

PKE – Praktyczny Kurs Elektroniki

Wykład 8

Najprawdziwszy termostat

Na **fotografii wstępnej** przedstawiony jest układ termostatu – regulatora i stabilizatora temperatury. Schemat tego układu jest pokazany na **rysunku A**. Jest to najprawdziwszy regulator temperatury z przełącznikiem wykonawczym, przy czym funkcję grzałki pełnią... rezystory R7, R8. Nie proponuję wykorzystania jakiegś większej grzałki, zasilanej z sieci 230V, bo mogłoby to być niebezpieczne. Nasz problem między innymi leży w tym, że aby grzałka zasługiwała na swą nazwę, rezystory R7, R8 musiałyby pobierać znaczącą ilość prądu, a my zasilamy nasze eksperymentalne układy z małej baterijki. Choćby dlatego do tego ćwiczenia warto kupić świeżą baterię 9V 6F22 alkaliczną, czyli droższą, ponieważ baterie alkaliczne (*alkaline*) mają większą pojemność i większą wydajność prądową (mniejszą rezystancję wewnętrzną). Lepiej byłoby wykorzystać zestaw sześciu alkalicznych ogniw R6 (AA), które mają wielokrotnie większą pojemność. A jeszcze lepiej byłoby wykorzystać zasilacz stabilizowany 9V lub jakiś akumulator o napięciu 9...12V.

Opis układu dla „zaawansowanych”

Termostat, czyli regulator temperatury, zawiera obwody, poznane w wykładzie 5. Na wejściu mamy parę różnicową T1, T2, gdzie prąd emiterowy ustalany jest przez źródło, a właściwie lustro prądowe

z tranzystorami T5, T6. W kolektorach T1, T2 włączone jest lustro prądowe z tranzystorami T3, T4, co zapewnia bardzo duże wzmocnienie napięciowe. Jeżeli napięcie w punkcie C obniży się o więcej niż około 1,2V poniżej napięcia $+U_{ZAS}$, to zaczną przewodzić tranzystory T7, T8, co zaświeci lampkę LED1 i włączy grzałkę (R7, R8) i sygnalizator Y1. Czujnikiem temperatury jest dioda D2 (w porównaniu z ostatnimi układami z wykładu 5 zrezygnowaliśmy ze stosowanych tam dodatkowych diod, zastępując je rezystorami R3, R4).

Na początek zmontuj i wstępnie uruchom układ bez „prądożernych” rezystorów R7, R8. Budujemy regulator temperatury, który ma włączać grzałkę, gdy temperatura jest za niska. Dlatego najprawdopodobniej trzeba będzie wyregulować układ, aby „w spoczynku” dioda

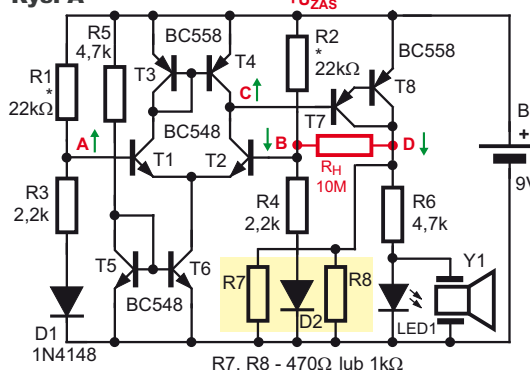
LED1 świeciła, ale by układ był blisko progu przełączenia.

Jeżeli „w spoczynku” dioda LED1 nie świeci, wtedy trzeba *szeregowo* z R1 włączyć jak najmniejszy rezystor z zakresu $220\Omega \dots 2,2k\Omega$, przy którym LED1 się zaświeci. Wtedy nawet delikatne chuchnięcie na czujnik D2 (a nie D1) zgasi diodę LED1. Jeżeli natomiast „w spoczynku” LED1 świeci, a chuchnięcie nie gasi jej, należy *w szereg* z R2 włączyć dodatkową, *jak najmniejszą* rezystancję, żeby tylko LED1 świeciła, ale była jak najbliżej progu gaśnięcia.

W moim modelu, pokazanym na **fotografii wstępnej**, „w spoczynku” dioda LED *nie* świeciła, więc do rezystora R1 dołączyłem *szeregowo* rezystor $1k\Omega$. Wystarczyłoby 470Ω , jednak celowo chciałem mieć odrobinę większy odstęp od progu przełączenia.

Uwaga! W naszym przypadku szczególnie ważna jest opisana regulacja progu zadziałania, by dioda LED1 gasła już po lekkim chuchnięciu na czujnik D2. Problem w tym, że ma to być najprawdziwszy regulator temperatury, gdzie funkcję grzałki pełnią rezystory R7, R8. Podczas przepływu prądu, w rezystorach tych wydziela się ciepło (o mocy $P=U \cdot I=I^2R$). Tymczasem nasz układ zasilamy z małej baterijki i nie możemy sobie pozwolić na

Rys. A



mocne grzanie i marnotrawstwo prądu. Dlatego najpierw trzeba skorygować R2, żeby już leciutkie podgrzanie D2 gasiło lampkę. Dopiero po takiej regulacji należy zamontować „grzałkę”, czyli rezystory R7, R8. Powinny być umieszczone jak najbliżej czujnika – diody D2, nieco poniżej tej diody, jak pokazuje **fotografia B**.

W prawidłowo wyregulowanym układzie po włączeniu zasilania włączy się kontrolka LED1 i sygnalizator Y1. Będą też pracować „grzałki” R7, R8, które w ciągu kilku sekund podgrzeją czujnik D2 i wyłączą kontrolkę LED1 i grzałki. Temperatura czujnika D2 zacznie spadać, więc po kilku sekundach „grzałki” znów zostaną na chwilę włączone. Czas włączenia i wyłączenia grzałek może być różny, bo zależy od wielu czynników, w tym od skuteczności grzania diody i „odległości od progu przełączania”.

Przy zasilaniu z małej baterijki układ na pewno będzie pracował bez rezystorów R7, R8, natomiast z tymi rezystorami (2 x 470Ω) praca będzie uzależniona od wydajności źródła zasilania – podczas grzania mój model pobiera 76mA – to dość dużo jak na zwykłą 9-woltową baterijkę (nie alkaliczną).

Możesz dla oszczędności prądu zwiększyć R7, R8 do 1kΩ, ale lepszy efekt uzyskuje się przy zmniejszeniu wartości R7, R8, co oznacza większy pobór prądu. Lepiej byłoby, gdybyś zasilili regulator nie z małej, taniej baterijki 6F22, tylko albo z baterii alkalicznej, albo jeszcze lepiej z jakiegoś zasilacza stabilizowanego lub z akumulatora o napięciu 8...12V.

W Elportalu, pod adresem: www.elportal.pl/pke, znajdziesz filmik, który pokazuje pracę mojego modelu regulatora zasilanego z zasilacza wtyczkowego, najpierw bez rezystora R_H, a potem z tym rezystorem o wartości 10MΩ, włączonym między punkty B, D.

