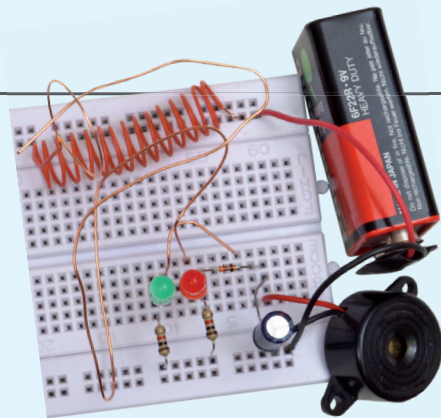




PRAKTYCZNY KURS cz. 5 ELEKTRONIKI



Oto piąta część PRAKTYCZNEGO KURSU ELEKTRONIKI, który zainaugurowaliśmy w numerze lutowym MT i będziemy kontynuować przez kilkanaście miesięcy. Zainteresowanie tym kursem jest olbrzymie, dlatego zdecydowaliśmy się umożliwić czytelnikom dołączenie do kursu w dowolnym momencie. Po prostu, wszystkie poprzednie części są dla wszystkich dostępne w formacie PDF na stronie www.mt.com.pl. Można z nich korzystać w komputerze lub wydrukować sobie. Publikacja każdej kolejnej części jest zawsze poprzedzona jedną stroną wstępnych informacji (jest to właśnie ta strona), żeby nowi czytelnicy mogli zapoznać się z zasadami KURSU i dołączyć do kursantów. ZAPRASZAMY!

Jeśli nie masz błędnego pojęcia o elektronice, ale chętnie byś poznał jej podstawy, to nadarza Ci się jedyna, niepowtarzalna okazja. We współpracy z bratnią redakcją miesięcznika Elektronika dla Wszystkich rozpoczęliśmy w Młodym Techniku cykl kilkunastu fascynujących lekcji dla zupełnie początkujących. Jest to **Praktyczny Kurs Elektroniki (PKE)** z akcentem na **Praktyczny**, gdyż każda Lekcja składa się z **projektu i wykładu z ćwiczeniami**, przy czym **projekt** to konkretny układ elektroniczny samodzielnie montowany i uruchamiany przez „kursanta”. Pewnie myślisz sobie – pięknie, ale jak ja mam montować układy nie mając lutownicy ani żadnych części elektronicznych. Otóż jest rozwiązanie. Lutownicy nie będziesz w ogóle używać, gdyż wszystkie układy będą montowane na **platce stykowej**, do której wkłada się „nóżki” elementów na wcisk.

I rzecz najważniejsza! Wydawnictwo AVT przygotowało zestaw **EdW 09**, zawierający płytkę stykową i wszystkie elementy, jakie będą potrzebne do wykonania kilkunastu projektów zaplanowanych w PKE. Zestaw **EdW 09** można kupić w sklepie internetowym www.sklep.avt.pl lub w sklepie firmowym AVT (Warszawa, ul. Leszczyńska 11) – cena brutto 47 zł.

Ale Ty nie musisz kupować! Dostaniesz ten zestaw **za darmo**, jeśli jesteś prenumeratorem MT lub wykupisz wkrótce prenumeratę. Wystarczy wysłać na adres: prenumerata@avt.pl dwa zdania:

„Jestem prenumeratorem MT i zamawiam bezpłatny zestaw EdW09. Mój numer prenumeraty:

Jeśli otrzymamy to zamówienie przed 31. maja 2013 roku, to zestaw **EdW09** wyślemy Ci w połowie czerwca wraz z lipcowym numerem MT.

Uwaga uczniowie!

Szkoły prenumerujące MT otrzymają **Pakiety Szkolne PS EdW09**, zawierające po **10 zestawów EdW09** (każdy zestaw EdW09 zawiera komplet elementów z płytką stykową) skalkulowane na zasadach non profit w promocyjnej cenie 280 zł brutto za jeden pakiet PS EdW09 (tj. z rabatem 40% – 28 zł brutto za pojedynczy zestaw EdW09, którego cena handlowa wynosi 47 zł). Upewnij się, czy Twoja szkoła prenumeruje MT (niemal wszystkie szkoły ponadpodstawowe i wiele podstawowych otrzymują MT w prenumeracie sponsorowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego) i przekaz nauczycielom informację o **Praktycznym Kursie Elektroniki** z promocyjnymi dostawami **Pakietów Szkolnych PS EdW09** do ćwiczeń praktycznych.

Zestaw EdW09 zawiera następujące elementy (specyfikacja rodzajowa):

- | | |
|--------------------------------|-----------|
| 1. Diody prostownicze | 4 szt. |
| 2. Układy scalone | 4 szt. |
| 3. Tranzystory | 8 szt. |
| 4. Fotorezystor | 1 szt. |
| 5. Przekaznik | 1 szt. |
| 6. Kondensatory | 22 szt. |
| 7. Mikrofon | 1 szt. |
| 8. Diody LED | 11 szt. |
| 9. Przewód | 1 m |
| 10. Mikroswitch | 2 szt. |
| 11. Piezo z generatorem | 1 szt. |
| 12. Rezystory | 64 szt. |
| 13. Srebrzanka | 1 odcinek |
| 14. Zatrask do baterii 9V | 1 szt. |
| 15. Płytki stykowe prototypowa | 1 szt. |
| 840 pól stykowych | 1 szt. |

Jest to specyfikacja ostateczna, nieznacznie skorygowana w stosunku do wydania opublikowanego przed miesiącem.

