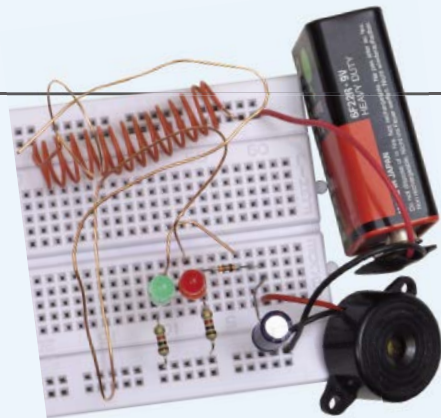




PRAKTYCZNY KURS cz. 16 ELEKTRONIKI



Oto szesnasta część PRAKTYCZNEGO KURSU ELEKTRONIKI, który zainaugurowaliśmy w MT 2/2013 i będziemy kontynuować w kolejnych wydaniach. Zainteresowanie kursem jest olbrzymie, dlatego zdecydowaliśmy się umożliwić czytelnikom dołączenie do niego w dowolnym momencie. Wszystkie poprzednie części są dla wszystkich dostępne w formacie PDF na stronie www.mt.com.pl. Można z nich korzystać w komputerze lub sobie je wydrukować. Można też kupić wszystkie archiwalne numery MT na www.ulubionykiosk.pl. 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 niepowtarzalna okazja. We współpracy z bratnią redakcją miesięcznika „Elektronika dla Wszystkich” publikujemy w „Młodym Techniku” cykl 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 **EdW09**, zawierający płytkę stykową i wszystkie elementy, jakie będą potrzebne do wykonania kilkunastu projektów zaplanowanych w PKE. Zestaw **EdW09** 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 28 maja 2014 r., to zestaw **EdW09** wyślemy Ci w połowie czerwca 2014 r., wraz z lipcowym numerem MT.

Uwaga uczniowie!

Szkoły prenumerujące MT otrzymują **Pakiety Szkolne PS EdW09**, zawierające po **10 zestawów EdW09** (każdy z nich 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):

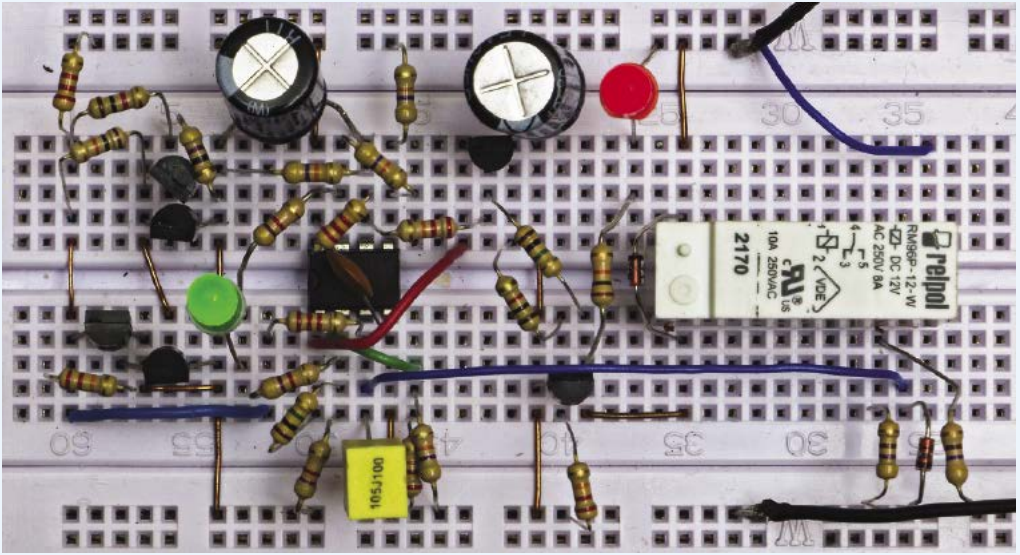
- | | |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| 1. Diody prostownicze | 4 szt. |
| 2. Układy scalone | 4 szt. |
| 3. Tranzystory | 8 szt. |
| 4. Fotorezystor | 1 szt. |
| 5. Przekaznik | 1 szt. |
| 6. Kondensatory | 22 szt. |
| 7. Mikrofon | 1 szt. |
| 8. Diody LED | 11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

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

Uwaga Szkoły

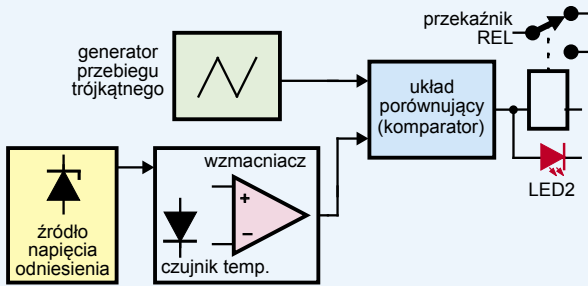
Tylko dla szkół prenumerujących „Młodego Technika” przygotowano **Pakiety Szkolne** zawierające 10 zestawów EdW09 (**PS EdW09**) w promocyjnej cenie 280 zł brutto, tj. z rabatem 40%.

