



część 2

# Tranzystory dla początkujących

Przed miesiącem przygotowaliśmy solidny grunt pod zrozumienie działania tranzystora. Dziś poznasz kilka ważnych zagadnień i wreszcie wykrzykniesz: „Tranzystor? Ależ to takie proste!”. Zanim to nastąpi, musisz koniecznie zrozumieć pojęcie źródła prądowego.

## Źródło prądowe

W dotychczasowych rozważaniach chciałem ci utrwalić wyobrażenie, że napięcie możemy rozumieć jako wynik przepływu prądu przez opór, a nie tylko prąd jako wynik działania napięcia.

Nieprzypadkowo we wstępie do poprzedniego artykułu zasygnalizowałem ci pojęcie źródła prądowego. Już samo słowo „źródło” coś sugeruje. Źródło to czynnik pierwotny, sprawczy, dający jakieś skutki...

Czy już chwyciłeś o co chodzi?

Do tej pory znałeś tylko **źródło napięciowe**.

Najpierw rozszerz więc swoje horyzonty analizując podobieństwa i różnice **źródła napięciowego** i **źródła prądowego**.

Na początek małe i łatwe pytanie: czy w sklepie można kupić źródło napięciowe?

Gdy zapytasz o coś takiego, to sprzedawca popatrzy na ciebie dziwnym wzrokiem i zapyta, czy chodzi ci o jakieś baterie. Rzeczywiście. Bateria, akumulator,

czy zasilacz, to różne odmiany źródeł napięciowych tyle, że nie są to źródła doskonałe.

W każdym razie określenie **źródło napięciowe** wskazuje na coś, co samo w sobie jest źródłem napięcia.

Rzeczywiście, każda bateria, akumulator czy zasilacz ma jakieś napięcie nominalne. A prąd? Prąd nas mniej obchodzi – o wartości prądu zadecyduje przecież wielkość dołączanego potem obciążenia.

Źródło napięciowe już znasz, ale teraz masz przyswoić sobie pojęcie **źródła prądowego**.

Na **rysunku 4** znajdziesz często używany symbol źródła prądowego. W literaturze spotyka się różne symbole źródła prądowego. My będziemy się posługiwać tym z rysunku 4. Bardzo często na schematach strzałką oznacza się kierunku przepływu prądu (cały czas rozmawiamy o obwodach prądu stałego, a nie zmiennego).

Teraz może zbuntujesz się i powiesz, że w żadnym sklepie nie można kupić elementu zwanego źródłem prądowym. Można kupić baterie, rezystory, kondensatory, tranzystory, układy scalone, ale nie źródło prądowe. A jak nie ma w sklepach, to po co to całe gadanie?

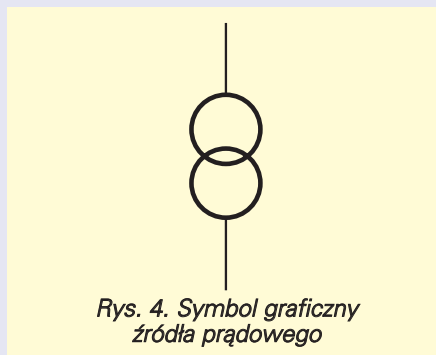
Rzeczywiście, **źródło prądowe** jest tworem cokolwiek egzotycznym, ale nie masz racji. Bądź cierpliwy.

Mój kochany, jeśli naprawdę chcesz rozumieć elektronikę, to od początku musisz się przyzwyczaić do tego, że w elektronice często stosujemy pewne uproszczenia i wyobrażamy sobie pewne doskonałe modele. Właśnie takim modelem jest doskonałe źródło napięciowe. W tym przypadku chyba nie masz zastrzeżeń i problemów ze zrozumieniem. Na **rysunku 5** znajdziesz dwie wersje tego samego schematu: doskonałe źródło napięciowe współpracuje z rezystorem.

