

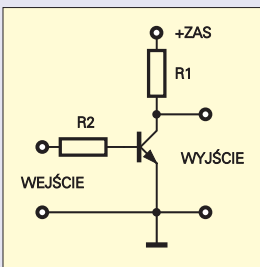


Przed miesiącem dowiedziałeś się, jak tranzystor wzmacnia napięcie. Tematem wzmacniania sygnałów zmiennych zajmiemy się dokładniej w przyszłości, a dziś podam ci trochę informacji na temat pracy tranzystora w roli przełącznika oraz w innych oryginalnych zastosowaniach.

### Tranzystor jako przełącznik

Może wyobrażasz sobie, że tranzystory służą jedynie do wzmacniania napięć zmiennych, na przykład przebiegów audio. Tak nie jest. Tranzystory wykorzystuje się w różny sposób, często jako przełączniki.

Tu sprawa jest prosta: Najprostszy przełącznik to po prostu układ z **rysunku 34**. Gdy napięcie na wejściu jest równe zero, tranzystor nie przewodzi – jest zatkany, i na wyjściu (na kolektorze) występuje pełne napięcie zasilające. Po podaniu na wejście napięcia dodatniego (zgodnie z rysunkiem 31, większego od 0,6V) tranzystor otwiera się i napięcie na kolektorze spada niemal do zera. W takim zastosowaniu tranzystor pełni rolę układu logicznego zwanego negatorem. Podanie na wejście stanu wysokiego (napięcia) spowoduje pojawienie



Rys. 34.

się na wyjściu stanu niskiego (brak napięcia), i na odwrót. Bardzo często stosujemy tranzystor w takiej roli w układzie zawierającym scalone układy logiczne.

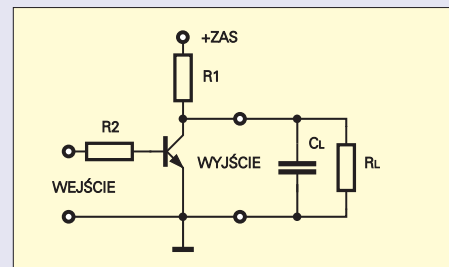
Jak zapewne wiesz, układy logiczne rodziny CMOS w stanie spoczynku nie pobierają prądu ze źródła zasilania. Niestety, negator z rysunku 34 pobiera prąd, gdy tranzystor jest otwarty. Żeby zmniejszyć pobór prądu można zwiększyć rezystancję obciążenia R1. Przy napięciu 10V i rezystancji R1 równej 10MΩ pobór prądu wyniesie tylko 1μA. Stop! Tu tkwi pułapka.

Stosując układy cyfrowe zwracamy uwagę nie tylko na pobór prądu, ale i na szybkość. Tymczasem zwiększając w tranzystorowym negatorze rezystancję R1, możesz katastrofalnie zmniejszyć jego szybkość, a niekiedy zupełnie uniemożliwić jego działanie. Nie zapomnij, że do wyjścia takiego negatora dołączone są inne obwody. Takie obwody przedstawiają sobą jakąś pojemność (choćby pojemności montażowe między ścieżkami) i jakąś rezystancję – zaznaczyłem ci to na **rysunku 35** jako C<sub>L</sub> i R<sub>L</sub>. Nawet gdyby rezystancja R<sub>L</sub> była ogromnie wielka (np. rezystancja wejściowa układów cyfrowych CMOS), to i tak przy wyłączaniu tranzys-

tora prąd do naładowania pojemności C<sub>L</sub> popłynie przez rezystor R1. Ile czasu trzeba, by naładować tę pojemność? Szacunkowo będzie to czas  $t = R1 \times C$ , czyli  $t = 10M\Omega \times 50pF = 500\mu s = 0,5ms$

Pół milisekundy to dla układów logicznych wieczność. W takiej sytuacji twój negator mógłby pracować przy sygnałach o częstotliwości co najwyżej 1...2kHz!

Żeby umożliwić pracę przy większych częstotliwościach musisz koniecznie zmniejszyć rezystancję R1, a to zwiększy pobór prądu – nie ma wyjścia. Zauważ jednak, że taka niesprzyjająca sytuacja ma miejsce tylko przy wyłączaniu tranzystora, gdy pojemność C<sub>L</sub> ładuje się przez rezystor R1. Przy otwieraniu tranzystora zmiany następują szybciej, bo przez tran-



Rys. 35.

zystor mogą płynąć większe prądy (bylebyś tylko nie umieścił zbyt dużej rezystancji R2 w obwodzie bazy). **Rysunek 36** pokazuje przebieg zmian napięcia na wejściu i wyjściu tranzystora z rysunku 35. Myślę, że już rozumiałeś sprawę szybkości narastania napięcia na wyjściu.