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

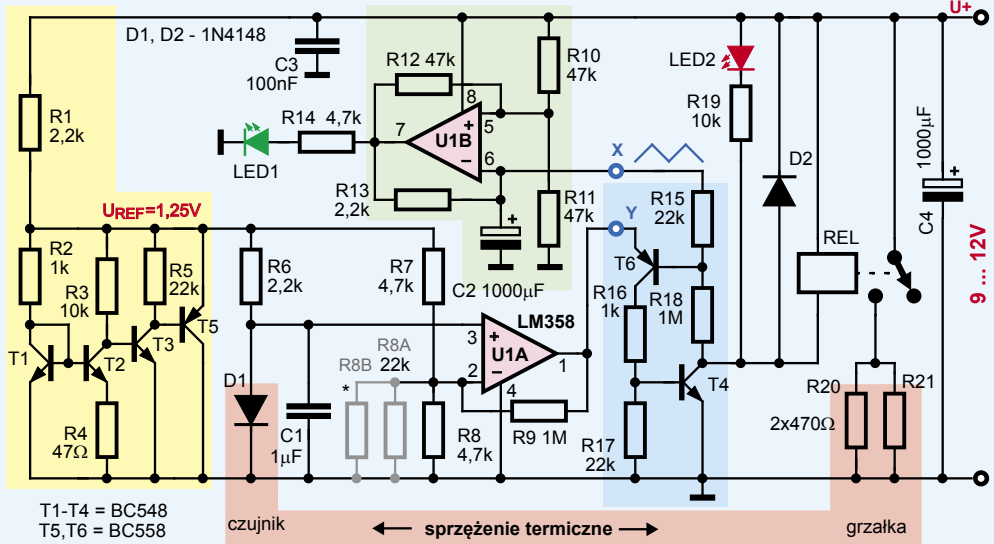


Projekt 16

Stabilizator temperatury



Na fotografii wstępnej pokazany jest ulepszony układ regulatora/stabilizatora temperatury. W przykładzie 8 projektem wstępnym był prosty termostat – regulator temperatury. Zrealizowaliśmy go na kilku tranzystorach i przekonaliśmy się, jak ważną sprawą jest wprowadzenie histerezy, która polepsza działanie układu. Teraz rozumiemy, że zwiększanie histerezy z jednej strony ma dobroczynne skutki, bo likwiduje wpływ zewnętrznych



A

B



zakłóceń, ale z drugiej strony pogarsza dokładność regulacji. Dlatego zbudujemy ulepszony regulator o znacznie lepszych właściwościach stabilizacyjnych.

Schemat blokowy pokazany jest na **rysunku A**, a pełny schemat ideowy na **rysunku B**. Dla ułatwienia analizy poszczególne bloki zostały wyróżnione kolorowymi podkładkami. Układ U1A silnie wzmacnia zmiany napięcia z diody D1, która odgrywa rolę czujnika temperatury. Zieloną podkładką wyróżniony jest generator. Żółta podkładka wyróżnia źródło napięcia odniesienia, czyli rodzaj stabilizatora napięcia (1,25 V). Niebieska podkładka wyróżnia komparator, czyli układ porównujący, który steruje przełącznikiem REL. W naszym modelu funkcję grzałki pełnią dwa rezystory o nominale 470 omów. Różowa podkładka na rysunku A wskazuje, że czujnik D1 i grzałka są sprzężone termicznie, czyli umieszczone tak, by ciepłe rezystory podgrzewały diodę. Moją realizację tego zadania widzisz na **fotografii C**.

Gdy zbudujesz taki układ, zielona kontrolka LED1 będzie regularnie zaświecać się na niecałą sekundę i gasnąć też na niecałą sekundę. Pokazuje ona rytm pracy regulatora. Natomiast świecenie czerwonej diody LED2 zależy od temperatury czujnika temperatury D1. Wraz z zaświecaniem diody LED 2 zostaje też włączony przełącznik REL, który steruje grzałką. Gdy czujnik D1 jest zimny, dioda LED2 świeci ciągle i grzałka jest włączona na stałe. Gdy temperatura rośnie, dioda LED2 i przełącznik pracują w rytmie przerywanym. Czym wyższa temperatura, tym na krótszy czas jest włączana dioda LED2 i grzałka. Gdy temperatura jest zdecydowanie za wysoka, dioda LED2, przełącznik i grzałka zostają całkowicie wyłączone. W „strefie pośredniej” grzałka włączana jest na czas mniejszy niż okres pracy generatora. Uzyskujemy przez to możliwość płynnej regulacji mocy średniej, choć grzałka sterowana jest dwustanowo.