Dlaczego na rysunkach 5a i 5b odmiennie zaznaczono źródło napięcia? Symbol źródła z rysunku 5a stosujemy do teoretycznych rozważań – tak oznaczmy doskonałe źródło napięciowe, model nie występujący nigdzie w rzeczywistości. Natomiast symbol źródła napięcia z rysunku 5b powszechnie stosujemy do

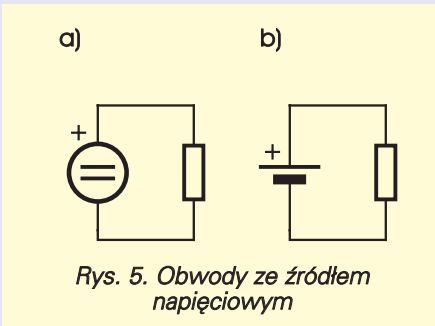
Dlaczego na rysunkach 5a i 5b odmiennie zaznaczono źródło napięcia?

Symbol źródła z rysunku 5a stosujemy do teoretycznych rozważań – tak oznaczmy doskonałe źródło napięciowe, model nie występujący nigdzie w rzeczywistości. Natomiast symbol źródła napięcia z rysunku 5b powszechnie stosujemy do



Rys. 4. Symbol graficzny źródła prądowego

## Pierwsze kroki



oznaczania rzeczywistych źródeł napięcia, takich jak bateria, akumulator czy nawet zasilacz.

Być może jeszcze nie chwytasz jaka jest różnica między doskonałym i niedoskonałym źródłem napięcia.

To proste!

Doskonałe źródło napięciowe to taki hipotetyczny element, który jest źródłem napięcia o określonej wartości. Napięcie to jest ustalone i ani trochę nie zależy od prądu, jaki pobierany jest ze źródła. Wartość prądu płynącego przez rezystor jest określona wzorem

$$I = \frac{U}{R}$$

Uważaj teraz: takie doskonałe źródło napięcia teoretycznie może dostarczać prądu o natężeniu od zera do wartości nieskończenie wielkiej, a napięcie zawsze pozostawać takie same.

Jeszcze raz powtarzam: oczywiście nikt nigdy nie widział doskonałego źródła napięciowego, a mimo to pojęcie takie często stosujemy w rozważaniach i obliczeniach teoretycznych.

A czym różni się niedoskonałe, czyli rzeczywiste źródło napięcia?

Wiesz z doświadczenia, że z baterii nie można pobierać nieskończenie dużego prądu. Już dołączenie żarówki do małej baterii powoduje zmniejszenie napięcia na jej zaciskach. Jak to zjawisko uwzględnić przy teoretycznych obliczeniach? Czy próbować jakoś zapisać, że napięcie wyjściowe baterii (niedoskonałego źródła) jest zależne od pobieranego prądu?

Można coś takiego wymyślić, ale dużo prostsze i łatwiejsze do intuicyjnego pojęcia jest wyobrażenie sobie, że niedoskonałe źródło napięcia w rzeczywistości składa się z doskonałego źródła napięciowego i szeregowej rezystancji wewnętrznej  $R_w$ . Pokazano to na **rysunku 6**. Napięcie w elektronice oznacza się zwykle literą  $U$ , jednak w przypadku doskonałego źródła napięcia stosuje się literkę  $E$ . Zapewne już słyszałeś o czymś takim jak siła elektromotoryczna, w skrócie SEM. Owa siła elektromotoryczna to napięcie doskonałego źródła napięciowego. Natomiast napięcie rzeczywistej baterii jest równe sile elektromotorycznej tylko przy zerowym poborze

prądu. Przy zwiększaniu prądu zwiększa się spadek napięcia na rezystancji  $R_w$  i tym samym użyteczne napięcie baterii zmniejsza się. Nie masz chyba wątpliwości, że rezystancja wewnętrzna  $R_w$  małej 12-woltowej baterijki jest dużo, dużo większa, niż 12-woltowego akumulatora samochodowego.

Zauważ jeszcze, że wartość  $R_w$  wyznacza pewien maksymalny prąd, który można pobrać z niedoskonałego źródła. Ten maksymalny prąd płynący przy zwarciu zacisków źródła (czyli przy zerowym napięciu użytecznym) ma wartość  $I_{max} = E / R_w$ . Większego prądu z rzeczywistego źródła napięcia pobrać się po prostu nie da! Zapamiętaj ten wniosek, bo będzie ci jeszcze potrzebny.