Cena zestawu **EdW09** – 47 zł brutto (www.sklep.avt.pl)

Uwaga Szkoły

Tylko dla szkół prenumerujących Młodego

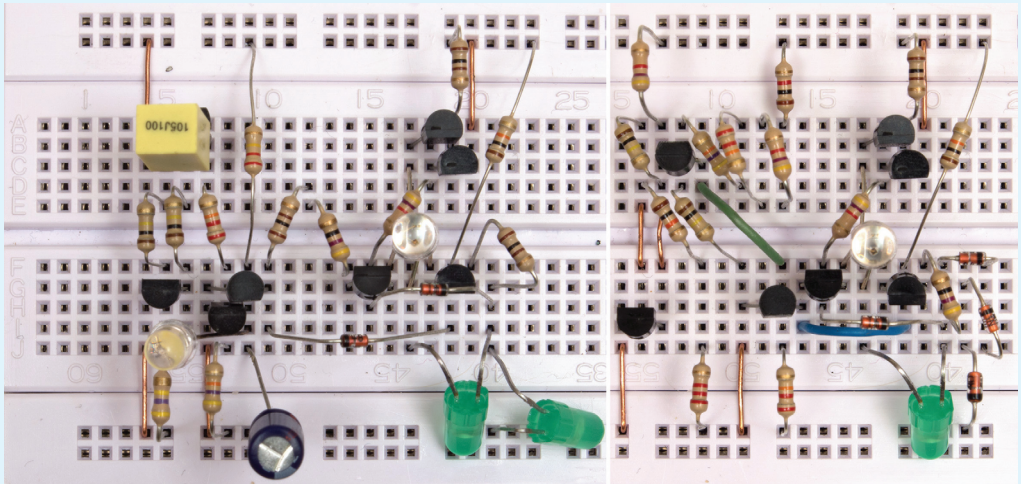
Technika przygotowano **Pakiety Szkolne**

zawierające 10 zestawów EdW09 (**PSE EdW09**)

w promocyjnej cenie 280 zł brutto,

tj. z rabatem 40%.

Autorem zaplanowanego na ponad rok **Praktycznego Kursu Elektroniki** jest **Piotr Górecki**, redaktor naczelny kultowego w świecie hobbystów elektroników miesięcznika Elektronika dla Wszystkich i autor legendarnych cykli artykułów i książek uczących elektroniki od podstaw.



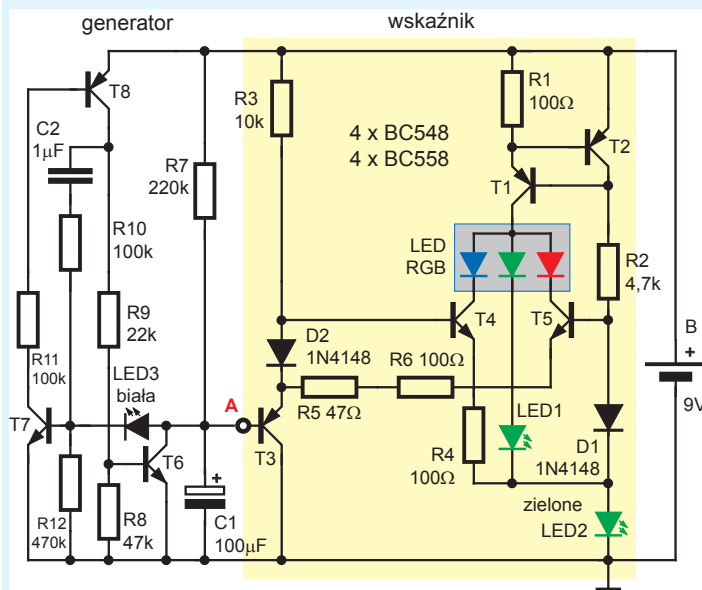
Projekt 5

Wielobarwny wskaźnik/ termometr

Na powyższej fotografii pokazane są dwa proste modele, realizujące wspaniałe i zaskakujące efekty świetlne. W obu trzykolorowa dioda LED RGB płynnie zmienia kolory i odcienie. Z lewej strony fotografii pokazany jest **tęczywny wskaźnik napięcia** z generatorem przebiegu piłokształtnego. Przebieg piłokształtny jest podany na wejście wskaźnika i powoduje kolejno płynne zaświecanie i gaśnięcie struktur czerwonej, zielonej i niebieskiej. Najpierw świeci tylko struktura czerwona, potem stopniowo przygasa, a płynnie zaświeca się struktura zielona, co zmienia kolor od czerwonego, przez żółty do zielonego. Następnie zielona struktura

zmniejsza swą jasność, a rozświetla się struktura niebieska, co daje zmianę kolorów od zielonego, przez morski (cyjan) do niebieskiego. Taki cykl powtarza się co około 10 sekund.

Z prawej strony fotografii tytułowej pokazany jest **termometr świetlny**. Gdy jest zimno, trójkolorowa dioda LED RGB świeci zimnym, niebieskim światłem. Gdy temperatura rośnie, struktura niebieska przygasa, a stopniowo zaświeca się struktura zielona. W optymalnym zakresie temperatur dioda LED oczywiście świeci kolorem zielonym. Gdy robi się za gorąco, zielona struktura stopniowo przygasa, a zaświeca się struktura czerwona, sygnalizująca gorąco.





Opis układu dla „zaawansowanych”

Wskaźnik wielokolorowy z diodą LED RGB.

Schematy wskaźnika z generatorem i termometru świetlnego pokazane są na rysunkach A i B. W obu występuje niemal identyczny blok wskaźnika świetlnego. Na rysunku A jest on wyróżniony żółtą podkładką. Trzykolorowa dioda LED RGB pracuje przy stałym prądzie około 6mA, pochodzącym ze źródła prądowego na tranzystorach T1, T2. Prąd ten płynie przez jedną lub dwie struktury LED, zależnie od stanu tranzystorów T4, T5. Gdy oba te tranzystory są zatkane, cały prąd źródła prądowego T1 płynie przez zieloną strukturę diody trzykolorowej, a dalej przez dwie zielone diody LED1, LED2. Gdy znacznie przewodzić jeden z tranzystorów T4 albo T5, to część prądu tranzystora T1 popłynie albo przez strukturę niebieską, albo czerwoną. Dzięki obecności pomocniczej diody LED1 przepływ prądu przez T4 albo przez T5 spowoduje „podkradanie” prądu płynącego przez strukturę zieloną. W skrajnym przypadku otwarty tranzystor T4 albo T5 przejmie cały prąd źródła prądowego T1, a zielona struktura całkiem zgaśnie.