Przy okazji chciałem ci zwrócić uwagę na zależność między napięciem bazy, a napięciem kolektora. Jak się dowiedziałeś, napięcie na bazie przewodzącego tranzystora wynosi 0,5...0,7V. Teraz wyszło na jaw, że napięcie na kolektorze (w stanie nasycenia) może mieć wartość rzędu kilku czy kilkunastu miliwoltów, czyli... **napięcie na kolektorze może być mniejsze niż napięcie na bazie**.

To nie jest jakaś superważna sprawa, ale już teraz mogę ci powiedzieć, że wejście w głębokie nasycenie co prawda minimalnie (o jakieś drobne miliwolt) zmniejsza napięcie kolektora, ale opóźnia potem proces przełączania od nasycenia do stanu zatkania. Ma to znaczenie w układach logicznych, gdzie chodzi o uzyskanie jak najkrótszych czasów przełączania, rzędu pojedynczych nanosekund ( $1\text{ns} = 0,000000001\text{s}$ ). Wyobraź sobie, że wymyślono prosty sposób na zmniejszenie czasu wychodzenia tranzystora ze stanu nasycenia. Sposób ten jest powszechnie stosowany w rodzinach bipolarnych scalonych układów logicznych cyfrowych (rodziny 74S, 74LS, 74ALS, 74FAST). Sposób ten, pokazany na **rysunku 37a** polega na włączeniu diody Schottky'ego między bazę i kolektor tranzystora. Jeśli jeszcze nie wiesz – dioda Schottky'ego to taka specjalna dioda (krzemowa), która ma napięcie przewodzenia rzędu 350...400mV, czyli znacznie niższe, niż typowe diody krzemowe (500...700mV). W stanie odcięcia napięcie na kolektorze jest równe napięciu zasilającemu, dioda ta jest spolaryzowana zaporowo, i nie ma wpływu na pracę układu. Gdy pojawi się prąd bazy, napięcie na kolektorze chce spaść niemal do zera. Ale wtedy zaczyna przewodzić dioda Schottky'ego i zabiera część prądu bazy. W efekcie zmniejsza się prąd bazy i tranzystor nie może wejść

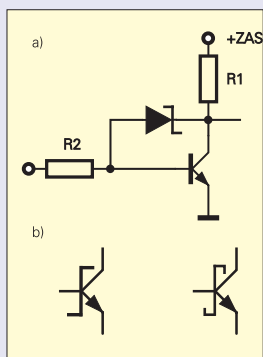
w stan nasycenia. Nie pozwala mu dioda, która przejmując część prądu bazy. Tranzystor z taką dodatkową diodą (koniecznie Schottky'ego) nazywany jest czasem tranzystorem Schottky'ego i oznaczany (zwłaszcza w katalogach układów cyfrowych 74S, 74LS) jak na **rysunku 37b**. Oczywiście włączenie zwykłej diody nic tu nie pomoże.

Dlaczego ci to tak dokładnie tłumaczę? W praktyce w swoich układach nigdy nie będziesz włączał diody według rysunku 37a. Natomiast będziesz stosował tranzystory w połączeniu z **rysunku 38a**, gdzie włączenie (otwarcie do stanu nasycenia) tranzystora T1 na pewno zatka otwarty wcześniej (dzięki rezystorowi R1) tranzystor T2. Przy okazji zastanów się nad napięciem na kolektorze T1. W stanie zatkania tranzystora T1 napięcie na jego kolektorze będzie równe... **około 0,6...0,7V** – napięcie to będzie przecież napięciem bazy T2, który będzie otwarty (nasycony). Gdy tranzystor T1 zostanie otwarty (nasycony), przejmie cały prąd płynący dotychczas do bazy T2, i tranzystor T2 zostanie zatkany.

Pamiętaj, że w takim układzie, napięcie kolektora T1 zmienia się w zakresie od zera do 0,6...0,7V, a nie od zera do pełnego napięcia zasilającego. To niby prosta sprawa, ale zapomina o tym wielu początkujących i potem inny obwód, współpracujący z takim tranzystorem nie chce działać.