W zastawie EdW09 nie ma ani jednego potencjometru, więc pożądaną temperaturę naszego stabilizatora będziemy ustawiać, zmieniając wartość rezystancji R8. Ścisłej biorąc, nie będzie to jeden rezystor, tylko kilka połączonych równolegle.

Zadanie nie jest trudne, ale trzeba trochę poeksperymentować. Na początek **NIE MONTUJ** grzałki, czyli rezystorów R20, R21.

Z rezystorem R8 o wartości 4,7 kΩ, a bez R8A, R8B, czerwona dioda LED2 będzie wygaszona. Równolegle do R8 trzeba dołączyć jak największą dodatkową rezystancję, żeby LED2 zaświeciła.

Najlepiej byłoby dobrać wypadkową rezystancję $R8 || R8A || R8B$ tak, żeby czerwona dioda LED2 świeciła prawie cały czas i gasła tylko na ułamek sekundy. W praktyce będzie to trudne. Dioda D2 może świecić cały czas, ale podgrzanie palcami czujnika D1 powinno ją zgasić.

W moim modelu trzeba było dołączyć równolegle do R8 rezystory R8A=22 kΩ i R8B=47 kΩ. U Ciebie, z uwagi na rozrzut parametrów, zapewne też trzeba będzie dodać rezystor R8A=22 kΩ i jeszcze jeden lub dwa o większym nominale. W każdym razie trzeba sprawić, żeby lampka LED2 świeciła cały czas lub prawie cały czas.

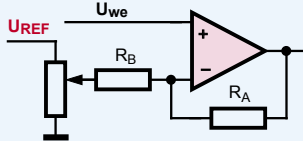
Gdy po takim ustawieniu regulatora ogrzejesz palcami diodę D1, dioda LED2 będzie gasnąć na dłużej, przy silniejszym ogrzaniu czujnika D1 przestanie świecić, a przełącznik w ogóle nie będzie włączany. Podczas prób rezystor R13 może mieć wartość 1 kΩ lub 2,2 kΩ, a potem możesz go zwiększyć do 4,7 kΩ.

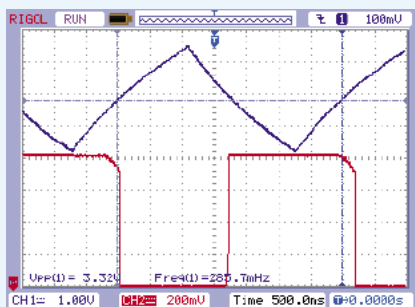
Jeżeli po takiej regulacji dołączysz rezystory grzałki R20, R21 w pobliżu czujnika D1, to otrzymasz termostat – stabilizator temperatury. Ja swój model zasilam napięciem 12 V z zasilacza stabilizowanego i grzałkę z powodzeniem zrealizowały dwa rezystory po 470 omów. Ty, jeśli chcesz wypróbować taki termostat, też powinieneś raczej zasilić układ ze źródła o wydajności prądowej większej niż mały 9-woltowy bloczek. Może to być 6 baterii alkalicznych LR6 (AA), a jeszcze lepiej, gdy będzie to zasilacz stabilizowany 9 V...12 V. Przy zasilaniu napięciem 9 V w roli grzałki możesz wykorzystać dwa do czterech równolegle połączonych rezystorów 220-omowych (przy czterech prąd grzałki wyniesie ponad 160mA i sumaryczna moc grzania około 1,5 W). Przy zasilaniu 12 V można wykorzystać dwa do czterech rezystorów 470 Ω i będzie to grzałka mocy 0,6...1,2 W. Oczywiście taka „grzałka” powinna być umieszczona w pobliżu czujnika temperatury D1.

W Elportalu (www.elportal.pl/pke) można znaleźć filmik pokazujący pracę mojego modelu.

Opis układu dla „zaawansowanych”

Wpływ wahań napięcia zasilającego usunięty jest przez to, że obwód pomiarowy z diodą D1 i rezystorami R6–R8 jest zasilany stabilnym napięciem ze źródła napięcia odniesienia. Z konieczności w modelu





E

wykorzystaliśmy prymitywną, niedoskonałą wersję stabilizatora szeregowego, zwanego *bandgap*, która daje napięcie $U_{REF} = 1,25 \text{ V}$. Zrealizowaliśmy ją na tranzystorach T1 – T3, T5 (natomiast w praktycznie użytecznym regulatorze zastosowalibyśmy scalony stabilizator *bandgap*, np. LM385 1,2 V).