Ważną rolę w układzie pełni dioda LED2, która jest źródłem napięcia odniesienia, o wartości nieco ponad 2 V. Na bazie T5 występuje napięcie o około 0,7 V wyższe, a na emiterze T5 napięcie jest praktycznie takie same, jak na diodzie LED2. Układ jest też wyposażony w bufor wejściowy – wtórnik z tranzystorem T3 i rezystorem R3.

Gdy na wejściu, w punkcie oznaczonym A, napięcie jest równe zeru, czyli potencjałowi masy, to wtedy na emiterze T3 napięcie wynosi około +0,7V. Tymczasem na emiterze T5 napięcie wynosi około +2 V. Na rezystorach R5+R6 występuje napięcie 1V lub więcej, a to oznacza, że cały prąd źródła prądowego T1 płynie przez strukturę czerwoną, tranzystor T5, rezystory R5, R6 do emitera T3 i dalej do masy. Natomiast przez LED1 i LED2 żaden prąd wtedy nie płynie. Nie płynie też prąd przez „niewłaściwie” spolaryzowany tranzystor T4.

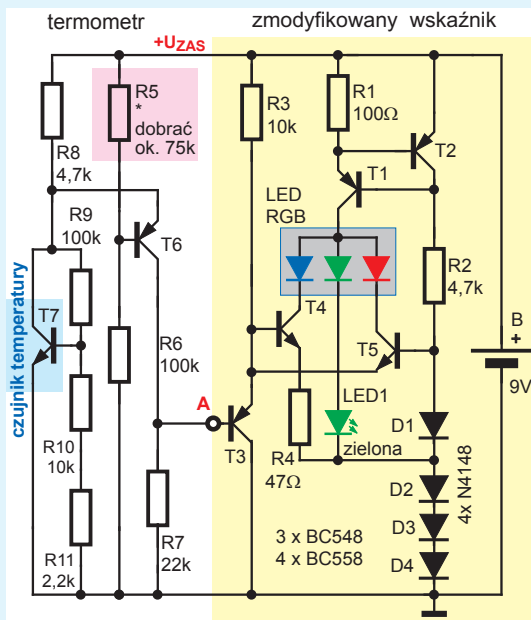
Gdy napięcie w punkcie A rośnie, rośnie też napięcie na emiterze T3. Napięcie na emiterze T5 praktycznie się nie zmienia, więc wzrost napięcia w punkcie A powoduje zmniejszenie spadku napięcia na R5+R6, a to oznacza, że przez tranzystor T5 i czerwoną strukturę płynie coraz mniejszy prąd, a rośnie prąd, płynący przez strukturę zieloną i diody LED1 i LED2.

Gdy napięcie na emiterze T3 zrówna się z napięciem na emiterze T5, wtedy przez R5+R6 przestanie płynąć prąd. Zwróć uwagę, że dzięki diodzie D2, napięcie na emiterze T4 podczas normalnej pracy tego tranzystora będzie takie same, jak napięcie na emiterze T3. Gdy więc napięcie na emiterze T3 i emiterze T4 będzie takie same, jak napięcie na LED2, to prąd nie będzie też płynął przez tranzystor T4 i rezystor R4 - cały prąd źródła prądowego T1 będzie płynął przez strukturę zieloną.

Przy dalszym zwiększaniu napięcia na emiterze T3 nie będzie przewodził „niewłaściwie” spolaryzowany T5, ale za to stopniowo będzie się otwierał T4. Na rezystorze R4 będzie występować coraz wyższe napięcie i prąd T4 i struktury niebieskiej będzie coraz większy. Przy odpowiednio wysokim napięciu wejściowym, tranzystor T4 przejmie cały prąd źródła prądowego T1 i będzie świecić tylko struktura niebieska. LED1 świecić nie będzie, ale LED2 – tak, ponieważ prąd będzie płynął przez strukturę niebieską, T4, R4 i dalej przez LED2 do masy.

Wskaźnik w termometrze z rysunku B jest nieco zmodyfikowany i uproszczony, żeby rozszerzyć zakres świecenia zielonej diody w optymalnym zakresie temperatur.

Generator „pily” z rysunku A zbudowany jest na tranzystorach T6, T7, T8. Podstawą jest obwód R7, C1. Załóżmy, że wszystkie tranzystory są zatkane. Wtedy kondensator C1 ładuje się prądem płynącym przez R7. Napięcie na kondensatorze stopniowo rośnie. Gdy wzrośnie do około 3 V powyżej potencjału masy, prąd zacznie też płynąć przez diodę LED3 i dalej przez obwód baza-emiter tranzystora T7. Tranzystor T7 się otwory, prąd płynący przez R11 otworzy też tranzystor T8 i napięcie na jego kolektorze od wartości równej zeru zwiększy się do wartości napięcia zasilania. Taki skok napięcia spowoduje ładowanie kondensatora C2, a prąd ładowania będzie płynął z dodatniej szyny zasilania, przez T8, C2, rezystor R10 i obwód bazy T7. Oznacza



B

to, że tranzystory T7, T8 tworzą odmianę poznanego wcześniej przerzutnika monostabilnego: nawet króciutki impuls prądu płynącego przez diodę LED3 spowoduje przewodzenie obu tranzystorów T7, T8 przez czas, wyznaczony głównie przez stałą czasową R10. C2. Dodatkowo przez cały czas przewodzenia T8, prąd płynie też przez R9 i otwiera T6. Otwarty na dość długi czas ($R10 \cdot C2$) tranzystor T6 całkowicie rozładuje kondensator C1. Gdy prąd ładowania C2 zmniejszy się, zostaną zatłakane wszystkie trzy tranzystory T6, T7, T8. Napięcie na kolektorze T8 spadnie, naładowany C2 zostanie „ściągnięty w dół”, co spowoduje niewielki błysk białej diody. Co ważne, zatkanie tych tranzystorów umożliwi ładowanie C1 i w ten sposób rozpocznie się kolejny cykl pracy.