W praktyce, ze względów ekonomicznych, prąd pobierany z rzeczywistego źródła powinien być mniejszy niż połowa tego prądu maksymalnego  $I_{max}$ .

Teraz przechodzimy do **źródła prądowego**.

Jeśli już teraz potrafisz wyobrazić sobie element elektroniczny, który sam w sobie byłby źródłem prądu o stałym natężeniu, to właśnie masz przed sobą (idealne czyli doskonałe) źródło prądowe.

Oczywiście podobnie jak doskonałe źródło napięciowe, tak i doskonałe źródło prądowe jest modelem... nieistniejącego urządzenia. Choć nie ma doskonałych źródeł prądowych, niektóre elementy oraz układy elektroniczne w pewnych warunkach zachowują się jak niedoskonałe źródła prądowe. Dlaczego niedoskonałe? To już oddzielny problem, którym zajmiemy się troszkę później.

Na **rysunku 7** znajdziesz schemat obwodu zawierającego źródło prądowe współpracujące z rezystorem.

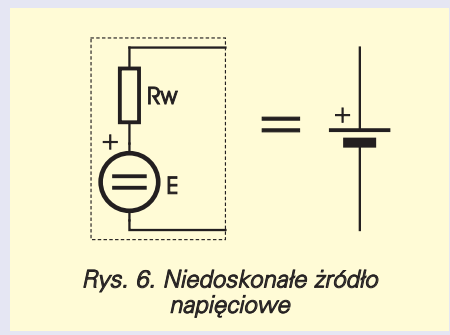
Co możesz powiedzieć o napięciu źródła prądowego?

Najpierw pomyśl samodzielnie...

Wróć do modelu hydraulicznego – nie masz chyba wątpliwości, że hydraulicznym odpowiednikiem źródła prądowego byłaby to pompka o stałej wydajności.

Uważaj teraz, bo z nadmiaru emocji możesz spaść z krzesła:

podobnie jak w przypadku idealnego źródła napięciowego (gdzie prąd zależny był od dołączonego z zewnątrz obciążenia



i mógł wynosić od zera do nieskończoności), analogicznie w **idealnym źródle prądowym, napięcie zależy jedynie od dołączonego obciążenia i może wynosić od zera do nieskończoności!**

Jak to, napięcie może być dowolnie duże???

Tak, wyobraź sobie, że teoretycznie tak. Dokładnie tak samo, jak prąd pobierany z idealnego źródła napięcia może mieć nieskończenie wielką wartość.

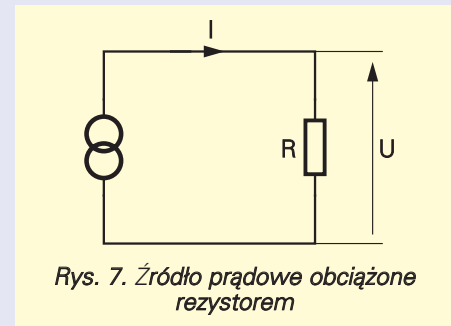
A niby skąd się weźmie to napięcie?

W przypadku hydraulicznej analogii, źródło prądowe to taka pompka, która ma stałą wydajność, czyli choćby nie wiem co, musi przepompować określoną ilość wody. Jeśli napotyka na opór, to ciśnienie wzrasta dotąd, aż przepisana ilość wody przepłynie przez ten opór (jakąś szczelinę).

Możesz sobie podobnie wyobrazić, że idealne źródło prądowe ze swej natury musi zapewnić przepływ prądu i gdy napotka na opór, wtedy napięcie się zwiększa.

Nie ma tu nic tajemniczego – po prostu znów kłania się prawo Ohma. Wszystko to dzieje się zgodnie ze znanym wzorem

$$U = I \times R$$



Gdy do źródła prądowego dołączony zostanie mały opór (rezystancja), to przepływ prądu wytworzy na tej rezystancji niewielkie napięcie, zgodnie z powyższym wzorem. Jeśli rezystancja będzie duża, to i napięcie będzie duże.

Czym większy opór jest dołączony do źródła prądowego, tym większe jest napięcie wytwarzane przez źródło na tym oporze, zgodnie ze wzorem:  
$$U = I \times R$$

Koniecznym utrwal sobie takie rozumienie sprawy. Jeszcze raz kłania się wyobrażenie przyczyny i skutku.