Jak wiemy, napięcie przewodzenia diody krzemowej zmienia się pod wpływem temperatury, a współczynnik cieplny wynosi około $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Zmiany napięcia diody D1 są wzmacniane przez układ U1A. Wzmocnienie jest bardzo duże, wyznaczone przez stosunek rezystancji R9 do wypadkowej rezystancji równoległego połączenia R7 || R8,

k która wynosi około $2 \text{ k}\Omega$, przez co wzmocnienie wynosi około 500, czyli na wyjściu wzmacniacza U1A napięcie zmienia się aż o około $1 \text{ V}/^\circ\text{C}$. Tak duże wzmocnienie ustawiłem tylko dlatego, żeby łatwo było zaobserwować działanie tego regulatora/stabilizatora.

W związku z dużym wzmocnieniem starannie trzeba też dobrać wartości rezystorów R8A, R8B. Gdybyśmy mieli potencjometr, zastosowalibyśmy wzmacniacz według idei z **rysunku D** i potencjometrem ustawiłobyśmy potrzebną temperaturę stabilizacji.

W każdym razie w punkcie oznaczonym Y występuje napięcie stałe, które zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. W najprostszym regulatorze dwustanowym napięcie z punktu Y wykorzystalibyśmy do sterowania tranzystora wykonawczego T4 i przekaźnika REL. W naszym dokładniejszym regulatorze porównujemy napięcie z punktu Y z przebiegiem trójkątnym z punktu X. Przebieg podobny do trójkąta wytwarzany jest przez generator z układem U1B. Komparatorem, czyli układem porównującym, jest zasadniczo tranzystor T6. Na jego bazę podawane jest napięcie trójkątne o wartości międzyszczytowej około $3,4 \text{ Vpp}$. O tym, czy i kiedy będzie on przewodził, decydują więc napięcia w punktach X, Y. Jeżeli temperatura zmniejsza się, napięcie w punkcie Y, czyli na emiterze T6, rośnie. Gdy jest bliskie dodatniej szyny zasilania, tranzystor T6 przewodzi cały czas. Wtedy ciągle przewodzi też T4, działa przekaźnik REL i świeci LED2.

Gdy z kolei temperatura jest za wysoka, napięcie w punkcie Y jest bliskie masy, tranzystor T6 jest stale zatkany, podobnie T4. Gdy napięcie w punkcie Y jest „w strefie pośredniej”, tranzystor T6 jest włączany na część cyklu. Następuje płynna regulacja współczynnika wypełnienia impulsów. **Rysunek E** pokazuje przebiegi w punkcie X i na bazie T4.

W układzie komparatora dodany jest rezystor R18 o dużej wartości, przez co układ przypomina trochę strukturę tyrystorową. Rezystor R18 wprowadza słańbkie dodatnie sprzężenie zwrotne, przez co otrzymujemy komparator z niewielką histerezą eliminującą wrażliwość na niewielkie zakłócenia. Szczegółowo omówienie kluczowych bloków jest przedstawione dalej w wykładzie.

W takim regulatorze zmiany temperatury czujnika płynnie zmieniają współczynnik wypełnienia (PWM – Pulse Width Modulation) impulsów sterujących grzałką, od zera do ciągłego włączenia. Podczas pracy termostatu ustali się takie wypełnienie impulsów, a tym samym średnia moc grzałki, by temperatura była równa pożądanej. Regulator z taką płynną regulacją mocy grzania może stabilizować temperaturę znacznie dokładniej niż badana wcześniej wersja dwustanowa z wykładu 8.

Wykład z ćwiczeniami 16

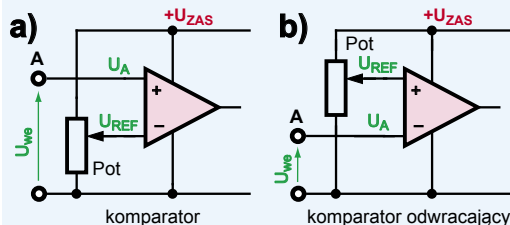
Poznajemy elementy i układy elektroniczne

W dwóch poprzednich odcinkach poznaliśmy i wykorzystywaliśmy wzmacniacze operacyjne, pracujące albo w konfiguracji odwracającej, nieodwracającej albo jako wtórnik. Omówmy teraz dwa