Gdy przetestujesz swój model regulatora, najprawdopodobniej też przekonasz się, że przełączanie nie następuje nagle, tylko płynnie, czego dowodem jest „pływający” dźwięk brzęczyka Y1 i płynne zmiany jasności diody LED („pływający” dźwięk brzęczyka słychać też w pierwszej części filmiku).

Takie płynne, „niepewne” przełączanie jest bardzo niekorzystne, zwłaszcza

gdybyśmy np. chcieli zamiast „grzałek” R7, R8 dołączyć przełącznik. Częste i niepewne przełączanie przełącznika pod obciążeniem spowoduje szybkie wypalenie jego styków.

To jest bardzo poważny problem, występujący w wielu układach. Można temu zaradzić, wprowadzając w układzie dodatnie sprzężenie zwrotne, które będzie niejako wspomagać przełączanie. Zwróć uwagę na zielone strzałki na rysunku A. Kierunek zmian w punktach B i D jest jednakowy – wystarczy więc między punkty B, D włączyć rezystor „wspomagający” o dużej wartości.

Dodaj taki rezystor w swoim modelu i przekonaj się, jakie błogosławione skutki ma wprowadzenie dodatniego sprzężenia zwrotnego. Do tej ważnej sprawy jeszcze będziemy wracać.

Taki układ mógłby być jak najbardziej praktycznym regulatorem temperatury, gdzie próg zadziałania wyznacza (dobrze stabilizowane) napięcie, podawane na punkt A.



Fot. B

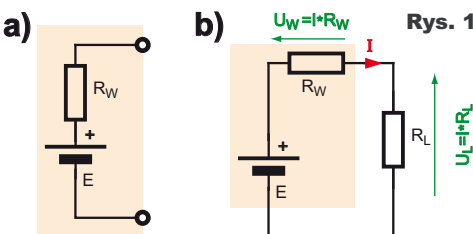
miały wbudowaną rezystancję wewnętrzną (R_W). Ilustruje to znany ze szkolnych podręczników *schemat zastępczy* – **rysunek 1a**, gdzie idealne źródło napięcia ma tzw. siłę elektromotoryczną E. Mierzając woltomierzem napięcie na nieobciążonej baterii, mierzymy właśnie wielkość tej siły elektromotorycznej. Jednak podczas pracy pobór prądu powoduje spadek napięcia na tej rezystancji wewnętrznej ($U_W = I \cdot R_W$). Tworzy się dzielnik napięcia według **rysunku 1b** i napięcie na obciążeniu (R_L) źródła jest niższe od siły elektromotorycznej E o spadek napięcia na R_W .

Na potrzeby kursu przetestowałem świeżutkie baterie: jedną „zwykłą” (węglowo-cynkową), dwie alkaliczne, a także sześć „paluszków” AA – zarówno alkalicznych baterii jednorazowych (1,5V), jak też 6 świeżo naładowanych akumulatorów NiMH o napięciu nominalnym 1,2V. **Fotografia 2** pokazuje elementy testowe (nie zachęcam Cię do naśladowania, bo potrzebne są rezystory, których nie masz w zestawie EdW09, a testy wyczerpują baterie). Najpierw zmierzyłem, jakie jest napięcie przed testami. Następnie dołączyłem obciążenie w postaci rezystora 1kΩ na minutę, co oznacza mały prąd obciążenia około 9mA i zmierzyłem napięcie pod koniec tego czasu. Potem dołączyłem rezystor 100Ω (spodziewany prąd obciążenia 90mA)

Poznajemy elementy i układy elektroniczne

W tym wykładzie zajmiemy się kolejnymi dwoma bardzo ważnymi zagadnieniami, słabo rozumianymi nie tylko przez hobbystów. Jeden to „jakość zasilania”, a drugi to histereza.

„Jakość zasilania”. Znaczący pobór prądu przez nietypową grzałkę zwrócił naszą uwagę na problem wydajności prądowej źródeł zasilania. Układy elektroniczne zazwyczaj pobierają niewiele prądu, ale dużo prądu mogą potrzebować układy wykonawcze, jak właśnie grzałki czy silniki. Tymczasem baterie, akumulatory i zasilacze zachowują się tak, jakby



Fot. 2

i zmierzylem napięcie po 2 i po 20 sekundach. Potem na 10 sekund dołączyłem rezystor 10Ω (spodziewany prąd obciążenia rzędu 0,9A) i pod koniec tego czasu zmierzylem napięcie baterii. Potem po około 10 minutach „odpoczynku” bez obciążenia jeszcze raz zmierzylem napięcie.

Oczywiście małe baterijki 9-woltowe bardzo słabo poradziły sobie z dużym prądem obciążenia. W bateriach częściowo zużytych będzie znacznie gorzej. Szczegółowe wyniki przedstawione są w tabeli 1. W przypadku sześciu baterii alkalicznych i akumulatorów, oprócz ich rezystancji wewnętrznej z rysunku 1, wchodzi w grę również (często dużo większe) rezystancje drutów koszyka i przewodów.

Wyniki testów powinny Cię wyczulić na problem „jakości” napięcia zasilającego. Wydajność prądowa źródeł zasilania jest ograniczona – można sobie w uproszczeniu wyobrazić, że ograniczeniem jest wewnętrzna rezystancja R_W . Jednak w praktyce nie dociekamy, jaką wartość ma R_W , ponieważ rezystancja ta nie ma niezmiennej, charakterystycznej wartości. W akumulatorach i bateriach bywa różna i stopniowo rośnie wraz ze stopniem wyczerpania baterii. W zasilaczach stabilizowanych jest bardzo niska, ale tylko w zakresie dozwolonych prądów.

Na razie ogólnie dotknęliśmy problemu wydajności prądowej. Zagadnienie „jakości zasilania” ma też inne aspekty.

To oczywiście, że czym większy prąd, tym niższe będzie napięcie na zaciskach baterii. Co ważne, pobór prądu przez dany układ zwykle nie jest jednakowy, tylko zmienia się w czasie. Na przykład włączenie diody LED, czy innego obciążenia, powoduje obniżenie napięcia zasilania. Często te zmiany poboru prądu są bardzo szybkie. W efekcie napięcie zasilające skokowo się zmienia. Rysunek 3a to zrzut