Teraz już chyba doskonale intuicyjnie wyczuwasz, że napięcie, zależnie od sytuacji możemy rozumieć nie tylko jako przyczynę, ale także jako skutek przepływu prądu przez rezystancję. Wybie-

ramy taki punkt widzenia, jaki akurat bardziej pasuje do aktualnych rozważań.

Jeśli zrozumiałeś sprawę źródła prądowego, to właśnie w tej chwili otworzyłeś sobie drogę do zrozumienia zasady działania układów zawierających tranzystory (i nie tylko).

W zasadzie już teraz mógłbym przejść do omawiania tranzystora, ale przypuszczam, że abstrakcyjny model źródła prądowego mógłby okazać się dla ciebie trochę zbyt trudny. Przecież realne układy zasilane są określonym napięciem i słusznie intuicja ci podpowiada, że napięcie nie może tam rosnąć w nieskończoność. Słusznie!

Ale jeśli czytałeś „Listy od Piotra” sprzed roku, to dowiedziałeś się, że w obwodach zawierających cewki (indukcyjność), napięcia mogą być wyższe niż napięcie zasilania. Czy coś podobnego może zdarzać się w tranzystorach?

Nie! Napięcia w obwodach z tranzystorami (nie zawierającymi cewek) nie mogą być większe, niż napięcie zasilania.

Żeby więc nie wpuścić cię w ślepy zaułek, podam ci jeszcze jedną ilustrację.

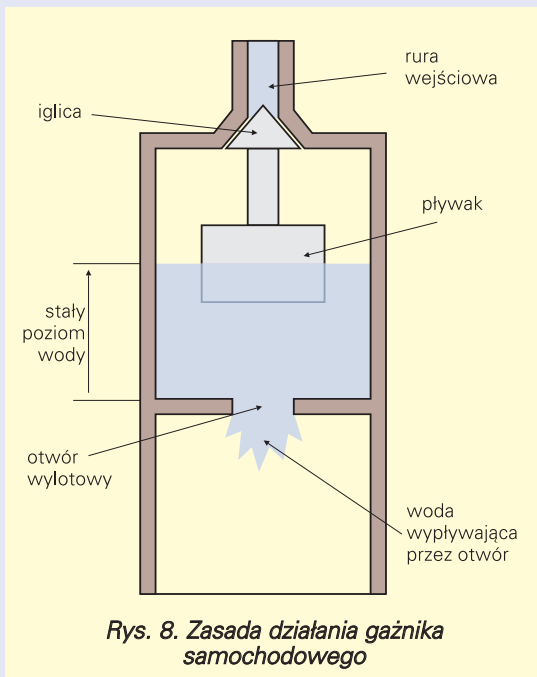
## Gaźnik

Przypomnijmy sobie teraz zasadę działania gaźnika samochodowego. Zaskoczył cię? Tak, gaźnika samochodowego!

Bardzo uproszczony schemat gaźnika znajdziesz na **rysunku 8**. Zasadę działania zapewne znasz, więc odpowiedz na pytania:

Czy poziom benzyny wewnątrz gaźnika zależy od ciśnienia benzyny na wejściu?

Oczywiście, że nie! Czy ciśnienie jest bardzo małe, czy bardzo duże, pływak i współpracująca iglica dbają o to, by w gaźniku zawsze utrzymywał się jednokowy poziom benzyny.



**Rys. 8. Zasada działania gaźnika samochodowego**

Mamy oto stały poziom benzyny. Teraz odpowiedz na pytanie, od czego zależy ilość paliwa wypływającego przez otwór wylotowy?

Może trochę uproszczę sprawę, jeśli powiem, że ilość wypływającej benzyny zależy od wielkości tego otworu wylotowego. W samochodzie rzecz wygląda inaczej, bo w grę wchodzi podciśnienie w kolektorze ssącym i wiele innych czynników, ale my nie studujemy budowy samochodu, tylko szukamy hydraulicznej analogii tranzystora.