Co zrobić, by napięcie na kolektorze (które będzie wykorzystywane przez inne układy) zmieniało się w zakresie od zera do (prawie) napięcia zasilającego? Zazwyczaj wystarczy dodać rezystor, jak na **rysunku 38b**. Zauważ, że rezystory R1, R4 i złącze baza-emiter T2 przy zatkanie T1 tworzą dzielnik napięcia. Jaki powinien być stosunek rezystancji R1 do R4, by uzyskać możliwie duże napięcie na kolektorze? Oczywiście R4 powinien mieć możliwie dużą rezystancję, ale nie za dużą, by prąd przez niego płynący wprowadził tranzystor T2 w stan nasycenia.

Teraz ćwiczenie. Oblicz napięcia w punktach zaznaczonych w układzie z **rysunku 39** (punkty A i B) przy napięciach na wejściu równych 0 oraz +10V, zakładając, że napięcia baza-emiter tranzystorów wynoszą 0,6V. Odpowiedź znajdziesz na końcu artykułu. Dobrze ci radzę,



Rys. 37.

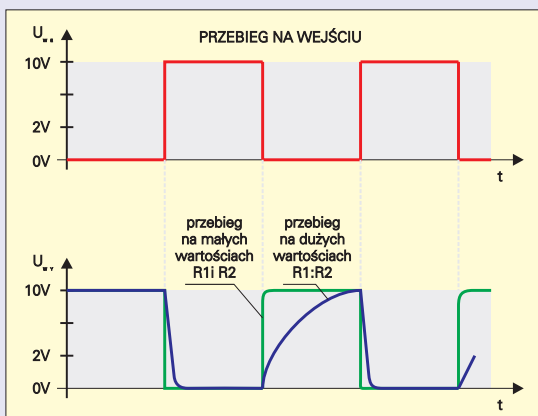
nie lekceważ ćwiczeń: przeprowadź obliczenia i dopiero wtedy sprawdź odpowiedź. I raz na zawsze zapamiętaj, że napięcie na kolektorze w stanie zatkania zależy od obwodów połączonych do kolektora i wcale nie musi być równe napięciu zasilającemu.

Idziemy dalej.

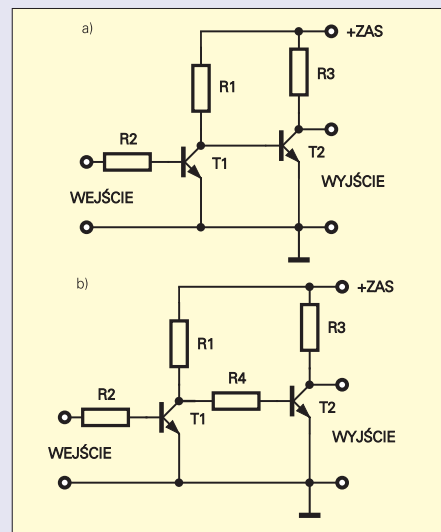
Przy projektowaniu nietypowych układów przełączających, być może zechcesz zastosować sposób pokazany na **rysunku 40a**. Jeśli w roli diody D1 zastosujesz diodę Schottky'ego, nie ma żadnego problemu: w stanie zatkania tranzystora T1, napięcie na jego kolektorze jest równe napięciu zasilającemu, dioda jest spolaryzowana zaporowo, nie płynie przez nią prąd i tranzystor T2, dzięki rezystorowi R3 jest nasycony. Gdy tranzystor T1 będzie nasycony, przejmie prąd, który wcześniej płynął do bazy T2. Napięcie na bazie T2 będzie równe sumie napięcia nasycenia T1 (nie większe niż 100mV) i napięcia przewodzenia diody Schottky'ego (do 400mV) czyli nie przekroczy 0,5V. Przy takim napięciu bazy tranzystor T2 na pewno będzie zatkany.

A gdybyś zastosował zwykłą diodę, jak na **rysunku 40b**? Tu sprawa nie jest prosta! Napięcie przewodzenia diody i złącza baza-emiter T2 są zbliżone. Wręcz nie sposób obliczyć, czy ze zwykłą diodą uda ci się zatkać tranzystor T2. Jak już wiesz, prąd bazy i kolektora ogromnie zmienia się przy niewielkich zmianach napięcia bazy. Wystarczy kilka miliwoltów, by radykalnie zmienić sytuację. Omawialiśmy to przed miesiącem.