Kondensator C1 jest powoli ładowany przez R7 i szybko rozładowywany przez T6, więc występuje na nim przebieg o kształcie zbliżonym do zębów piły. Prawdziwą „piłę” otrzymalibyśmy, gdyby zamiast R7 zastosowane było źródło prądowe, ale na to nie starczyło nam tranzystorów z zestawu EdW09.

Zmianę kolorów w moim modelu można zobaczyć na filmiku, umieszczonym w Elportalu pod adresem: www.elportal.pl/pke

Dla lepszego efektu, warto zastosować jakiś rozpraszacz światła z przezroczystej diody LED RGB. W przykładzie pokazanym na filmiku jest to cieniutka torebka foliowa kilkakrotnie złożona dla uzyskania kilkunastu warstw.

Termometr z rysunku B ma bardzo podobny wskaźnik z trzykolorową diodą LED RGB, a w punkcie A występuje napięcie zależne od temperatury. Czujnikiem temperatury jest wyróżniony niebieską podkładką tranzystor T7. Dzielnik złożony z rezystorów R9 oraz R10+R11 powoduje, że na kolektorze T7 występuje napięcie około 6V, które jest prawie 10 razy większe od jego napięcia U_{BE} . Napięcie U_{BE} , czyli napięcia na bazie zmniejsza się o około 2 mV na stopień, a na kolektorze T7 zmiany napięcia są prawie dziesięciokrotnie większe. Zmiany te podawane są na emiter tranzystora T6, a na bazę tego tranzystora podawane jest niezmienne napięcie z dzielnika R5, R6. Jest to nieczęsto wykorzystywany sposób, gdy na bazie napięcie jest niezmienne, a sygnał podawany jest na emiter. W każdym razie zmiany temperatury czujnika T7 powodują zmiany napięcia U_{BE} tranzystora T6, a to zmienia prąd płynący przez tranzystor T6. Prąd kolektora T6 zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury, a prąd ten płynie przez rezystor R7 i wywołuje na nim spadek napięcia. Czym wyższa temperatura czujnika, tym niższe jest napięcie w punkcie A, co powoduje zmiany koloru świecenia diody LED. W niskich temperaturach świeci struktura niebieska (zimno), wzrost temperatury powoduje zmianę koloru świecenia przez jasnoniebieski, zielony (temperatura optymalna), a dalej żółty i czerwony (za gorąco).

Żeby układ tak działał, należy starannie dobrać wartość wyróżnionej różową podkładką rezystancji R5. Zadanie to wymaga cierpliwości, ponieważ wartość rezystancji należy dobrać precyzyjnie, żeby „w spoczynku” w temperaturze pokojowej świeciła struktura niebieska, ale żeby już lekkie podgrzanie czujnika T7 powodowało zmianę koloru świecenia. Jak pokazuje fotografia wstępna, w moim modelu przy zasilaniu napięciem dokładnie 9,0 V, rezystancję R5 musiałem złożyć z szeregowo połączonych rezystorów 47 k Ω , 22 k Ω , 4,7 k Ω i 1 k Ω (Ty możesz łączyć rezystory szeregowo lub równolegle). Na pewno w Twoim modelu będzie inaczej, zarówno z uwagi na tolerancję elementów, jak i aktualną wartość napięcia zasilającego z baterii.

Przy prawidłowym dobraniu wartości R5, chwycenie w palce obudowy czujnika T7 spowoduje zmianę koloru lampki wskaźnika od niebieskiego przez zielony do czerwonego. Kolor świecenia zmienisz też, nagrzewając układ suszarką do włosów z odległości kilkudziesięciu centymetrów.

UWAGA! Suszarka nie może być zbyt blisko, z uwagi na możliwość stopienia płytki stykowej!

Działanie mojego termometru można zobaczyć na filmiku, umieszczonym w Elportalu pod adresem: www.elportal.pl/pke

Taki termometr daje bardzo widowiskowy efekt świetlny, więc naprawdę warto go wykonać i zademonstrować bliskim. Niestety, ten niewątpliwie bardzo atrakcyjny układ okaże się mało przydatny w praktyce, choćby z powodu dużej zależności wskazań od wartości napięcia zasilającego. Choćby dlatego, do tego ćwiczenia warto kupić świeżą baterię alkaliczną 9 V 6F22, albo zestaw sześciu alkalicznych ogniw R6 (AA), które mają wielokrotnie większą pojemność, a jeszcze lepiej byłoby wykorzystać zasilacz stabilizowany 9 V.

Wykład z ćwiczeniami 5

Poznajemy elementy i układy elektroniczne

W tym wykładzie po pierwsze zbadamy bardzo ważne zagadnienie – **wpływ temperatury na elementy elektroniczne**. Zwykle traktujemy je jako zjawisko niepożądane, ale czasem wykorzystujemy do jak najbardziej praktycznych celów. Po drugie poznasz **parę różnicową** – bardzo ważną „cegielkę”, która jest podstawą budowy mnóstwa pożytecznych układów.