Dlatego zastanów się, czy przekonuje cię wniosek, że ilość wypływającej benzyny będzie zależać od wielkości tego otworu wylotowego, a zupełnie nie będzie zależać od ciśnienia benzyny na wejściu gaźnika (przed iglicą)? Zgadzasz się?

W porządku!

Teraz nasz gaźnik zamykamy do czarnej skrzynki i... zapominamy, co się w tej skrzynce znajduje. Nie będziemy się też bawić z benzyną, bo jest łatwopalna i łatwo o nieszczęście. Jeśliby się ta benzyna zapaliła, to spłonąłby ten egzemplarz EdW i nigdy nie zrozumiałbyś do końca działania tranzystora. Dlatego zamiast benzyny, do dalszych doświadczeń będziemy używać wody.

Wracajmy do naszej czarnej skrzynki. Już zdążyliśmy zapomnieć, co jest w jej wnętrzu.

Dołączamy naszą czarną skrzynkę do instalacji wodociągowej i... nie możemy wyjść z podziwu, co to za historia: bez względu na ciśnienie w instalacji, z wylotowej rury woda wypływa zawsze w jednakowym tempie.

Próbujemy zmieniać ciśnienie na wejściu... i nic! Tempo przepływu wody przez czarną skrzynkę jest zawsze takie same, niezależnie od ciśnienia!

Otrzymaliśmy źródło o stałej wydajności.

Teraz wracamy do obwodu elektrycznego. Czy istnieje jakiś elektryczny odpowiednik naszej czarnej skrzynki, w którym niezależnie od przyłożonego napięcia, płynąłby prąd o takim samym natężeniu?

Może jakiś stabilizator? Istotnie, jest to po prostu stabilizator prądu.

Stabilizator prądu po przyłożeniu napięcia przepuszcza prąd o ściśle określonym natężeniu. Chyba nie masz trudności z wyobrażeniem sobie takiego elementu. Przyjmij do wiadomości, że na przykład produkowane są specjalne elementy (układy scalone), które mają takie właściwości, np. LM334.

Zauważ, że taki stabilizator w zasadzie jest... źródłem prądowym! Przecież prąd przez niego płynący jest ustalony i niezależny od napięcia. Oczywiście taki stabilizator sam w sobie nie jest źródłem prądu, bo nie jest magazynem energii. Ponadto napięcie na nim nie może rosnąć w nieskończoność, a tylko do wartości równej napięciu zasilającemu. Niemniej jednak w pewnych warunkach, dla obserwatora zewnętrznego, zachowanie stabilizatora prądu wcale nie różni się od zachowania „prawdziwego” źródła prądowego.

Teraz zapamiętaj ważną informację: **w praktyce źródłem prądowym nazywamy nie tylko „prawdziwe” źródło prądowe, będące magazynem energii, ale również element lub układ, którego prąd nie zmienia się pod wpływem przyłożonego napięcia.**

Powiem więcej – w większości wypadków mówiąc „źródło prądowe” będziemy myśleć właśnie o stabilizatorze prądu, czyli po prostu elemencie lub układzie elektronicznym o stałej wydajności prądowej, niezależnej od napięcia zasilającego.

Jak się słusznie domyślasz, od takiego stabilizatora prądu już tylko krok do tranzystora.

## Tranzystor jako sterowane źródło prądowe

Właściwie ten tytuł już mówi wszystko. Krótko mówiąc, tranzystor trzeba traktować jako sterowane źródło prądowe.

Zanim zaczniemy to analizować, znajdziemy jednak dla naszego tranzystora jakąś hydrauliczną analogię.

Przed chwilą opowiadałem ci trochę o gaźniku. Idźmy tym tropem.

Na **rysunku 9a** masz coś podobnego, jak na rysunku 8, tyle że dodałem możliwość regulacji przekroju otworu wylotowego. Przesuwając zasuwkę mogą teraz regulować szybkość wypływu wody przez kanał wejściowy.