Czy potrafisz przewidzieć stan tranzystora T2? Nie. Przede wszystkim nie znasz dokładnej wartości napięć: nasycenia tranzystora T1, napięcia przewodzenia diody D1 i napięcia  $U_{BE}$  tranzystora T2. Nawet gdybyś je zmierzył lub zbudował układ i stwierdził, że jednak tranzystor T2 zatyka się po otwarciu T1, to czy przy zmianach temperatury układ też będzie

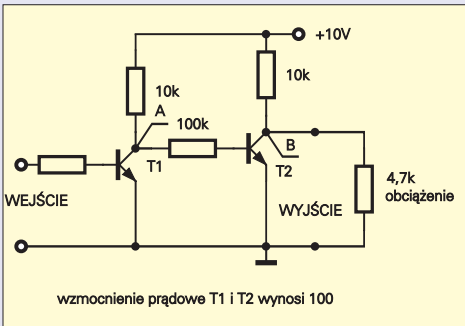


Rys. 36.



Rys. 38.

## Pierwsze kroki



Rys. 39.

działał poprawnie? Zwłaszcza wtedy, gdy tranzystor T2 ogrzeje się pod wpływem przepływającego przez siebie prądu? Pamiętaj, że temperatura znacznie wpływa na napięcie przewodzenia diody i złącza B-E.

Właśnie ze względu na słabą stabilność parametrów nie polecam ci układu z rysunku 40b, nawet gdyby po złożeniu działał poprawnie. Nie masz gwarancji, że przy zmianach temperatury, albo po wymianie elementów nadal będzie pracował bez zarzutu.

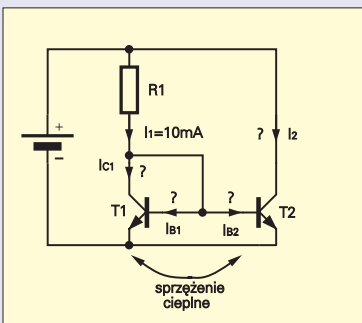
Znów powróciliśmy do jakże ważnej sprawy praktycznej: stabilności parametrów. Choć tranzystor z natury nie jest „zwierzęciem” zbyt stabilnym, jednak przy odrobinie sprytu można tę stabilność radykalnie poprawić. To szeroki temat, dziś nie będziemy się w to wgłębiać, na koniec pokażę ci tylko jeden interesujący przykład, gdzie potrafimy wyeliminować zależność od temperatury.

### Lustro prądowe

Na rysunku 41 znajdziesz schemat najprostszego lustra prądowego. Na pierwszy rzut oka układ wygląda to co najmniej dziwnie. Ale nie jest to żadne oszustwo – takie układy są wykorzystywane w praktyce znacznie częściej, niż przypuszczasz. Na pewno polubisz ten układ i będziesz go czasem stosował w swoich konstrukcjach.

Jak on działa? Ty decydujesz, jaką wartość ma mieć prąd  $I_1$ . Niejako wpuszczasz ten prąd w układ. Co się dzieje dalej?

Przyjmując, że tranzystory są identyczne i mają wzmacnienie równe 500, podaj wartości prądów zaznaczonych na rysunku 41 znakami zapytania ( $I_{C1}$ ,  $I_{B1}$ ,  $I_{B2}$ ,  $I_2$ ).



Rys. 41.

Spróbuj to obliczyć zanim zaczniesz czytać dalszą część artykułu.

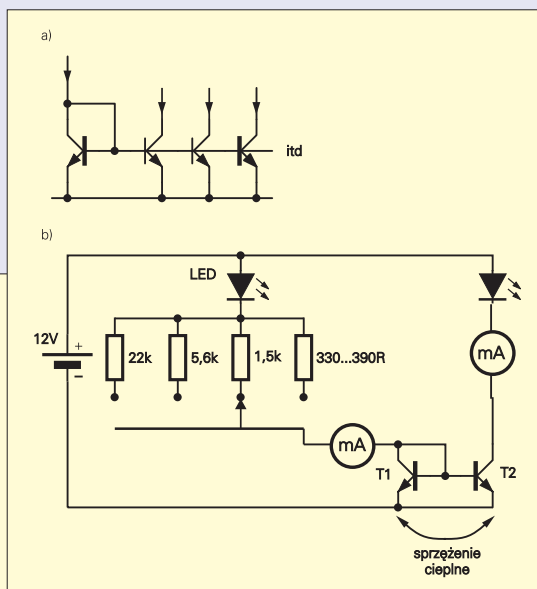
I co? Zaplątałeś się? Wydaje ci się, że cały prąd popłynie przez obwód baza-emiter tranzystora T1? A może jesteś przerażony, że zwarłem do plusa zasilania kolektor T2? Spokojnie!

