



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 samo, jak napięcie na emiterze T3. Gdy więc napięcie na emiterze T3 i emiterze T4 będzie takie samo, 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 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 „piły”** z rysunku A zbudowany jest na tranzystorach T6, T7, T8. Podstawą jest obwód R7, C1. Załóżmy, że

**Rys. B** wszystkie tranzystory są zatka-

ne. Wtedy kondensator C1 ładuje się prądem płynącym przez R7. Napięcie na kondensatorze stopniowo rośnie. Gdy wzrośnie do około 3V powyżej potencjału masy, prąd zacznie też płynąć przez diodę LED3 i dalej przez obwód baza-emiter tranzystora T7. Tranzystor T7 się otworzy, 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 to, że tranzystory T7, T8 tworzą odmianę poznane 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\*C2) tranzystor T6 całkowicie rozładuje kondensator C1. Gdy prąd ładowania C2 zmniejszy się, zostanie zatkanie 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 ładowania 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](http://www.elportal.pl/pke)

Dla lepszego efektu warto zastosować jakiś rozpraszacz światła z przezroczystej diody LED RGB. W przypadku 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 napięcie na bazie, zmniejsza się o około 2mV 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 niezmiennie napięcie z dzielnika R5, R6. Jest to nieczęsto wykorzystywany sposób, gdy na bazie napięcie jest niezmiennie, 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 9,0V, rezystancję R5 musiałem złożyć z szeregowo połączonych rezystorów 47kΩ, 22kΩ, 4,7kΩ i 1kΩ (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.

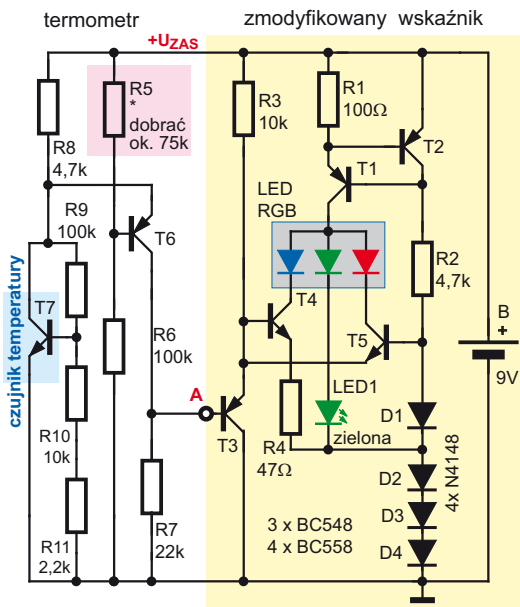
Przy prawidłowym dobraniu wartości R5, chwycenie w palce obudowy czujnika T7 spowoduje zmianę koloru lampki wskaźnika od niebieskiego przez zielony do czerwonego. Kolor świecenia zmieni się też, nagrzewając układ suszarką do włosów z odległości kilkudziesięciu centymetrów.

**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](http://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 wskaźnika od wartości napięcia zasilającego. Choćby dlatego, do tego ćwiczenia warto kupić świeżą baterię alkaliczną 9V 6F22 albo zestaw sześciu alkalicznych ogniw R6 (AA), które mają wielokrotnie większą pojemność, a jeszcze lepiej byłoby wykonać zasilacz stabilizowany 9V.



## 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 „cegiełkę”, która jest podstawą budowy mnóstwa pożytecznych układów.

**Wpływ temperatury na napięcie przewodzenia.** Zbuduj układ według rysunku 1a. Mamy tu poznane 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 (1M $\Omega$ , 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 zmienia jasności, natomiast LED1 zauważalnie zmniejszy swoją 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 silniej 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 zgąsła całkowicie.