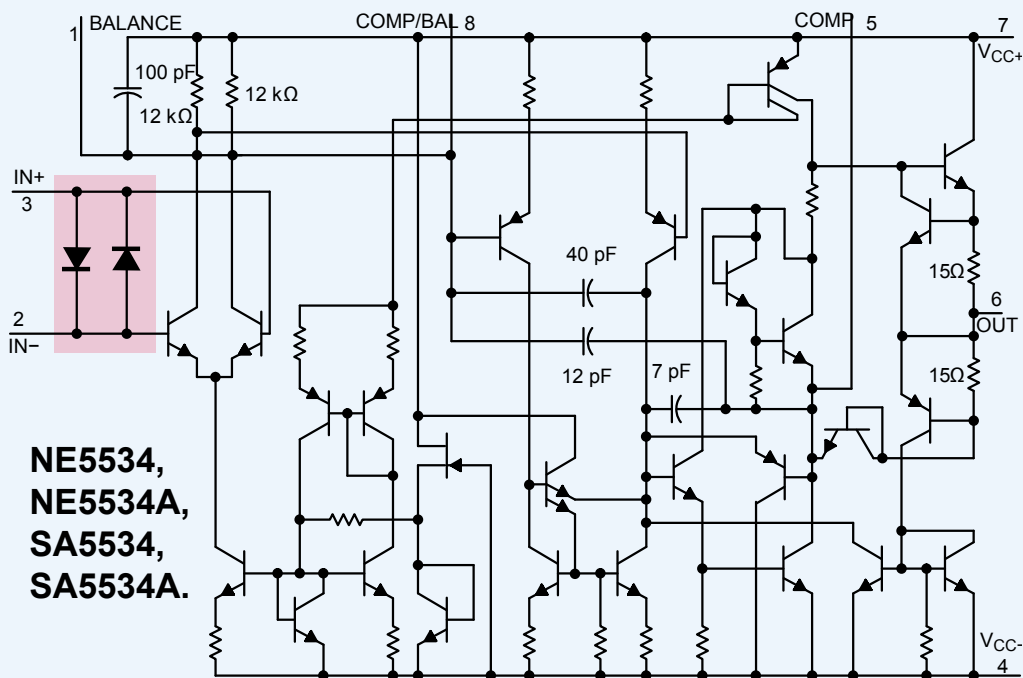
układy pracy tych wzmacniaczy, w pewnym sensie nietypowe. Przypomnijmy, że w zdecydowanej większości zastosowań podczas normalnej pracy napięcia na obu wejściach są praktycznie jednakowe (z dokładnością do napięcia niezrównoważenia), co jest efektem działania ujemnego sprzężenia zwrotnego. W niektórych przypadkach jest inaczej.

Komparator – układ porównujący.

Wzmacniacz operacyjny reaguje na różnicę



1

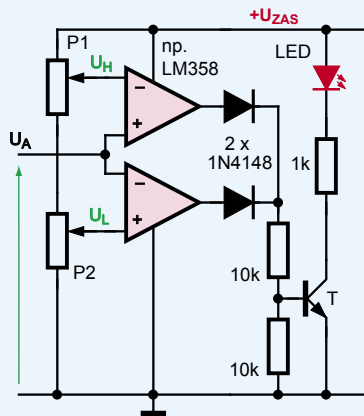


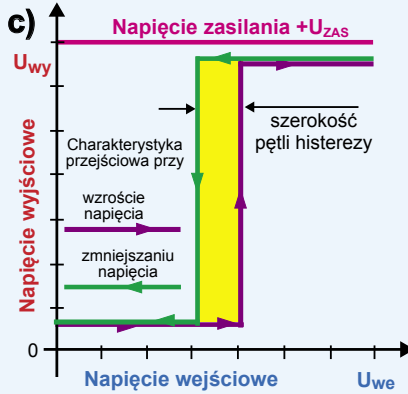
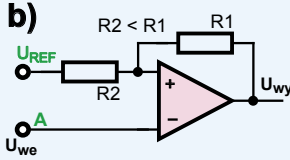
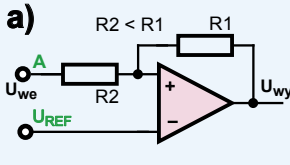
**NE5534,
NE5534A,
SA5534,
SA5534A.**

napięcie między wejściami, więc gdy w układach z **rysunku 1** na jedno wejście podajemy napięcie odniesienia (referencyjne), stan wyjścia zależy od tego, czy napięcie wejściowe U_A jest niższe, czy wyższe od napięcia odniesienia U_{REF} . W związku z ogromnym wzmocnieniem, praktycznie nie ma „strefy przejściowej”, tylko na wyjściu otrzymujemy jeden z dwóch stanów: „wysoki” albo „niski”. Rezystancja wejściowa komparatora jest bardzo duża, wyznaczona przez wielkość prądów polaryzacji wejść.