W obwodzie baza-emiter T1 płynie tylko mały prąd, wynoszący mniej więcej  $1/500$  prądu  $I_1$  (dokładnie  $1/500$  prądu kolektora T1). W punkcie A występuje jakieś napięcie  $U_{BE}$  w zakresie  $0,5...0,7V$ . Dokładna wartość tego napięcia zupełnie nas nie interesuje, będzie się ona zresztą zmieniać z temperaturą. Ważne jest coś innego: tranzystory są identyczne, i na ich bazach występuje to samo napięcie. Jeśli są identyczne, to... oczywiście prądy kolektorów też będą identyczne. Czyli prąd  $I_2$  będzie równy prądowi  $I_{C1}$ . Czy prąd  $I_2$  jest równy prądowi  $I_1$ ?

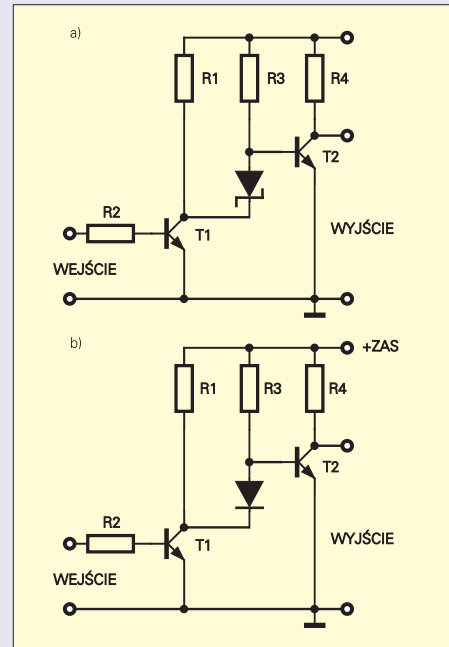
Niezupełnie, ściśle biorąc jest mniejszy o „dwa prądy bazy”, czyli mniej więcej  $1/250$  prądu  $I_{C1}$ . Wynosi więc około 99,6% prądu  $I_1$  (teoretycznie 99,601594%). W praktyce te 0,4% możemy pominąć i śmiało przyjąć, że prąd  $I_1$  jest równy prądowi  $I_2$ .

To właśnie jest układ lustra prądowego – wpuszczamy jakiś prąd  $I_1$ , i w drugiej gałęzi płynie prąd  $I_2$  o takiej samej wartości. Warunkiem poprawnego działania jest nie tyle zastosowanie identycznych tranzystorów, co raczej zapewnienie dobrego sprzężenia cieplnego, by oba tranzystory miały jednakową temperaturę. Najprościej jest zrealizować je w układzie scalonym, ale ty możesz po prostu umieścić oba tranzystory blisko siebie i zacisnąć na tej parze koszulkę termokurczliwą.

W schematach wewnętrznych układów scalonych wzmacniaczy spotkasz obwody jak na rysunku 42a. W praktyce spotkasz (i wykorzystasz) układ z rysunku



Rys. 42.



Rys. 40.

41. W ramach ćwiczeń praktycznych zbuduj układ z rysunku 41b i zmierz prądy, stosując różne tranzystory i podgrzewając je suszarką do włosów. Spróbuj użyć tranzystorów różnego typu, w tym także tranzystorów mocy i kombinacji tranzystora dużej mocy z tranzystorem małej mocy. Przekonaj się sam, iż jeśli tranzystory będą mieć tę samą temperaturę, uzyskasz proporcjonalność obu prądów (właśnie proporcjonalność, a nie równość ze względu na gęstość prądu w złączach) w szerokim zakresie zmian prądu.

Omawiany układ lustra prądowego nie jest może najważniejszy w naszym zgłębianiu tajemnic tranzystora, ale chciałem ci pokazać między innymi, że choć tranzystory są dość kapryśne i nie sposób dokładnie określić napięcia  $U_{BE}$ , (bo zależy ono i od prądu bazy i od zmian temperatury), to przy odrobinie sprytu można się od tych zmian uniezależnić, a nawet je w ciekawy sposób wykorzystać.

W przyszłym miesiącu zapoznam cię z kolejnymi podstawowymi parametrami tranzystora, a dopiero później omówimy kilka praktycznych układów tranzystora jako wzmacniacza sygnałów zmiennych.

Piotr Górecki

### Odpowiedzi (do rys. 39)

1. Napięcie wejściowe równe zero: T1 - zatkany, T2 - nasycony. W punkcie A: 1,45V. W punkcie B: kilkadziesiąt mV (napięcie nasycenia T2).
2. Napięcie wejściowe równe +10V: T1 - nasycony, T2 - zatkany. W punkcie A: kilkadziesiąt mV (napięcie nasycenia T1). W punkcie B: 3,197V.