Bateria	Przed testem $R=\infty$	$R=1k\Omega$ 60s	$R=100\Omega$ 2s	$R=100\Omega$ 20s	$R=10\Omega$ 10s	Po teście $R=\infty$
zwykła Kinetic	9,81V 100% (I=0mA)	9,49V 97% I~9,5mA	8,55V 87% I~86mA	8,44V 86% I~84mA	4,28V 44% I~0,43A	9,60V 98% (I=0mA)
alkaliczna PowerOne	9,65V 100% (I=0mA)	9,43V 98% I~9,4mA	8,87V 92% I~89mA	8,82V 91% I~88mA	6,03V 63% I~0,6A	9,52V 98% (I=0mA)
alkaliczna Wipow	9,58V 100% (I=0mA)	9,53V 99% I~9,5mA	9,35V 98% I~94mA	9,30V 97% I~93mA	7,99V 83% I~0,8A	9,45V 98% (I=0mA)
alkaliczne 6 x AA	9,57V 100% (I=0mA)	9,50V 99% I~9,5mA	9,41V 98% I~94mA	9,36V 98% I~94mA	8,30V 87% I~0,83A	9,51V 99% (I=0mA)
akumulatory 6 x NiMH	8,13V 100% (I=0mA)	8,12V 100% I~8,1mA	8,08V 99% I~81mA	8,07V 99% I~81mA	7,62V 94% I~0,76A	8,11V 100% (I=0mA)
zasilacz 12V stab.	8,97V 100% (I=0mA)	8,96V 100% I~9mA	8,93V 99,5% I~89mA	8,93V 99,5% I~89mA	8,64V 96% I~0,86A	8,97V 100% (I=0mA)

Tabela 1

z ekranu oscyloskopu, pokazujący zmiany napięcia zasilania w układzie czujnika pojemnościowego z poprzedniego wykładu (wykład 7, rysunek 15, fotografia 16), zasilanego z kiepskiej jakości zasilacza, podłączonego długimi przewodami. Pionowa skala to skala napięcia (100mV/działkę) – jak widać zmiany napięcia zasilania są znaczne, przekraczają 600mV.

Wielkość takich zmian zależy głównie od wielkości prądu oraz rezystancji wewnętrznej użytego źródła zasilania (baterii), ale też od innych czynników. Często, tak jak w tym przypadku, niezbyt duże skoki napięcia zasilania zupełnie nie przeszkadzają w prawidłowym działaniu układu. Jednak w wielu innych układach takie skoki napięcia w mniejszym lub większym stopniu zaburzają działanie układu. Dość często zdarza się, że całkowicie uniemożliwiają prawidłową pracę lub powodują różne dziwne błędy. Może się zdarzyć, że ten sam układ zasilany ze świeżej baterii działa według oczekiwań, a po częściowym rozładowaniu baterii i wrzucie wartości R_W układ zaczyna zachowywać się dziwnie,

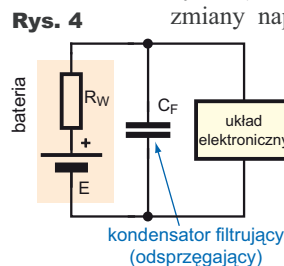
na przykład zmniejszy się albo też zwiększy siła dodatniego sprzężenia zwrotnego, wnoszonego w układzie tytułowym przez R_H . Przyczyną będą właśnie skoki napięcia zasilania, które w różny sposób zmieniają działanie układu.

Do tej pory zupełnie nie zwracaliśmy uwagi na ten problem „jakości zasilania” i nasze proste układy pracowały prawidłowo. Jednak w układach bardziej skomplikowanych, a także precyzyjnych, pomiarowych oraz w urządzeniach audio, takie zmiany napięcia

mogą poważnie pogorszyć parametry lub uniemożliwić prawidłowe działanie urządzenia.

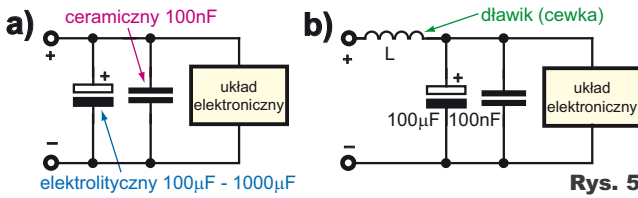
Aby je zmniejszyć, wystarczy włączyć pomiędzy linie zasilania pojemność filtrującą według idei z rysunku 4. Jak już wiemy, naładowany kondensator jest „małą baterijką”, która niejako wspomaga główną baterię. Co prawda wszelkie kondensatory, podobnie jak baterie, też mają jakąś rezystancję wewnętrzną R_W – patrz rysunek 1. Jednak najogólniej biorąc, w kondensatorach jest ona bardzo mała (w katalogach jest oznaczana ESR). Dlatego kondensator może dostarczyć duży prąd przez krótki czas, zależny od jego pojemności.

Już włączenie kondensatora o znokowej pojemności 10nF (może być oznaczony 103) skutecznie redukuje najszybsze zmiany napięcia zasilania, jak pokazuje



rysunek 3b. Jednak dopiero dodanie kondensatora elektrolitycznego o dużo większej pojemności powoduje wygładzenie także powolniejszych zmian, jak ilustruje rysunek 3c.

Teraz bardzo ważna informacja: z uwagi na



Rys. 5

ryzyko błędów, w obwodach zasilania wszelkich układów elektronicznych stosujemy kondensatory filtrujące. Z różnych istotnych względów dobrym zwyczajem jest używanie w roli pojemności filtrującej C_F zestawu kondensatora ceramicznego 100nF (podobnego do lizaka, zwykle oznaczonego 104) oraz elektrolitycznego 100µF...1000µF według rysunku 5a. Niektórzy, według rysunku 5b, dodatkowo stosują w obwodzie zasilania włączony w szereg dławik, czyli cewkę o odpowiednich parametrach. Jak już wiesz z wykładu 6, cewka (dławik), podobnie jak kondensator, też jest małym magazynem energii. Cewka „nie lubi” zmian prądu. Cewka niejako „wygładza” przebieg zmian prądu, ale za to wytwarza „własne” napięcie, tzw. napięcie samoindukcji. Fotografia 6 pokazuje kilka różnych dławików (małe dławiki oznaczone są albo kodem barwnym, albo cyfrowym – wartość podana jest w mikrohenrach – uH). Połączenie indukcyjności dławika i pojemności kondensatorów według rysunku 5b pozwala uzyskać lepszą filtrację, ale też rodzi pewne problemy. W sumie zagadnienie filtracji zasilania jest bowiem skomplikowane i trudne. W grę wchodzi wiele dodatkowych czynników. Między innymi fakt, że cewka i kondensator zawsze tworzą tak zwany **obwód rezonansowy**. Rezonansem i obwodami rezonansowymi zajmujemy się w wykładzie 10.

W typowych układach realizowanych przez hobbystów wystarczą obwody filtrujące według rysunku 5a lub nawet jedynie z kondensatorem elektrolitycznym.