Wpływ temperatury na napięcie przewodzenia. Zbuduj układ według **rysunku 1a**. Mamy tu poznać w poprzednim wykładzie lustro (zwierciadło) prądowe. Rezystor R1 wyznacza prąd diody LED2, który płynie też przez tranzystor T2. Na bazie T2 ustali się takie napięcie U_{BE} , przy którym prąd kolektora T2 będzie praktycznie równy prądowi diody LED2. To napięcie podane jest też na bazę T1 i przez T1 płynie prąd o takiej samej wartości, jak przez T2. Jeżeli oba tranzystory są jednakowe i mają obojętnie jaką, ale **jednakową** temperaturę, wtedy i prądy kolektorów T1, T2 są jednakowe. Diody LED1 i LED2 powinny świecić jednakowym światłem, bardzo słabym z uwagi na ogromną wartość R1 (1 M Ω , ale możesz zastosować mniejszą wartość). Koniecznie wykorzystaj diody LED z przezroczystą soczewką, na przykład niebieskie, bo w nich łatwiej można zaobserwować nawet małe zmiany jasności.

Podgrzej tranzystor T2, na przykład ściskając palcami jego plastikową obudowę przez kilkanaście sekund. Dioda LED2 nie zmieni jasności, natomiast LED1 zauważalnie zmniejszy swą jasność. Zmiany jasności są płynne i są niewielkie, jednak znaczące. **Uwaga!** Po nagraniu trzeba poczekać nawet kilka minut na ostygnięcie i powrót do sytuacji początkowej (można też wymienić T2 na inny „zimny” egzemplarz).

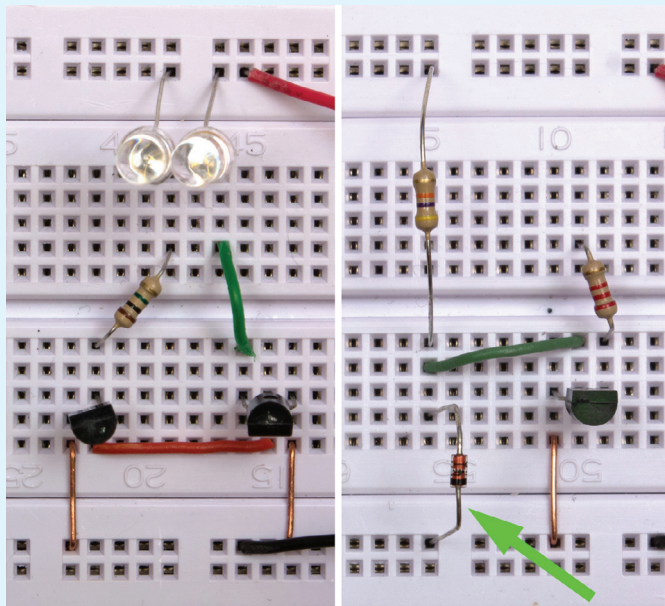
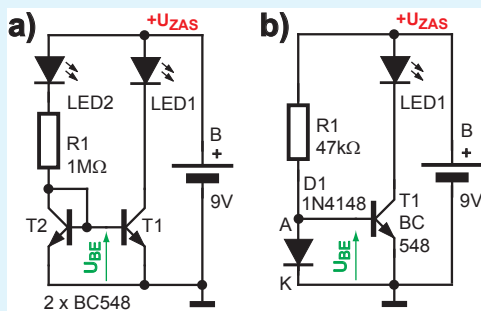
Mógłbyś też silnie podgrzewać tranzystor T2 np. za pomocą suszarki do włosów, ale nie proponuję tego, bo nadmierne grzanie mogłoby spowodować stopienie i nieodwracalne uszkodzenie płytki stykowej. Ja dodatkowo podgrzałem tranzystor T2 delikatnie dotykając jego obudowy gorącą lutownicą – dioda LED1 zgasła całkowicie.

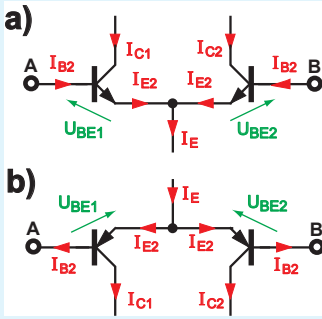
Zmiany takie nieco łatwiej zaobserwować w układzie według **rysunku 1b**. Zamiast tranzystora T2 wstawiliśmy diodę D1, ponieważ tranzystor, którego baza zwarta jest z kolektorem też zachowuje się jak dioda. Zmniejszyliśmy też wartość R1. **Fotografia 2** pokazuje modele z rysunku 1, celowo zrealizowane „luźno”, żeby ułatwić opisane eksperymenty. Otóż gdy ściśniesz palcami wyprowadzenie (K) katody diody D1, w miejscu wskazanym na fotografii zieloną strzałką, zaobserwujesz niewielkie, ale zauważalne zmniejszenie jasności diody LED1.

W praktyce często mamy inną sytuację: gdy przy stałym napięciu U_{BE} będziemy nagrzewać tranzystor T1, to zwiększy się w nim prąd kolektora – gdy w układzie z rysunku 1a podgrzałem tranzystor T1 dotykając na chwilę jego obudowy gorącą lutownicą – po chwili dioda LED zaświeciła jasnym blaskiem (**uwaga – przy nadmiernym grzaniu występuje ryzyko przeciężenia**).

Zapamiętaj, że **napięcie U_{BE} krzemowego tranzystora, a także napięcie przewodzenia krzemowej diody (U_F), zmniejsza się o około 2...2,5 miliwoltów na każdy stopień Celsjusza**. Czyli współczynnik cieplny wynosi $-2 \dots -2,5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Podobnie jest z diodami LED, tylko ten współczynnik cieplny jest nieco większy (zwykle od $-3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ do $-5,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$).