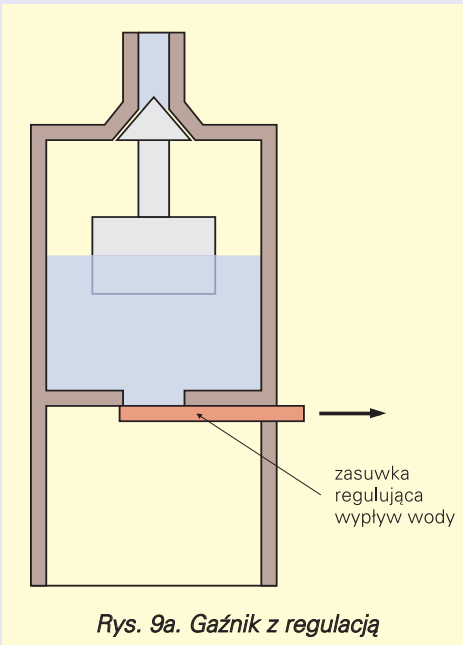
Mamy więc urządzenie podobne do omówionego wcześniej źródła prądowego: wydajność, czyli przepływ wody zależy tylko od ustawienia zasuwki, jest natomiast niezależna od ciśnienia w kanale wejściowym.

Elektrycznym odpowiednikiem takiego urządzenia jest sterowane źródło prądowe, które na schematach ma oznaczenie pokazane na **rysunku 9b**.

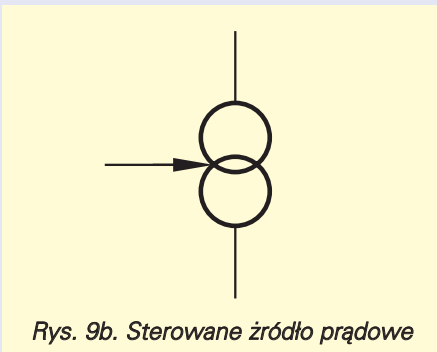
Poznałeś oto sterowane źródło prądowe. Świetnie! Ale to jeszcze nie wszystko.

Co w tranzystorze jest czynnikiem sterującym wartością prądu źródła prądowego?

## Pierwsze kroki



Rys. 9a. Gaźnik z regulacją



Rys. 9b. Sterowane źródło prądowe

Popatrz na **rysunek 10**. Uzupełniamy takie sterowane źródło o niewielki kanał z klapką, która jest połączona z zasuwką. Niewielka i słaba sprężynka powoduje, że w stanie spoczynku klapka zamyka przekrój kanału, a zasuwka całkowicie zamyka wylot „gaźnika”. Tym samym przez nasz „gaźnik” nie może płynąć żaden prąd, bo pływak i iglica skutecznie zamykają kanał wejściowy.

Ale oto wpuszczamy wodę do dodatkowego kanału z klapką. Już niewielkie ciśnienie wody wystarczy, by przezwyciężyć siłę sprężynki i odchylić klapkę.

A odchylenie klapki oznacza otwarcie zasuwki i przepływ wody przez „gaźnik”. Przez „gaźnik” zaczyna płynąć woda. Ilość tej wody zależy od stopnia otwarcia klapki, czyli od ilości wody przepływającej przez dodatkowy kanał. Wszystko jest tak dobrane, że już niewielki przepływ wody przez ten kanał powoduje znaczne otwarcie klapki i przepływ znacznie większego strumienia wody przez gaźnik.

I oto mamy hydrauliczny model tranzystora w pełnej krasie!

Dokładnie tak samo jest z przepływem prądu w tranzystorze pokazanym na **rysunku 11**. Niewielki prąd płynący od bazy do emitera uchyla jakąś tam „klapkę” i umożliwia przepływ znacznie większego prądu od kolektora do emitera.