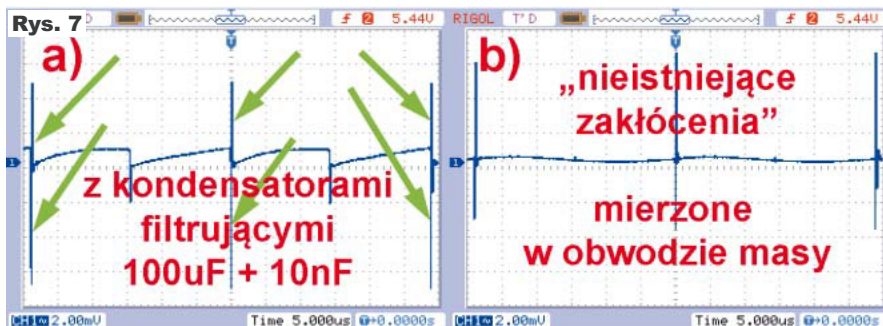
Różnica między rysunkiem 3a i 3c jest ogromna. Jednak dołączenie elementów filtrujących nie eliminuje problemu całkowicie, tylko go redukuje. Rysunek 7a pokazuje „w powiększeniu” na pozór gładki przebieg z rysunku 3c. Na rysunku

3 czułość wynosiła 100mV/działkę, teraz wynosi 2mV/działkę – jak widać, tętnienia nie zostały całkowicie usunięte, tylko znacznie zredukowane. Zdziwienie budzą też gwałtowne, króciutkie impulsy wskazane zielonymi strzałkami. Przy bliższym zbadaniu okazuje się jednak, że są to „nieistniejące zakłócenia”.

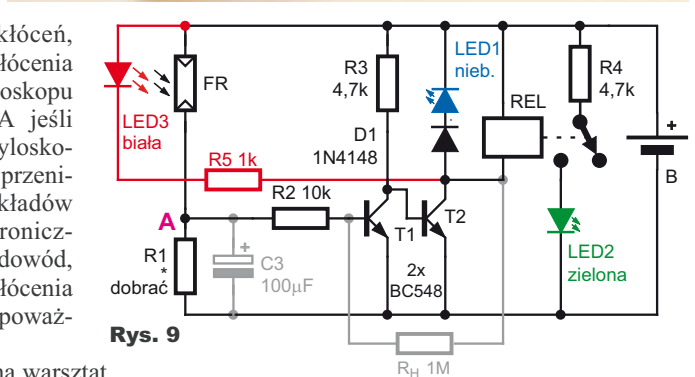
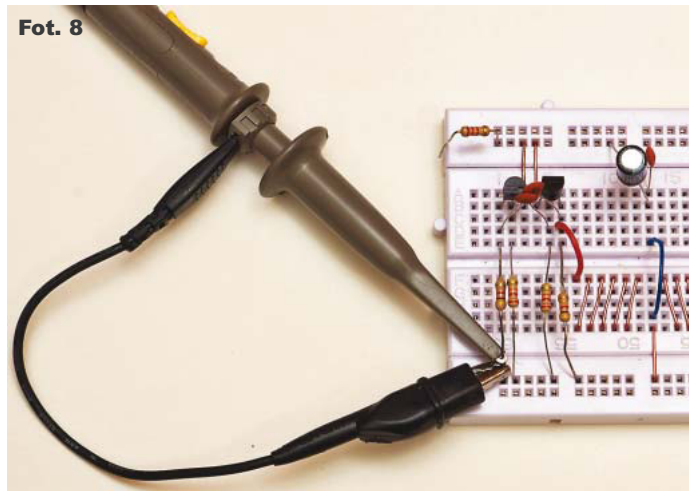
Rysunek 7b pokazuje przebieg mierzony „na masie względem masy”, jak ilustruje fotografia 8. W rzeczywistości napięcie jest tam dokładnie równe zero, jednak oscyloskop pokazuje obecność zakłóceń, a to znaczy, że zakłócenia przenikają do oscyloskopu innymi drogami. A jeśli przenikają do oscyloskopu, to mogą też przeniknąć do innych układów i obwodów elektronicznych. To kolejny dowód, że różnorodne zakłócenia mogą być i bywają poważnym problemem.

A teraz weźmy na warsztat...

Problem zakłóceń zewnętrznych. Badane w poprzednim wykładzie



Fot. 6



Rys. 9

„wszechobecne śmieci” przenikają z sieci energetycznej 230V 50Hz także do naszego regulatora z fotografii tytułowej. To głównie one powodowały mało stabilną pracę i niejednoznaczne reakcje układu, o czym świadczyły dziwne zmiany dźwięku brzęczyka. Wprowadzenie dodatniego sprzężenia zwrotnego przez dodanie R_H genialnie poprawiło działanie. Zbadajmy to dokładniej w prostym układzie przełącznika zmierzchowego według rysunku 9. Najpierw **zmontuj układ BEZ kondensatora C3 i BEZ rezysto-**

ra R_H . Nie montuj też zaznaczonych kolorem czerwonym R5 i LED3. Rezystor R2 w takiej uproszczonej wersji nie odgrywa praktycznie żadnej roli, mogłoby go nie być.

Koniecznym wykonaj to ćwiczenie NIE przy świetle dziennym, tylko przy sztucznym świetle żarówek lub świetlówek. Zależnie od oświetlenia w pomieszczeniu, dobierz R1 o jak najmniejszej wartości, przy której zielona dioda LED2 jeszcze nie świeci. Wtedy przełącznik i LED2 włączają się po zasłonięciu ręką fotorezystora FR. U mnie taką najmniejszą wartością R1, przy której LED2 nie świeciła, było 470Ω , ale zastosowałem $R1=1k\Omega$. Niebieska dioda LED1 będzie krótko błyskać, gdy przełącznik będzie wyłączany (przełączenie przy wyłączeniu).

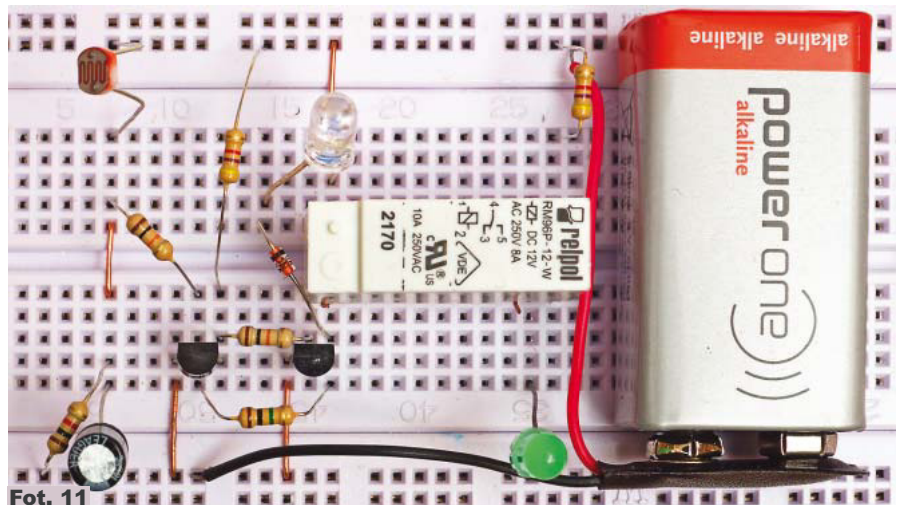
Jak najwolniej przesuwaj rękę, zasłaniając i odsłaniając fotorezystor. Jeżeli zrobisz to naprawdę pomału, to przekonasz się, że układ nie przełącza się nagle, tylko w pobliżu progu przełączania przełącznik terkocze – brzęczy, a niebieska dioda LED1 miga przez dłuższy czas. Gdyby przełącznik tak terkotał podczas pracy, byłoby to zabójcze dla jego styków, przez które płynąłby prąd. Przerwanie prądu powoduje bowiem łuk elektryczny, który stopniowo niszczy styki. W przypadku przełącznika szczególnie ważne jest jednoznaczne działanie załącz/wyłącz, co zabezpiecza przed niepotrzebnym wypalaniem styków.