Zmiany w układach z rysunku 1 są niewielkie, bo palcami podgrzewamy element tylko o kilka stopni. W rzeczywistych sytuacjach wpływ temperatury będzie większy. Na przykład w naszych mieszkaniach temperatura może zmieniać się w granicach $+15\dots+30^\circ\text{C}$. A gdyby urządzenie miało na przykład pracować w samochodzie, spodziewane zmiany temperatury to około $-20\dots+60^\circ\text{C}$. Ponadto, np. przy pracy tranzystora z dużymi prądami, wewnętrzna struktura w związku z mocą strat, może się nagrzać nawet

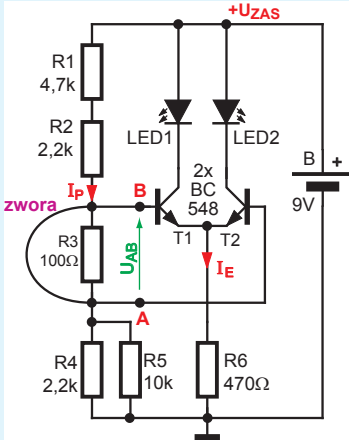




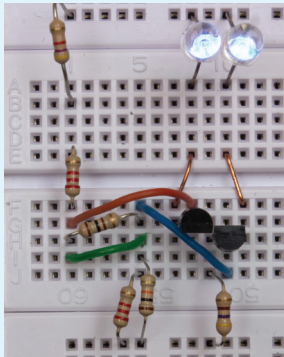
o 100 stopni, co zmienia napięcie U_{BE} o ponad 200 mV! A zgodnie z rysunkiem 1 w poprzednim wykładzie, spowoduje to 100-krotną zmianę wartości prądu.

W każdym razie zwykła dioda czy tranzystor z powodzeniem może być czujnikiem temperatury.

Para różnicowa. Dwa przykłady pary różnicowej pokazane są na **rysunku 3**. Na schematach czerwonymi strzałkami dodatkowo zaznaczony jest rozptył prądów. „Prąd nie może zginąć po drodze” - suma prądów dopływających do danego punktu (węzła) zawsze jest równa sumie prądów wypływających – jest to tzw. **prawo Kirchhoffa**. Suma prądów tranzystorów jest prądem I_E : $I_E = I_{E1} + I_{E2}$, a prąd emitera jest sumą prądów kolektora i bazy. Jednak w uproszczonej analizie możemy pominąć prądy baz i uznać, że $I_E = I_{C1} + I_{C2}$. Omawiany układ jest symetryczny i jeżeli tranzystory są jednakowe, to gdy napięcia U_{BE1} , U_{BE2} są równe, wtedy także i prądy kolektorów (I_{C1} , I_{C2}) są równe. Jeżeli jednak między punktami A, B pojawi się niewielkie napięcie, rzędu miliwoltów, to napięcie U_{BE} jednego tranzystora będzie trochę większe, niż napięcie U_{BE} drugiego. A to znaczy, że przez jeden tranzystor popłynie większy prąd, przez drugi – mniejszy. Gdy napięcia U_{BE1} , U_{BE2} nie są jednakowe, prądy kolektorów nie są jednakowe, ale cały czas $I_E = I_{C1} + I_{C2}$. **Różnica napięć między punktami A, B powoduje zmianę współczynnika podziału prądu między tranzystory.** Stąd też nazwa: **para różnicowa**.

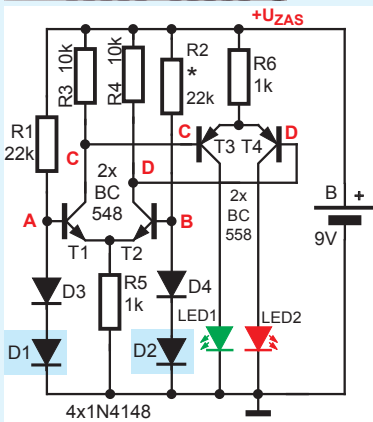


Zbadajmy teraz układ z **rysunku 4**. Na początek rezystor R3 jest zwarty, czyli w punktach A, B występuje to samo napięcie ($U_{BE1} = U_{BE2}$, $U_{AB} = 0$). Prąd I_E zostanie podzielony na dwie równe części. Prądy kolektorowe I_{C1} , I_{C2} powinny być równe, jasność diod LED1, LED2 powinna być jednakowa. Taki stan układu jest pokazany na **fotografii 5**.



Przy okazji możemy wrócić do problemu temperatury: jeślibyś silnie podgrzał (np. lutownicą) jeden z tranzystorów (nie obydwu), to jedna z diod zmniejszy jasność, a nawet zgaśnie. W praktyce jednak chcemy, aby oba tranzystory pary różnicowej miały jednakową temperaturę. Na przykład w układach scalonych są one zrealizowane w jednej krzemowej strukturze tuż obok siebie i wtedy problem różnicy temperatur znika.

Zbadajmy teraz kluczową cechę naszej pary różnicowej. W tym celu wyjmij zworę – rozewrzyj punkty A, B i zwróć uwagę na jasność diod LED. Dioda LED2 będzie ledwo świecić – tranzystor T1 przejmie prawie cały prąd I_E . Wartości rezystorów R1...R5 są tak dobrane, żeby przy świeżej baterii prąd I_p miał wartość około 1 mA (bardzo małe prądy baz tranzystorów pomijamy). Na rezystorze R3 o rezystancji 100 Ω występuje więc spadek napięcia $U_{AB} = I_p \cdot R3$, czyli w naszym przypadku około 100 mV. Taka **różnica napięć** między bazami T1, T2 wystarczy, żeby tranzystor T1 przejął prawie cały prąd I_E . Możesz zmieniać wartość napięcia U_{AB} – czym mniejsza wartość R3, tym mniejsza jest różnica prądów kolektora (możesz łączyć rezystory szeregowo i równoległe). Przy napięciu U_{AB} około 150 mV dioda LED2 całkiem zgaśnie. Zastosuj też R3=10 Ω , co da napięcie U_{AB} około 10 mV (0,01 V), a następnie za pomocą izolowanej zwory zwierzaj R3 ($U_{AB} = 0$ V) – zmieniając w ten sposób napięcie U_{AB} o 10 mV zauważysz niewielką zmianę jasności diod. A to oznacza, że nieduże napięcie U_{AB} , o wartości rzędu pojedynczych miliwoltów, czyli tysięcznych części wolta, powoduje zauważalne zmiany stosunku prądów kolektorów.