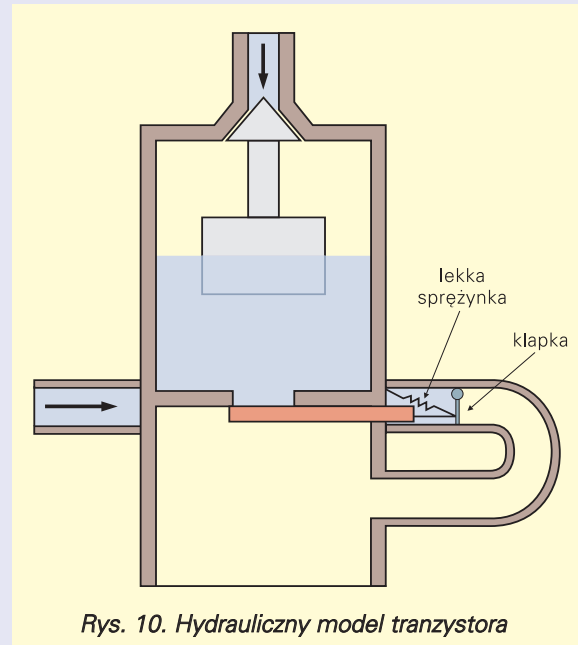
Ten pierwszy, mały prąd, nazywany prądem bazy i oznaczamy  $I_B$ , natomiast ten drugi, duży prąd, nazywamy prądem kolektora i oznaczamy  $I_C$ . Oczywiście oba te prądy spływają się w obwodzie emitera, więc możemy zapisać:

$$I_E = I_C + I_B$$

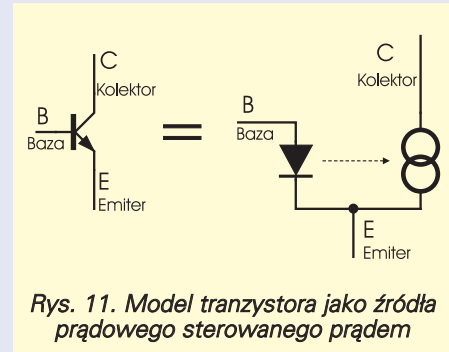
Prąd bazy możemy nazwać prądem sterującym, a prąd kolektora – prądem sterowanym. Jeśli zmienia się prąd bazy, to proporcjonalnie zmienia się prąd kolektora.

Jeśli czytałeś listy od Piotra sprzed roku, to nie zdziwi cię, że klapka ze sprężynką, przepuszczająca prąd w jednym kierunku, jest odpowiednikiem diody. Stąd na **rysunku 11** pojawił się symbol diody.

Oczywiście prąd sterujący  $I_B$  jest znacznie mniejszy niż prąd sterowany  $I_C$ , inaczej cała ta zabawa nie miałaby sensu.



Rys. 10. Hydrauliczny model tranzystora



Rys. 11. Model tranzystora jako źródła prądowego sterowanego prądem

Stosunek prądu kolektora do prądu bazy nazywamy wzmocnieniem tranzystora i często oznaczamy grecką literą beta ( $\beta$ ).

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

W katalogach spotyka się inne oznaczenie wzmocnienia prądowego – w postaci  $h_{21E}$ . Odpowiedź na pytanie, skąd się wzięło to „ha dwadzieścia jeden e” i dlaczego spotyka się zarówno  $h_{21E}$ , jak i  $h_{21e}$  wykracza jednak poza ramy tego artykułu.

Na razie wystarczy żebyś wiedział, iż obecnie produkowane typowe tranzystory małej mocy mają współczynnik wzmocnienia prądowego powyżej 100, a często można spotkać tranzystory o wzmocnieniu 500 i więcej.

I co? Przejaśniło ci się wreszcie pod sufitem? Przez najbliższy miesiąc ciesz się, że wreszcie zrozumiałeś z grubsza działanie tranzystora, a w następnym odcinku znajdziesz wiele kolejnych ważnych wiadomości o tranzystorach.

Piotr Górecki

**K  
O  
N  
K  
U  
R  
S**

Wiem, że ten artykuł będą czytać także bardziej zaawansowani czytelnicy. Dla nich wszystkie podane informacje są oczywiste. Co innego jednak rozumieć temat, a co innego przekazać wiadomości innym.

Dla wszystkich, których wiedza daleko przekracza ramy podane w artykule, a nie zaudzili się na śmierć i dotarli aż do tego miejsca, proponuję drobny konkurs:

**Narysujcie hydrauliczny model tranzystora MOSFET oraz tranzystora JFET.**

W przypadku tranzystora MOSFET trzeba jakoś przedstawić szkodliwą pojemność wejściową  $C_{GS}$ , a w przypadku JFETa – złącze kanał-bramka.

Autorzy najlepszych propozycji otrzymają nagrody książkowe.

Termin nadsyłania prac upływa w momencie pojawienia się następnego, marcowego wydania EdW.