Powodem problemu są niepożądane zmiany napięcia w punkcie A. **Rysunek 10a** pokazuje przebieg w punkcie A bez kondensatora C3. Do zmian napięcia stałego dodaje się ten przebieg zmienny i nic dziwnego, że z zakresie przełączania przełącznik brzęczy.

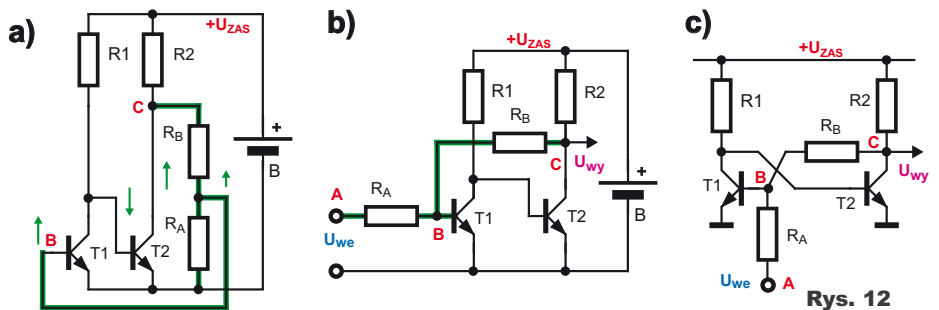
Tu pytanie – zagadka: w sieci energetycznej występuje przebieg o częstotliwości 50Hz (50 cykli na sekundę). Tymczasem przebieg z rysunku 10a ma częstotliwość 100Hz, czyli występuje 100 cykli na sekundę. Czy wiesz dlaczego?

Odpowiedź znajdziesz na końcu wykładu.

W tym przypadku zmiany napięcia w punkcie A są dość duże, ponieważ celo-



Fot. 11



Rys. 12

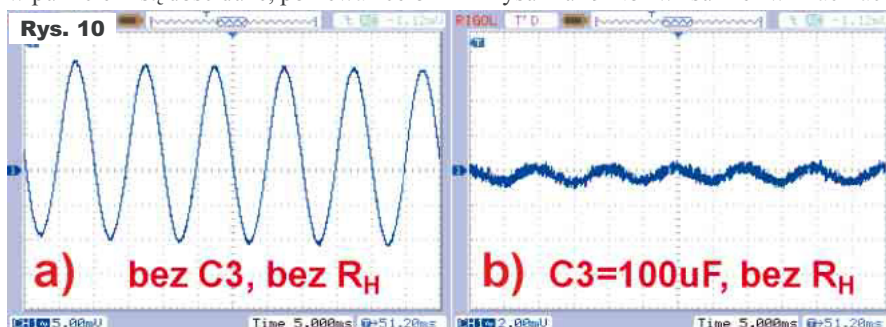
wo zastosowaliśmy fotorezystor, a żarówki halogenowe w mojej pracowni nie dają światła dokładnie ciągłego, tylko modulowane przebiegiem sieci energetycznej. Jednak podobne, tylko mniejsze, przebiegi zakłócające występują w każdym układzie, a ich źródłem jest sieć energetyczna 50Hz – badaliśmy to w poprzednim wykładzie. Te przebiegi zakłócające są tym mniejsze, im mniejsze są rezystancje. Zakłócenia te można radykalnie zmniejszyć, dodając kondensator C3 o odpowiednio dużej pojemności – **rysunek 10b** pokazuje około 30 razy mniejsze przebiegi z kondensatorem $C3=100\mu F$. Taki kondensator filtrujący poprawia sytuację, jednak żaden kondensator nie wyeliminuje całkowicie tego rodzaju „śmieci” i przy bardzo powolnych zmianach oświetlenia przełącznik może brzęczeć, co możesz sprawdzić w swoim modelu. Nasz układ z rysunku 9 to w sumie wzmacniacz

o dużym wzmacnieniu, który chętnie wzmacnia też wszelkie „śmieci”, dostające się doń nie tylko od strony wejścia.

Skutecznie rozwiązuje problem dołączenia odpowiedniej rezystancji R_H . W moim modelu wystarczyła wartość $2,2M\Omega$, ale zastosowałem z zapasem $1M\Omega$, jak widać na **fotografii 11**. W przypadku świetlówek prawdopodobnie trzeba będzie zastosować mniejszą wartość R_H .

Taki układ możesz też przekształcić w generator, dołączając R5 i LED3, kierując światło diody LED3 na fototranzystor. Reakcję mojego modelu przy świetle żarówek halogenowych oraz pracę w roli generatora zobaczysz na filmiku, dostępnym w Elportalu (www.elportal.pl/pke).

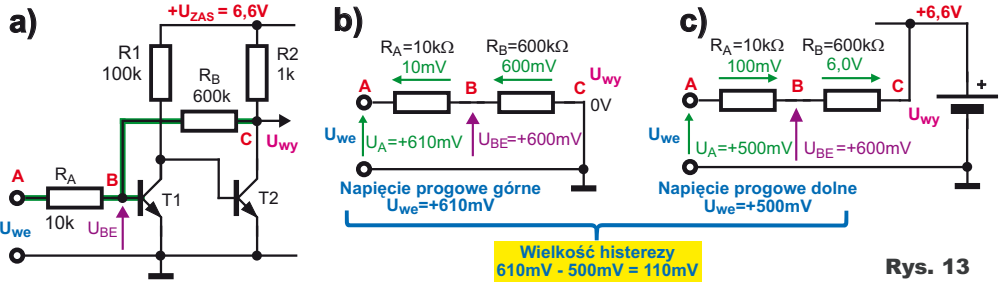
Przerzutnik Schmitta. Histereza. Stwierdzamy, że definitywne rozwiązanie problemu zapewniło *dotądnie sprzężenie zwrotne*, z wyjścia na wejście, wprowadzane przez rezystor R_H . Zagadnienie to było sygnalizowane już w wykładzie 3, m.in. na rysunkach 3..7. Wtedy wprowadzenie bardzo silnego dodatniego sprzężenia zwrotnego spowodowało, że układ przestał być wzmacniaczem, tylko stał się układem dwustanowym – *przerzutnikiem bistabilnym*. Teraz też wprowadzamy sprzężenie zwrotne dodatnie, ale zdecydowanie słabsze, bo sygnał z wyjścia podajemy na wejście przez dzielnik napięcia – ideę pokazuje **rysunek 12a**. Jednak taki układ musi mieć wejście, a w najprostszym przypadku



wejściem jest końcówka rezystora R_A , jak pokazuje **rysunek 12b**. Taki układ też ma tylko dwa stany stabilne i też jest odmianą przerzutnika bistabilnego, co jasno widać na **rysunku 12c**.