Taki prosty układ porównujący bywa pożyteczny, jednak ogólnie biorąc, wzmacniacze operacyjne nie są optymalizowane do pracy w roli komparatora. Istnieją specjalizowane układy scalone, zwane komparatorami, podobne do wzmacniacza operacyjnego, ale przeznaczone właśnie do porównywania napięć. Natomiast chcąc wykorzystać wzmacniacz operacyjny w roli komparatora, trzeba upewnić się i zadbać, by napięcia wejściowe mieściły się w zakresie dopuszczalnym dla danego wzmacniacza. Podanie na wejścia napięć spoza dopuszczalnego zakresu może skutkować różnymi przykrymi niespodziankami, m.in. tzw. *inwersją*, czyli zamianą funkcji wejść. Ograniczeniem jest nie tylko dozwolony zakres wspólnych napięć wejściowych, ale też dopuszczalna wielkość napięcia różnicowego (między wejściami), dla niektórych wzmacniaczy wynosząca kilka woltów, a dla niektórych tylko $\pm 0,5$ V. Otóż w niektórych popularnych wzmacniaczach – np. NE5532, NE5534, OP27, OP37 – między wejściami włączone są dwie diody ochronne, na **rysunku 2** wyróżnione różową podkładką, których obecność utrudnia pracę w roli komparatora. W naszym wzmacniaczu LM358 takich ograniczeń nie ma, a napięcie różnicowe między wejściami może sięgnąć nawet ± 30 V, wejścia mogą prawidłowo pracować od poziomu ujemnego napięcia zasilania, ale nie mogą pracować „w pobliżu dodatniej szyny zasilania” (co najmniej 1,2...1,5 V poniżej dodatniej szyny zasilania).

Czasem potrzebny jest tzw. komparator okienkowy, który ma stwierdzić, czy napięcie wejściowe mieści się w wyznaczonych granicach. Przykład komparatora (dyskryminatora) okienkowego pokazany jest na **rysunku 3**. Czerwona dioda LED świeci, gdy napięcie wejściowe U_A wykroczy poza „okienko” $U_L...U_H$, czyli gdy jest mniejsze od U_L albo większe od U_H .





W praktycznych warunkach pracy, wskutek nieuchronnych zakłóceń zewnętrznych i szumów, „goly” komparator według rysunku 1 będzie niestabilnie pracować przy powolnych zmianach napięcia w pobliżu progu przełączania (U_{REF}) – wtedy na wyjściu mogą się pojawiać drgania. Doświadczaliśmy już czegoś takiego w wykładzie ósmym przy testach regulatora temperatury. Aby uniezależnić się od omawianych

wcześniej zewnętrznych zakłóceń, dodajemy do komparatora obwód **dodatniego** sprzężenia zwrotnego, zapewniający histerezę, czyli realizujemy...

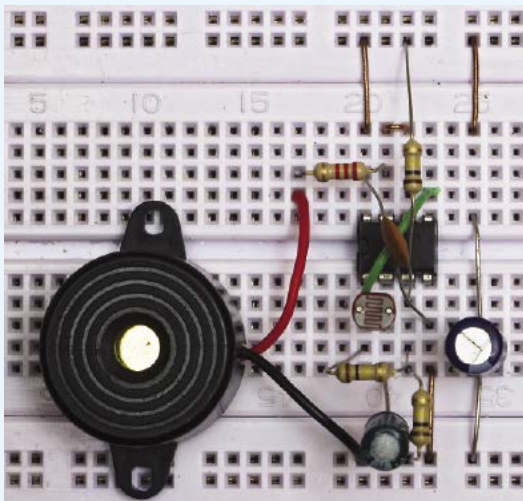
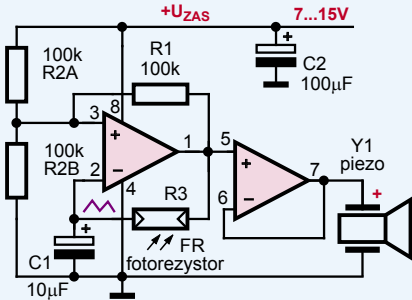
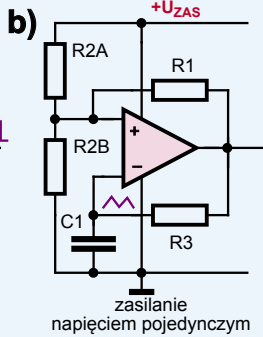
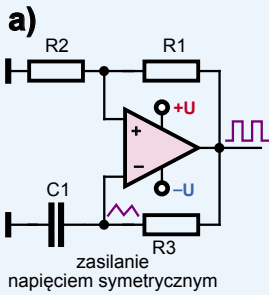
Przerzutnik Schmitta. Sposób jest bardzo prosty – wystarczą dwa rezystory według **rysunku 4a** lub **4b**. Wielkość histerezy – **rysunek 4c** – wyznaczona jest przez stosunek rezystorów $R1/R2$ i wielkość skoku napięcia wyjściowego (w uproszczeniu wartość całkowitego napięcia zasilania). W praktyce wartość $R1$ jest dużo większa od $R2$ i wtedy histereza jest niewielka, często rzędu miliwoltów. Zagadnienie to było już omawiane w wykładzie 8 przy okazji

rysunków 12...15.