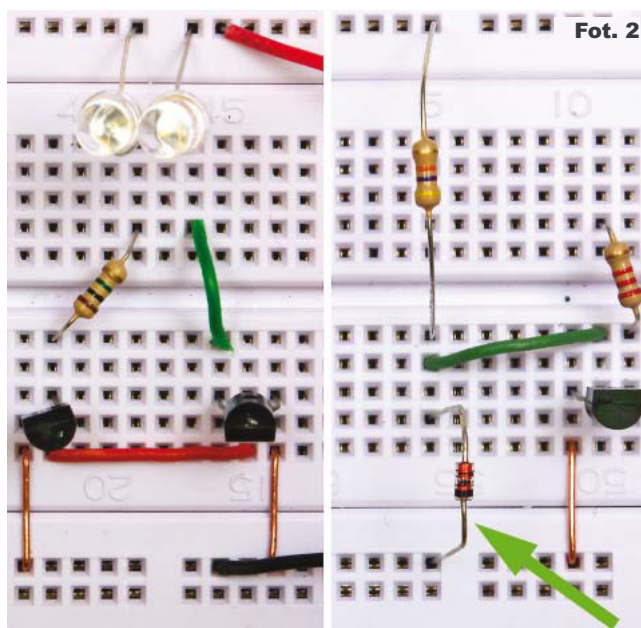
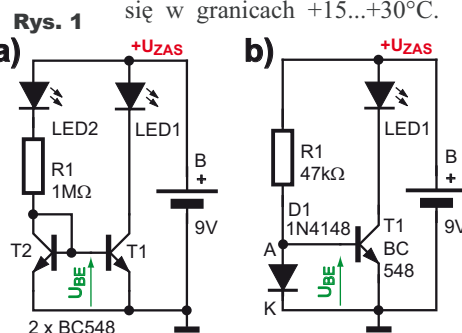
Zmiany takie nieco łatwiej zaobserwować w układzie według rysunku 1b. Zamiast tranzystora T2 wstawiliśmy diodę D1, ponieważ tranzystor, którego baza zwarta jest z kolektorem, też zachowuje się jak dioda. Zmniejszyliśmy też wartość R1. **Fotografia 2** pokazuje modele z rysunku 1, celowo zrealizowane „luźno”, żeby ułatwić opisane eksperymenty. Otóż gdy ściś-

niesz 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 przeciążenia*).

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  $+15 \dots +30^\circ\text{C}$ .

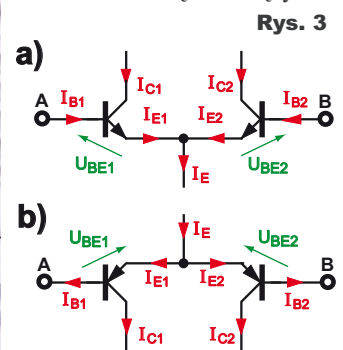


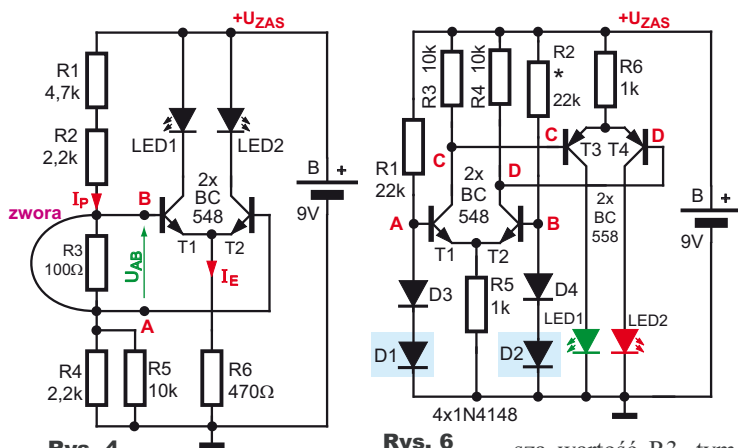
A gdyby urządzenie miało na przykład pracować w samochodzie, spodziewane zmiany temperatury to około  $-20 \dots +60^\circ\text{C}$ . Ponadto, np. przy pracy tranzystora z dużymi prądami, wewnętrzna struktura w związku z mocą strat może się nagrzać nawet o 100 stopni, co zmieni napięcie  $U_{BE}$  o ponad 200mV! 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. Czerwonymi strzałkami dodatkowo zaznaczony jest rozptyw prądów. Prąd nie może zginąć po drodze – suma prądów dopływających do danego punktu (węzła) zawsze jest równa sumie prądów wypływających – jest to tzw. **prądowe prawo Kirchhoffa**. Suma prądów tranzystorów jest prądem  $I_E$ , gdzie  $I_E = I_{E1} + I_{E2}$ , 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 tranzystorami**. 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