Przeanalizujemy wersję z **rysunku 13a**. Zakładamy, że próg przełączania tranzystora T1 to 600mV (co jest prawdziwe przy małych prądach kolektora). Jeżeli napięcie wejściowe U_{we} najpierw wynosi zero, a potem powoli rośnie, to tranzystor T1 jest zatkany, a T2 otwarty – nasycony. Nasycony tranzystor T2 zwiiera punkt C do masy ($U_C=0$). Nas interesuje, przy jakim napięciu wejściowym napięcie U_B osiągnie wartość 600mV, bo wtedy zacznie przewodzić T1. Sytuacja jest przedstawiona na **rysunku 13b**. Gdy napięcie w punkcie A osiągnie wartość **610mV**, zacznie stopniowo przewodzić T1, będzie on obniżał napięcie na bazie T2, czyli zacznie zmniejszać prąd tranzystora T2. Zatykający się tranzystor T2 zapoczątkuje wzrost napięcia w punkcie C, a to wspomże i przyspieszy przełączenie obu tranzystorów. Zostaną one gwałtownie przerzucone w przeciwne stany: T1 zostanie nasycony, a T2 – zatkany. Zatkanie T2 oznacza, że punkt C zostanie dołączony do dodatniej szyny zasilania (przez rezystor R2, ale ma on małą wartość i go pomijamy). Dalsze zwiększanie napięcia U_A utrzyma przerzutnik w takim stanie.

Nas interesuje sytuacja, gdy napięcie wejściowe U_A będzie się zmniejszać i kwestia: przy jakim napięciu U_A przerzutnik wróci do poprzedniego stanu? Tranzystor T1 zacznie się zatykać, gdy napięcie U_B wyniesie 600mV – sytuację pokazuje **rysunek 13c**. Widać, że przy wzroście napięcia U_A przełączenie nastąpi przy napięciu $U_A=610$ mV, natomiast przy zmniejszaniu napięcia przełączenie nastąpi przy napięciu $U_A=500$ mV. W układzie wystąpi tzw. **histereza**, czyli zależność aktualnego stanu układu od stanów w chwilach poprzedzających. Zależnie od aktualnego stanu (i od tego, czy



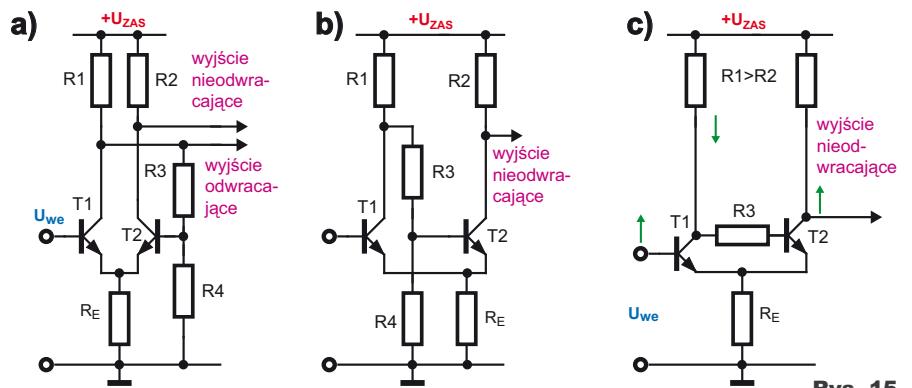
Rys. 13

napięcie rośnie, czy maleje) próg przełączania przyjmuje jedną z dwóch wartości, a różnica między nimi to szerokość histerezy, która w przypadku z **rysunku 13** wynosi 110mV (610mV–500mV). Ilustruje to **rysunek 14a**, gdzie pokazana jest zależność napięcia wyjściowego od wejściowego. Natomiast **rysunek 14b** pokazuje reakcję układu za zmiany napięcia wejściowego w czasie. Na wyjściu C mamy dwa „czyste” stany, a co bardzo ważne, **układ nie reaguje na zakłócenia o wielkości mniejszej od szerokości pętli histerezy**. A szerokość pętli histerezy wyznaczone jest przez stosunek R_B/R_A oraz amplitudę (wielkość) zmian napięcia wyjściowego.

Rysunki 13 i 14 sygnalizują w ogromnym skrócie poważne i niełatwe zagadnienie, za którym stoją bardzo poważne rozważania teoretyczne. W każdym razie w układach przełączających, z uwagi na nieuchronne zakłócenia zewnętrzne, do prawidłowego działania prawie zawsze potrzebna jest histereza. **Szerokość pętli histerezy musi być z jednej strony większa od wielkości (amplitudy) spodziewa-**

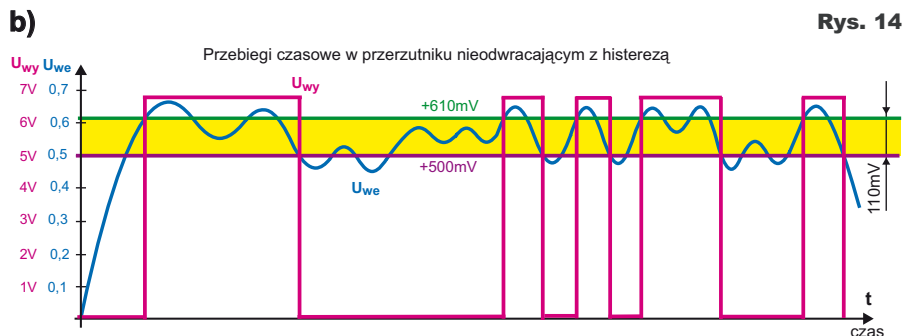
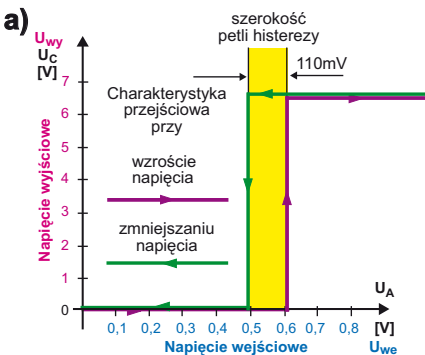
nych zakłóceń, ale zwykle chcemy, by była jak najmniejsza, by różnica między progami przełączania nie była za duża. Aby pogodzić te przeciwstawne wymagania, dodatkowo stosuje się tłumienie zakłóceń (w naszym przypadku przez kondensator C3).

