądu, dlatego często przyjmujemy „średnie” napięcie przewodzenia klasycznej diody około 0,7V.

A teraz niespodzianka: wyniki z żółtych kolumn zaznacz jeszcze raz na **rysunku 18b**, gdzie skala prądu jest logarytmiczna.

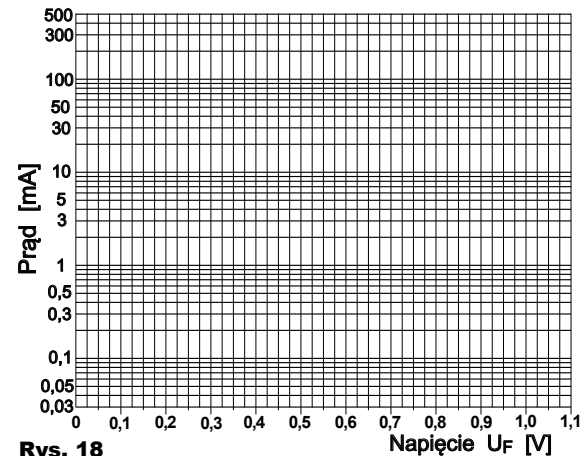
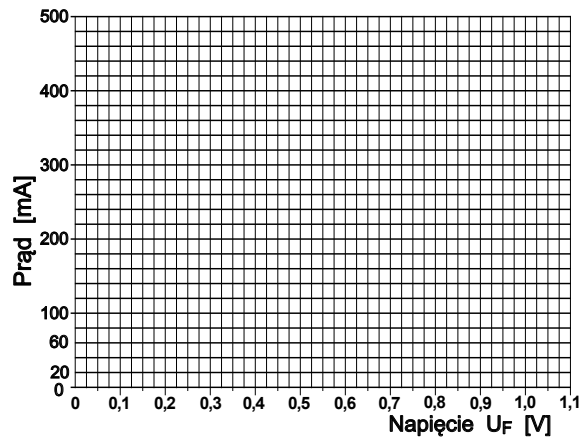
Zaskoczony?

I co? Niepozorna „zwykła” dioda krzemowa okazuje się elementem logarytmującym! Dziś to ciekawostka, ale przed kilkudziesięciu laty podobne diody były wykorzystywane w tak zwanych komputerach analogowych nie tylko do logarytmowania, ale do mnożenia, dzielenia, potęgowania i pierwiastkowania. Dziś nie wykorzystujemy logarytmicznej charakterystyki diody, natomiast bardziej interesuje nas spadek napięcia różnych diod, czyli ich napięcie przewodzenia U_F .

Nabrałeś już wprawy, więc szybko w układzie z rysunku 17 i **fotografii 19** możesz wykonać też pomiary napięcia przewodzenia diod 1N5819 i 1N4148. Wyniki należałoby też przedstawić na rysunku 18.

Diody Schottky’ego 1N5819 jest o tyle lepsza, że ma znacznie mniejsze napięcie przewodzenia (i straty) od klasycznych diod krzemowych 1N4007 i 1N4148. Te dwie ostatnie są podobne, różnią się wielkością czynnej struktury, co daje drobne różnice właściwości.

Na koniec o parametrach takich diod: najważniejszy jest **maksymalny prąd przewodzenia**, dla 1N4007 i 1N5819 równy 1 amper oraz 0,2A dla 1N4148. Przy zbyt dużym prądzie dioda się przegrzeje (bo wydziela się w niej moc strat ciepłych $P=U_F \cdot I$). Drugim kluczowym parametrem diod jest maksymalne napięcie wsteczne, oznaczane U_R (R – reverse). Przekro-



Rys. 18

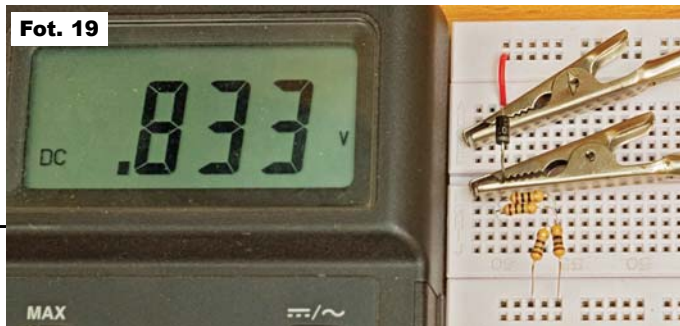
czenie dopuszczalnego napięcia wstecznego spowoduje tzw. przebicie i albo czasowe, albo trwałe uszkodzenie diody. Diody Schottky’ego są „mniej stratne”, ale niestety mają nieduże dopuszczalne napięcie wsteczne: 1N5817 - 20V, 1N5818 - 30V, 1N5819 - 40V. Dla bardzo popularnej 1N4148 maksymalne napięcie wsteczne U_R wynosi 75V, a dla pozostałych:

- 1N4001: 50V
- 1N4002: 100V
- 1N4003: 200V
- 1N4004: 400V
- 1N4005: 600V
- 1N4006: 800V
- 1N4007: 1000V

Natomiast diody LED według katalogów mają znikomo małe dopuszczalne napięcie wsteczne 5V, więc nie powinny być włączane „odwrotnie”.

Jeszcze raz zachęcam: wykonaj proponowane ćwiczenia, bo zdobyta wiedza naprawdę przyda Ci się w przyszłości!

Piotr Górecki



Fot. 19

Wyniki pomiarów wpisz w **tabeli 4**, a te z żółtych kolumn zaznacz na **rysunku 18a**, gdzie skala napięcia i prądu jest liniowa.

Widzimy duże podobieństwo do diody LED. Rezystancja „zwykłej” diody krzemowej maleje wraz ze wzrostem prądu i napięcia. Potwierdzają się też wnioski z poprzedniego spotkania, że spadek napię-

Dioda 1N4007

Tabela 4

R_s	napięcie U_F	napięcie U_1	prąd I $I=U_1/R_1$	rezystancja $R = U_F/I$
	V	V	A	Ω
0 zwora				
5Ω				
10Ω				
20Ω				
50Ω				
200Ω				
500Ω				
1kΩ				
2kΩ				
10kΩ				
20kΩ				
50kΩ				
100kΩ				
200kΩ				
500kΩ				