Rys. 4

Rys. 6

jasność diod LED1, LED2 powinna być jednakowa. Taki stan układu jest pokazany na fotografii 5.

Przy okazji możemy wrócić do problemu temperatury: jeśli byś silnie podgrzał (np. lutownicą) jeden z tranzystorów (nie obydwa), 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.

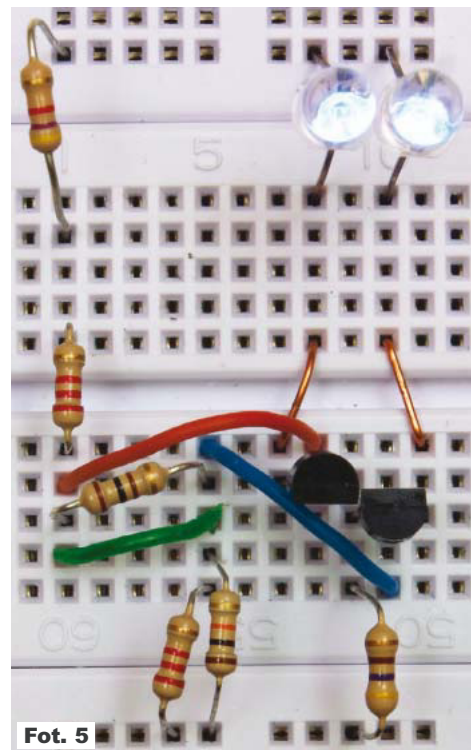
Zbadajmy teraz kluczową cechę naszej pary różnicowej. W tym celu wyjmij zworę – rozewrzyj punkty A, B i zwróć uwagę na jasność diod LED. Dioda LED2 będzie ledwo świecić – tranzystor T1 przejmie prawie cały prąd  $I_E$ . Wartości rezystorów R1...R5 są tak dobrane, żeby przy świeżej baterii prąd  $I_p$  miał wartość około 1mA (bardzo małe prądy baz tranzystorów pomijamy). Na rezystorze R3 o rezystancji 100 omów występuje więc

spadek napięcia  $U_{AB}=I_p \cdot R_3$ , czyli w naszym przypadku około 100mV. 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 150mV dioda LED2 całkiem zgaśnie. Zastosuj też  $R_3=10\Omega$ , co da napięcie  $U_{AB}$  około 10mV (0,01V), a następnie za pomocą izolowanej zwory zwieraj R3 ( $U_{AB}=0V$ ) – zmieniając w ten sposób napięcie  $U_{AB}$  o 10mV, 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 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...0,7V, 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.

Prąd kolektorów T1, T2 powodują spadki napięć na jednakowych rezystorach R3, R4. W punktach C, D występują napięcia, zależne od prądów