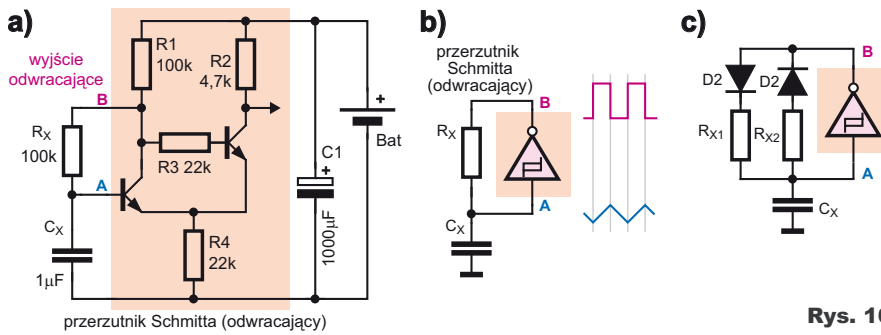
Tego rodzaju układ z histerezą nazywany jest **przerzutnikiem Schmitta**. Prosta wersja z **rysunku 12** ma istotne wady, np. zmniejszanie stosunku R_B/R_A tak rozszerza szerokość histerezy, że dolny próg przełączania przesuwają się poniżej zera, poniżej masy, co w wielu przypadkach całkowicie przekreśla praktyczną przydatność takiego układu. Dlatego w podręcznikach spotyka się inne rozwiązanie przerzutnika Schmitta. Można je narysować według **rysunku 15a** i dopatrywać się podobieństw do pary różnicowej. Jednak częściej układ rysowany jest jak na **rysunku 15b**. Spotyka się też układ bez rezystora R4 według **rysunku 15c**, gdzie przełączania wyznaczone są przez stosunki rezystorów $R1/R_E$ oraz $R2/R_E$, przy czym $R1 > R2$. Szerokość okna histerezy możemy regulować, zmieniając stosunek



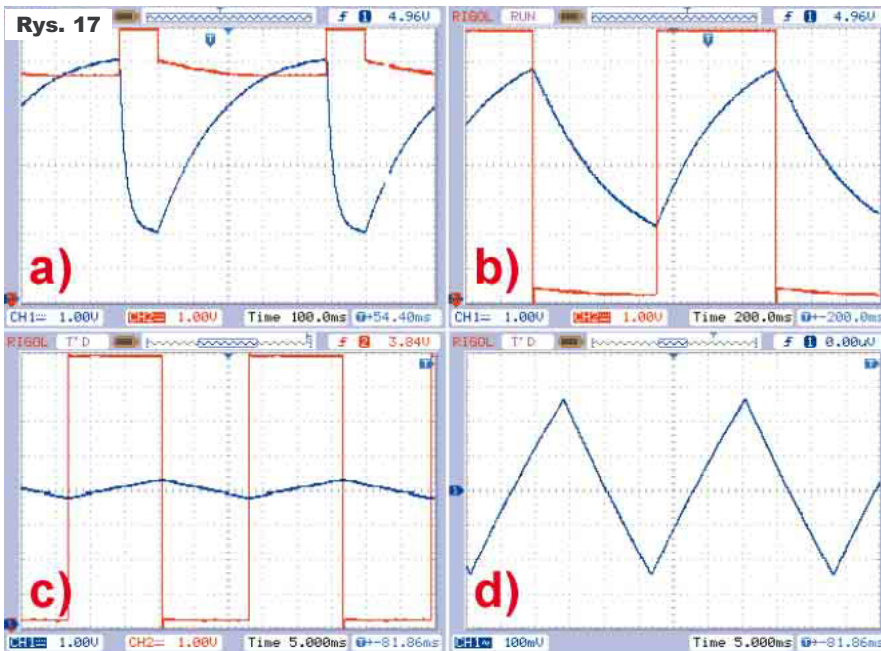
Rys. 15

Rys. 14





Rys. 16



rezystorów R1 i R2. Układ z rysunku 15c zasadniczo nie jest pełnowartościowym przerzutnikiem Schmitta, jednak wykorzystajmy go z uwagi na pewne zawiłości działania i doboru elementów wersji z rysunku 15a. Zbudujmy mianowicie prosty generator z odwracającym przerzutnikiem Schmitta i obwodem RC według rysunku 16a. Taki generator w uproszczeniu możemy przedstawić jak na rysunku 16b. Możemy też niezależnie regulować czasy trwania stanu wysokiego i niskiego według idei z rysunku 16c.

Generator działa, ale ponieważ nie jest to klasyczny, pełnowartościowy przerzutnik Schmitta, przebiegi są dalekie od doskonałości, jak wskazuje rysunek 17a, przedstawiający zrzuty z oscyloskopu wersji z rysunku 16a w punktach A (przebieg niebieski) i B (przebieg czerwony).

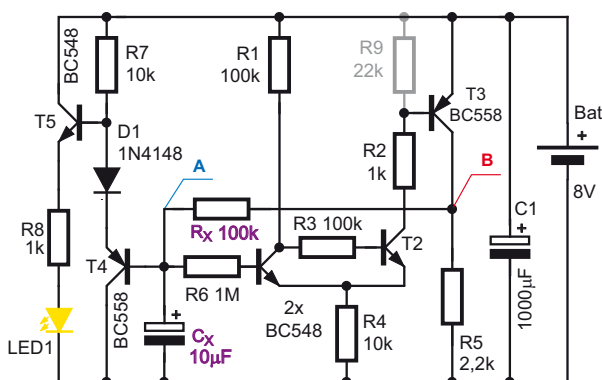
Wykonaj też według rysunku 18 i fotografii 19 sterownik diody LED1, dający płynne

zmiany jasności. Aby uzyskać przerzutnik odwracający o lepszych parametrach, dodajemy tu trzeci tranzystor, który nie tylko jest negatorem i odwraca działanie, ale także daje na wyjściu „czyste” stany (masa i plus zasilania). Pracę mojego modelu zobaczysz też na filmiku dostępnym w Elportalu. Rysunek 17b pokazuje znacznie ładniejsze przebiegi w punktach A i B. Elegancki generator przebiegu trójkątnego zrealizujemy w jednym z następnym wykładów, ale i ten układ pozwala uzyskać sensowny przebieg trójkątny. Wystarczy zdecydowanie zmniejszyć histerezę (i amplitudę sygnału). Rysunek 17c i 17d pokazuje przebieg na kondensatorze Cx z rezystancjami R1=12,2kΩ (10kΩ+2,2kΩ), R2=10kΩ i z dodanym rezystorem R9.