Na razie jednak nie widać tu żadnej rewelacji. Zbuduj jednak układ według **rysunku 6**. Mamy tu parę różnicową

3

4

5

6



z tranzystorami npn T1, T2. Kontroluje ona napięcia w punktach A, B, czyli porównuje napięcia przewodzenia diod D1+D3 oraz D2+D4. Zasadniczo czujnikami temperatury są D1 i D2, wyróżnione na schemacie niebieskimi podkładkami. Jednak spadek napięcia na pojedynczej diodzie wynosi tylko około 0,6..0,7 V, a do prawidłowej pracy pary różnicowej, w punktach A, B potrzebne jest wyższe napięcie. Tylko w celu podwyższenia napięć w punktach A, B, zostały dodane diody D3, D4.

Prądy kolektorów T1, T2 powodują spadki napięć na jednakowych rezystorach R3, R4. W punktach C, D występują napięcia, zależne od prądów kolektorów T1, T2. Druga para różnicowa z tranzystorami pnp T3, T4 monitoruje właśnie różnicę napięć w punktach C, D.

Mamy tu w pełni symetryczny układ, więc w idealnym przypadku, gdyby wszystkie pary elementów były identyczne, w spoczynku prądy diod LED1 i LED 2 byłyby jednakowe i te świeciłyby jednakową jasnością. W praktyce na pewno będzie inaczej. Tranzystory i diody nie są identyczne, a rezystory mają tolerancję 5% względem wartości nominalnej. Dlatego najprawdopodobniej świecić będzie tylko jedna z diod LED, a druga będzie całkiem wygaszona.

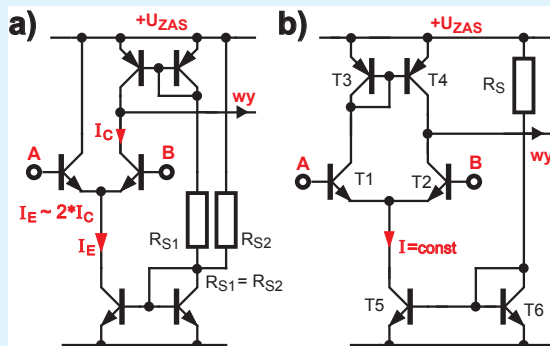
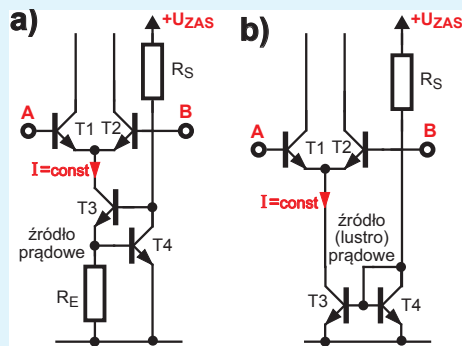
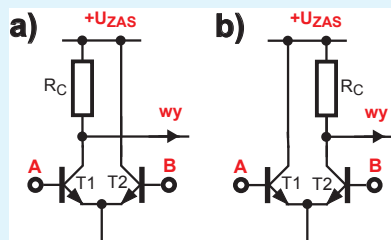
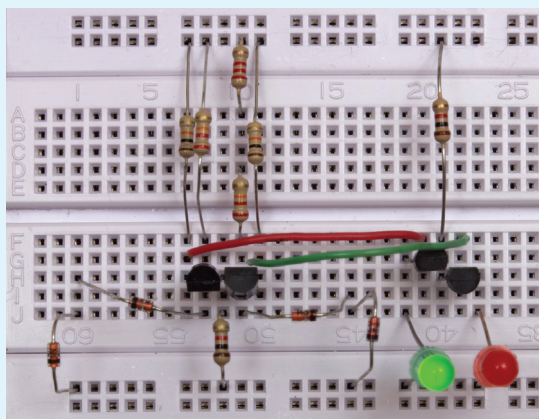
Jeżeli w spoczynku świeci zielona dioda LED1, chwyć palcami i podgrzej czujnik-diodę D1. Jeżeli świeci czerwona LED2 – podgrzej palcami czujnik D2. Już po dwóch, trzech sekundach podgrzewania powinna się zaświecić „przeciwna” dioda LED. Jeżeli przy podgrzewaniu palcami takich zmian nie ma, to rozrzut parametrów okazał się wyjątkowo duży i trzeba w prosty sposób skorygować symetrię układu i zapewnić pracę bliżej „punktu przelączania”. Otóż jeżeli „w spoczynku”, przy jednakowych temperaturach elementów świeci czerwona dioda LED2 – wtedy **w szereg** z rezystorem R2 należy włączyć rezystancję z zakresie 1 kΩ...10 kΩ, **jak najmniejszą**, żeby tylko „w spoczynku” świeciła dioda zielona. Jeżeli natomiast „w spoczynku” świeci zielona dioda LED2, to **równolegle** do rezystora R2 dołącz **jak największy** rezystor z zakresu 47 kΩ...470 kΩ, przy którym jeszcze świeci zielona, a nie czerwona dioda LED.

W moim modelu „w spoczynku” świeciła czerwona dioda LED2, dlatego jak widać na **fotografii 7**, w szereg z R2 włączyłem rezystor 2,2 kΩ.