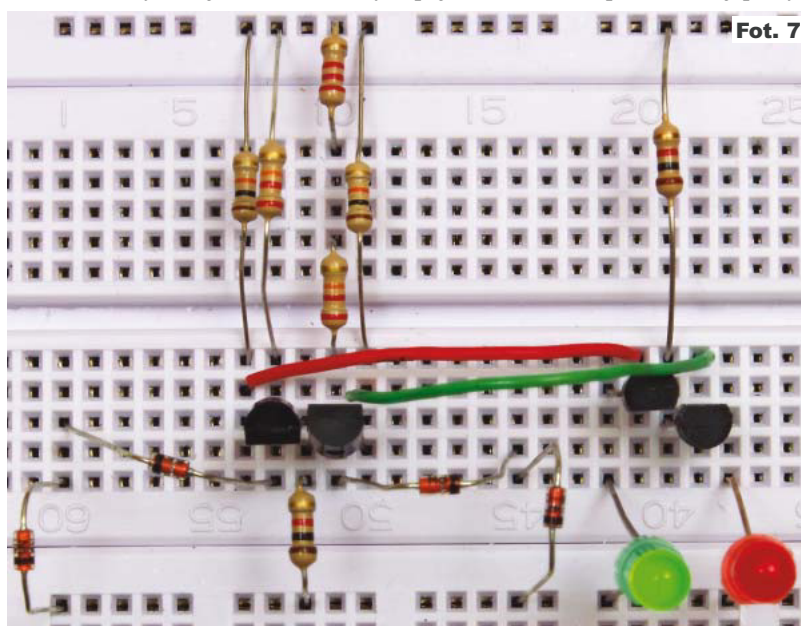
Fot. 5

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 LED2 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 przełączania”.

Otóż jeżeli „w spoczynku”, przy jednakowych temperaturach elementów świeci czerwona dioda LED2 – wtedy w szereg z rezystorem R2 należy włączyć rezystancję z zakresu 1kΩ...10kΩ, jak najmniejszą, żeby tylko „w spoczynku” świeciła dioda zielona. Jeżeli natomiast „w spoczynku” świeci zielona dioda LED2, to równoległe do rezystora R2 dołącz jak największy rezystor z zakresu 47kΩ...470kΩ, przy



Fot. 7

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 2,2kΩ.

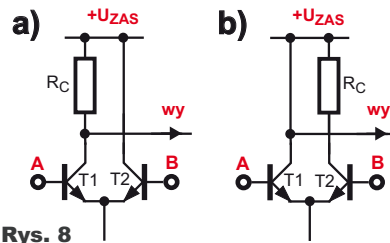
Po takiej regulacji otrzymujemy czuły sygnalizator temperatury. Bardzo czuły! Teraz nawet lekkie dotknięcie czujnika – diody D1 (która ma współczynnik cieplny około  $-2,2\text{mV}/^\circ\text{C}$ ) lub tylko chuchnięcie nań zgasi diodę zieloną i zaświeci czerwona. Nas interesuje fakt, że do zmiany stanu diod LED1, LED2 wystarczy teraz zmiana napięcia między punktami A, B o pojedyncze miliwolt. Para różnicowa okazuje się znakomitą 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 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. 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  $R_{S2}$ ).

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

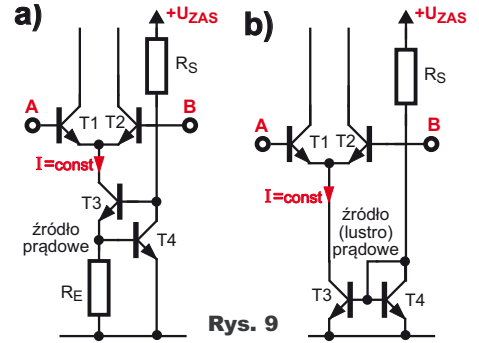
Wtedy podgrzanie czujnika – diody D1 zaświeca czerwoną diodę LED1 i uruchamia sygnalizator Y1. Znow prawdopodobnie trzeba będzie skorygować wartość R2, żeby „w spoczynku” dioda LED1 nie świeciła, tylko była tuż przed progiem świecenia. Jeżeli „w spoczynku” LED1 nie świeci i podgrzewanie palcami czujnika D1 nie zaświeca jej, wtedy trzeba **równolegle** do R2 włączyć jak największy rezystor z zakresu 47kΩ...470kΩ, przy którym LED1 jeszcze nie świeci. W moim modelu, pokazanym na **fotografii 12**, do rezystora R2 trzeba było równolegle dołączyć rezystor 220kΩ. Jeżeli natomiast przypad-



Rys. 8

kiem „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 pobliżu 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.