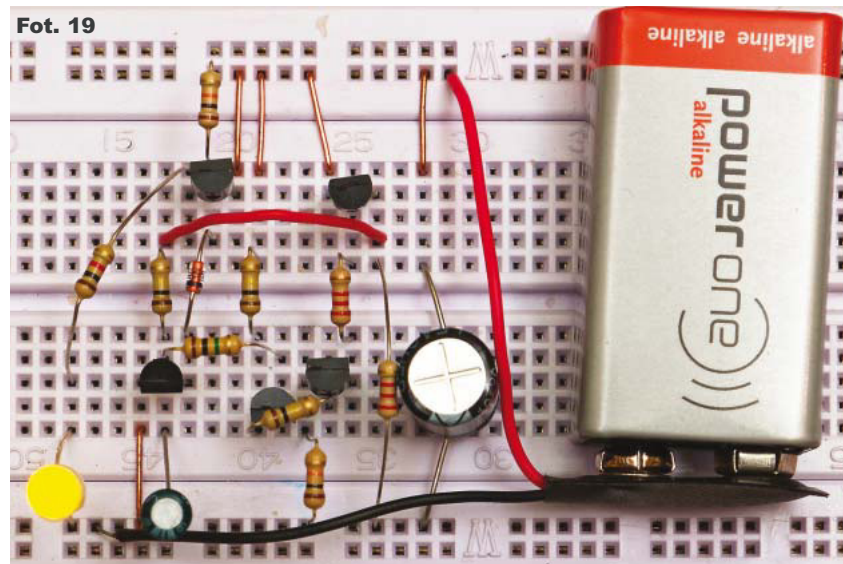
Generator przebiegu pilokształtnego otrzymamy w najprostszy sposób, dodając według rysunku 20a źródło prądowe z tranzystorami T4, T5 i modyfikując sposób pracy tranzystora T3 i kondensatora Cx, który teraz dołączony jest do dodatniej szyny zasilania. Mój model pokazany jest na fotografii 21, a rysunek 22 ilustruje przebieg napięcia na kondensatorze Cx, który cały czas ładuje się prądem źródła (lustra) prądowego T4, T5 i napięcie na nim, mierzone względem masy, zmniejsza się. Gdy napięcie na Cx przekroczy dolny próg przełączania przerzutnika, zostanie otwarty tranzystor rozładowujący T3 i bardzo szybko rozładuje kondensator. Cykl zacznie się od nowa.

Można też zmontować „odwrotną” wersję układu według rysunku 20b. Podobną ideę wykorzystaliśmy w projekcie wstępnym do wykładu 5 – w tęczyowym wskaźniku napięcia, gdzie dodatkowo zastosowaliśmy przerzutnik monostabilny, który na określony czas otwiera tranzystor rozładowujący.

Rys. 18



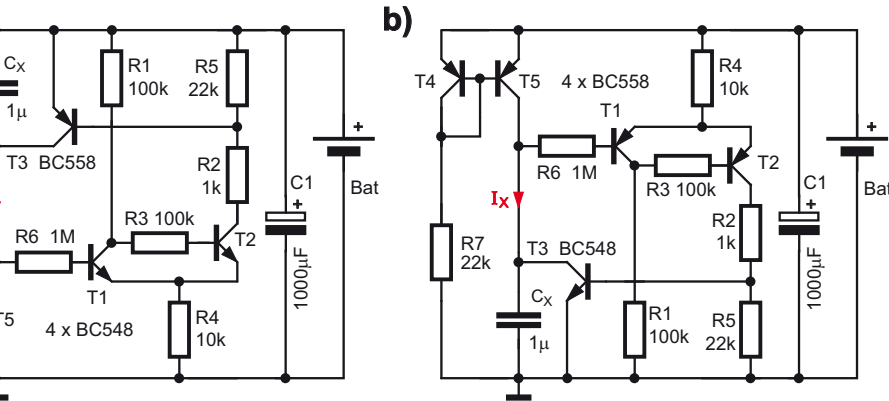
Fot. 19



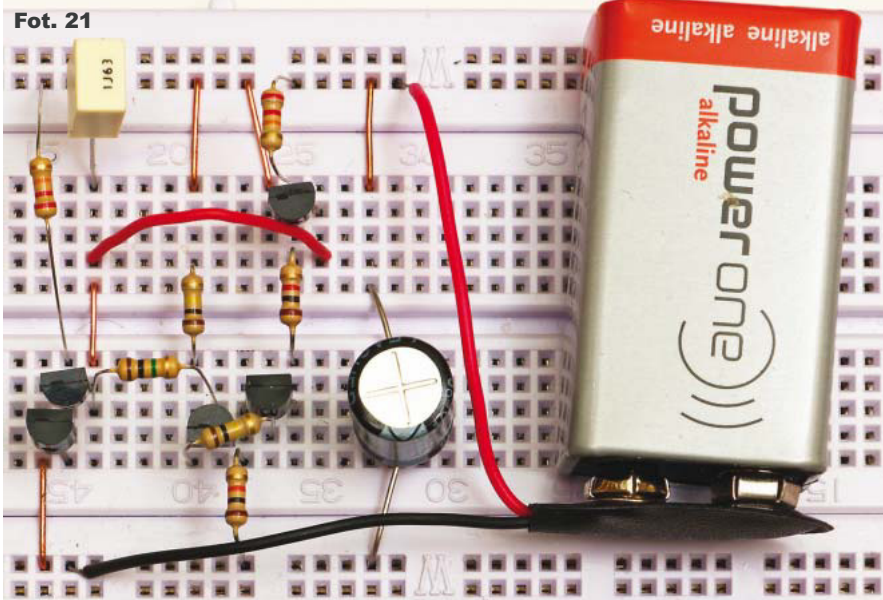
Gdy opanowaliśmy historię, możemy zrealizować...

Timer – układ opóźniający, na przykład według rysunku 23 i fotografii 24. Po włączeniu napięcia zasilania lub po naciśnięciu S1, który rozładuje Cx, żółta dioda LED1 świeci przez czas, gdy kondensator Cx ładuje się przez rezystor Rx (w modelu nieco ponad 3 sekundy). Po upływie tego czasu LED1 gaśnie, a na stałe zaświeca się czerwona LED2. Dioda D1 i rezystor R10 ułatwiają rozładowanie Cx po wyłączeniu zasilania. W kolektor T3 lub T4 można włączyć przekaźnik (z diodą antyprzepięciową). Dobierając Cx (100nF...1000uF), Rx (100kΩ...1MΩ), można regulować czas opóźnienia w bardzo szerokim zakresie. Praktycznym problemem jest fakt, że pojemność kondensatorów elektrolitycznych znacząco zmienia się z temperaturą i z upływem czasu oraz wtedy, gdy długi czas pozostają bez napięcia. Dlatego taki timer z kondensatorem elektrolitycznym nie jest stabilny i nie ma praktycznego zastosowania.

Wyjaśnienie zagadki: Jak pokazuje rysunek 10, w układzie z rysunku 9 w punkcie A występuje przebieg o częstotliwości 100Hz, dwa razy większej od częstotliwości sieci (50Hz), ponieważ żarówki i świetlówki są rozjaśniane dwa



Rys. 20



razy w ciągu każdego cyklu, zarówno gdy napięcie jest dodatnie, jak też gdy jest ujemne. W przypadku klasycznych świetlówek występuje silne migotanie z częstotliwością 100Hz, w przypadku żarówki

migotanie jest dużo mniejsze z uwagi na dużą bezwładność cieplną rozżarzonego włókna.

Piotr Górecki



Rys. 23