W projekcie tytułowym nie wykorzystaliśmy takiej wersji przerzutnika Schmitta dlatego, że w zestawie EdW09 mamy tylko jeden podwójny wzmacniacz operacyjny, który wykorzystaliśmy inaczej.

Generator. Jeżeli do przerzutnika Schmitta z **rysunku 4** dodamy obwód RC w obwodzie ujemnego sprzężenia zwrotnego według **rysunku 5**, to otrzymamy generator. Jego częstotliwość określa zarówno stała czasowa RC, jak też wielkość histerezy (czym mniejsza histereza, tym większa jest częstotliwość pracy i przebieg bardziej przypomina trójkąt). **Rysunek 6** i **fotografia 7** pokazują generator płynnie przestrajany za pomocą fotorezystora, gdzie zmiany natężenia oświetlenia powodują zmiany częstotliwości.

Rysunek 8 pokazuje dwa przykłady praktycznego generatora tego typu zasilanego napięciem symetrycznym. Rezystory $R3A$ i $R3B$, a w drugiej wersji potencjometr $P1$ pozwalają regulować czas trwania stanu wysokiego i niskiego. Maksymalna częstotliwość pracy takich generatorów jest ograniczona przez szybkość zmian na wyjściu wzmacniacza operacyjnego (parametr SR). Na powolnej kostce LM358 można realizować generatory o częstotliwości od 0,001 Hz do co najwyżej 10 kHz. W praktycznie użytecznym generatorze tego typu należałoby zastosować dużo szybszy wzmacniacz.



4

5

6

7



A oto kolejny temat praktyczny, wiążący się ze wzmacniaczami operacyjnymi. Otóż w układzie tytułowego regulatora temperatury dodaliśmy na pozór dziwny obwód z tranzystorami T1–T3, T5. Jest to bardzo prosty i niedoskonały układ źródła napięcia wzorcowego, znany jako tzw. *bandgap reference*.

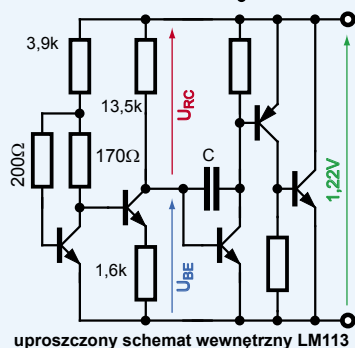
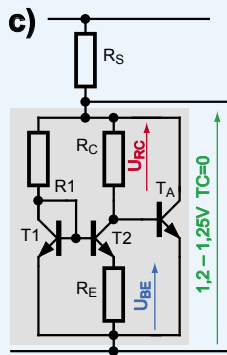
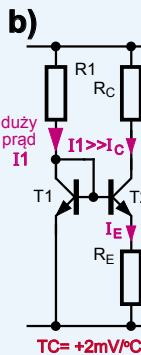
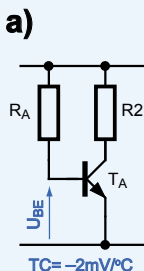
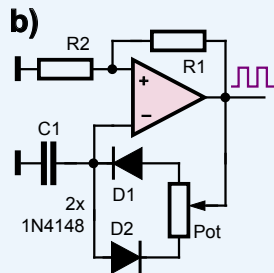
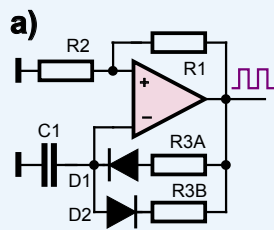
Wiesz już, że napięcie baza-emiter (U_{BE}) w tranzystorze (**rysunek 9a**) maleje ze wzrostem temperatury – współczynnik cieplny jest **ujemny** i wynosi około $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, zależnie od wartości prądu. Jednak generalnie w półprzewodnikach występuje też, co prawda w niezbyt widocznej postaci, zależność $U_T = kT/q$, gdzie napięcie U_T jest wprost proporcjonalne do temperatury bezwzględnej T (wyrażonej w kelwinach), czyli napięcie U_T ma **dodatni** współczynnik cieplny. Zależność tę możemy wykorzystać, jeśli mamy dwa tranzystory, pracujące w jednakowej temperaturze, ale przy różnej gęstości prądu w złączach. W znanym nam lustrze prądowym z **rysunku 9b**, przy różnicy prądu obu tranzystorów ($I_1 \gg I_C$), na rezystorze R_E występuje małe napięcie U_{RE} (do kilkudziesięciu miliwoltów) o dodatnim współczynniku cieplnym. Jeżeli ze wzrostem temperatury napięcie na R_E wzrasta, to wzrasta też prąd I_E . A to oznacza, że zarówno przez R_E , jak też przez R_C , płynie prąd, który ma dodatni współczynnik cieplny (często oznaczany PTAT – *Proportional To Absolute Temperature*). Prąd ten płynie przez rezystor R_C , a więc napięcie U_{RC} ma dodatni współczynnik cieplny. Dobierając odpowiednio prądy oraz R_C/R_E , możemy uzyskać napięcie U_{RC} o **dodatnim** współczynnikowi cieplnym około $+2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, co kompensuje ujemne zmiany cieplne napięcia U_{BE} . Dodając napięcia na U_{RC} i U_{BE} o przeciwnych współczynnikach cieplnych, otrzymujemy niezależne od temperatury napięcie