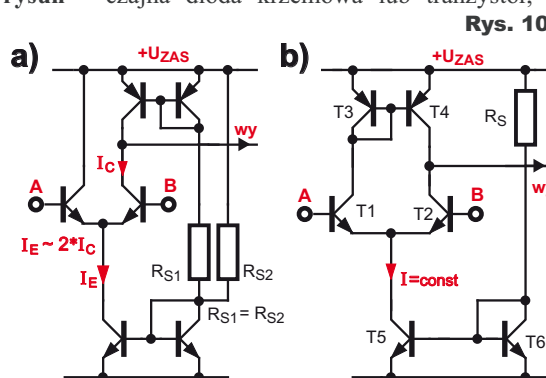
Na razie przekonaliśmy się, że zwyczajna dioda krzemowa lub tranzystor,



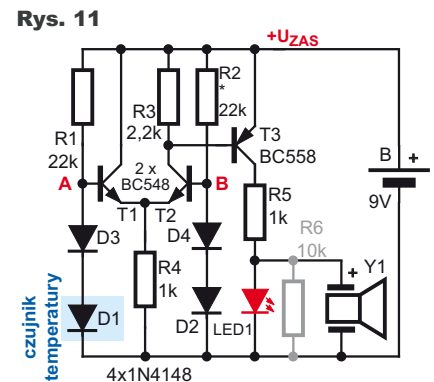
Rys. 9

pracując w kierunku przewodzenia, z powodzeniem może pełnić funkcję 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.

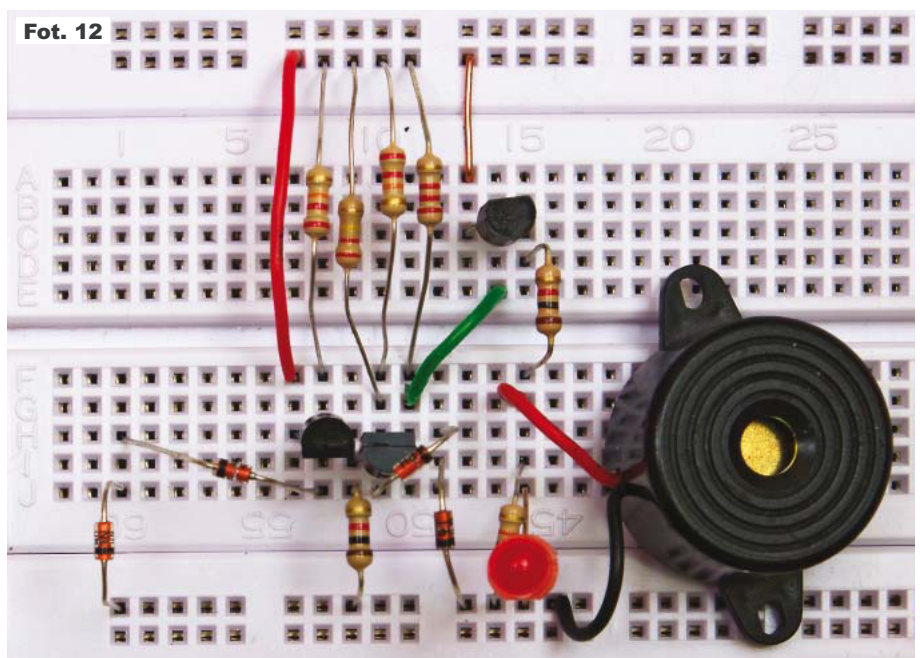
Piotr Górecki



Rys. 10



Rys. 11



Fot. 12