Po takiej regulacji otrzymujemy czuły sygnalizator temperatury. Bardzo czuły! Teraz nawet lekkie dotknięcie czujnika – diody D1 (która ma współczynnik cieplny około $-2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$) lub tylko chuchnięcie nań, zgasi diodę zieloną i zaświeci czerwoną. Nas interesuje teraz fakt, że do zmiany stanu diod LED1, LED2 wystarczy teraz zmiana napięcia między punktami A, B o pojedyncze miliwolt. Para różnicowa okazuje się znakomitym wzmacniaczem!

W praktyce wykorzystuje się rozmaite wersje pary różnicowej. Dość często spotyka się odmiany z **rysunku 8**, z jednym rezystorem kolektorowym: jeden odwraca kierunek zmian napięcia, drugi nie, co przedstawiają zielone strzałki.

Zamiast rezystora emiterowego (R5, R6 na rysunku 6) bardzo często stosuje

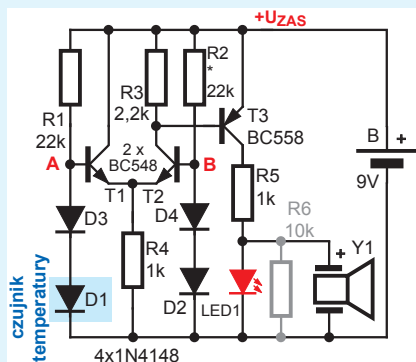


7

8

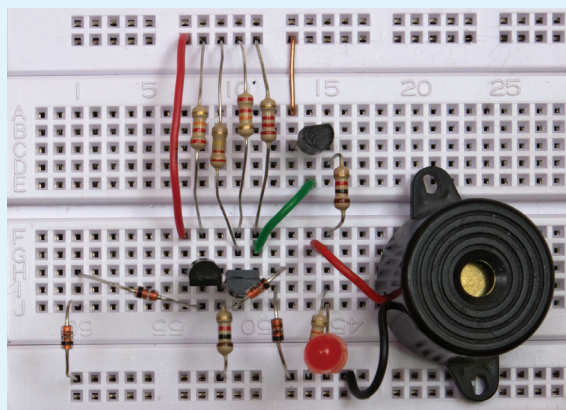
9

10



11

się źródło prądowe, często w postaci lustra prądowego – przykłady na **rysunku 9**. Wtedy sumaryczny prąd kolektorów T1, T2 jest niezależny od napięcia zasilania i co jeszcze ważniejsze, para różnicowa może wtedy prawidłowo pracować w szerokim zakresie wspólnych *napięć wejściowych* (Wspólnymi napięciami wejściowymi nazywamy jednakowe napięcia w punktach A, B względem masy. Gdy sygnał różnicowy, czyli różnica napięć między punktami A, B wynosi 0, to oba te napięcia są jednakowe, stąd nazwa wspólne.). Często również w obwodach kolektorów, zamiast rezystorów, które ograniczają wzmocnienie, spotyka się źródła lub lustra prądowe, pozwalające uzyskać ogromne wzmocnienie napięciowe – dwa przykłady na **rysunku 10** (prąd emitera musi być większy od prądu kolektora, stąd obecność R_{S2}).



12

Zbudujmy teraz sygnalizator wzrostu temperatury według **rysunku 11**. Znowu prawdopodobnie trzeba będzie skorygować wartość R2, żeby „w spoczynku” dioda LED1 nie świeciła, ale była w pobliżu progu przełączania.

Wtedy podgrzanie czujnika – diody D1 zaświeca czerwoną diodę LED1 i uruchamia sygnalizator Y1. Znowu prawdopodobnie trzeba będzie skorygować wartość R2, żeby „w spoczynku” dioda LED1 nie świeciła, tylko była tuż przed progiem świecenia. Jeżeli „w spoczynku” LED1 nie świeci a i podgrzewanie palcami czujnika D1 nie zaświeca jej, wtedy trzeba **równolegle** do R2 włączyć jak największy rezystor z zakresu 47 kΩ...470 kΩ, przy którym LED1 jeszcze nie świeci. W moim modelu, pokazanym na **fotografii 12**, do rezystora R2 trzeba było równolegle dołączyć rezystor 220 kΩ. Jeżeli natomiast przypadkiem „w spoczynku” LED1 świeci, należy **w szereg** z R2 włączyć dodatkową, *jak najmniejszą* rezystancję, żeby LED1 zgasła. Wersja ta nie ma tak dużej czułości, jak układ z **rysunku 6**, a dodanie rezystora R6 niewiele poprawia sytuację. Brzęczyk Y1 włącza się płynnie, a w okolicach progu przełączania mogą wystąpić dodatkowe zakłócenia i terkot, co jest niedopuszczalną wadą. W praktycznie użytecznych sygnalizatorach tego rodzaju wymagamy, żeby sygnalizator miał wyraźny, „ostry” próg przełączania. Wady te usuniemy w następnym wykładzie, realizując najprawdziwszy regulator temperatury, czyli termostat.

Na razie przekonał się, że zwyczajna dioda krzemowa lub tranzystor, pracując w kierunku przewodzenia, z powodzeniem może pełnić rolę precyzyjnego czujnika temperatury. Ale z drugiej strony zmiany temperatury mogą dramatycznie zmienić warunki (punkt pracy) tranzystora, czyli wartości napięć i prądów w układzie, dlatego w praktyce powszechnie wykorzystuje się różne rozwiązania układowe, minimalizujące wpływ temperatury. Do tych ważnych zagadnień będziemy wracać w następnych wykładach. ■

Piotr Górecki

MINI
QUIZ

1/06/2013

AR

Zasady na str. 118–119

Odpowiedz i dobrze zapamiętaj, bo to ważne!

Napięcie na krzemowym złączu p-u, czyli U_{AK} (anoda-katoda) na diodzie lub U_{BE} (baza-emiter) w tranzystorze, wraz ze wzrostem temperatury o 1°C zmienia się w przybliżeniu o:

- A. +10 mV
- B. -2 mV
- C. -5 mV