o wartości około $1,2 \dots 1,25 \text{ V}$. W najprostszym przypadku układ mógłby wyglądać jak na **rysunku 9c**. W rzeczywistości tego rodzaju stabilne źródła napięcia odniesienia są budowane jako układy scalone, by wszystkie tranzystory miały jednakową temperaturę, a dla dalszej poprawy parametrów ich schematy wewnętrzne są znacznie bardziej rozbudowane. **Rysunek 10** przedstawia (nieco uproszczony) schemat wewnętrzny pierwszego scalonego stabilizatora bandgap, czyli układu LM113, a **rysunek 11** pokazuje schematy aplikacyjne wspomnianych już w wykładzie 4, na ilustracji 11, popularnych układów tego typu LM385 oraz regulowanego TL431.

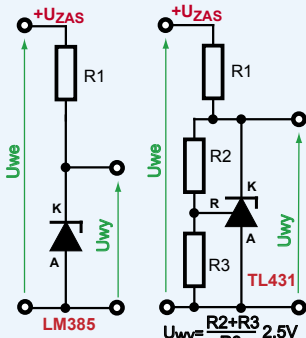
W praktycznej realizacji tytułowego regulatora temperatury konieczne należałoby zastosować tego rodzaju scalone źródła napięcia odniesienia, bowiem układ zrealizowany z pojedynczych elementów na pewno nie będzie miał wymaganej stabilności.

A oto dwa kolejne ważne zagadnienia. Otóż często trzeba mierzyć małe napięcia, występujące na małych rezystancjach na tle dużych napięć, które nas nie interesują.

Układ Kelvina. Aby zmierzyć prąd, z reguły mierzymy spadek napięcia na rezystancji według **rysunku 12** (inną metodą pomiaru prądu jest pomiar za pomocą tzw. czujnika Halla – hallotronu, pola magnetycznego wytwarzanego przez ten prąd wokół przewodu, ale to odrębny, szeroki temat). W powszechnie wykorzystywanym sposobie według **rysunku 12** najlepiej byłoby, gdyby rezystancja pomiarowa R_p była jak najmniejsza i by spadek napięcia



uproszczony schemat wewnętrzny LM113



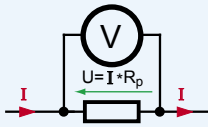
8

9

10

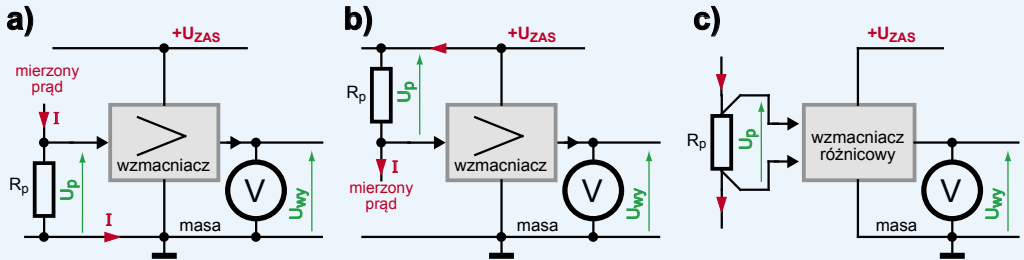
11

12

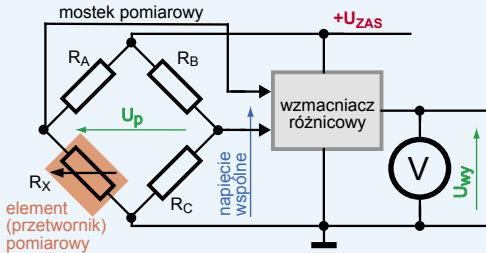


na niej też był jak najmniejszy, by obecność rezystora pomiarowego jak najmniej wpływała na pracę monitorowanego układu. Mając do dyspozycji wzmacniacze, możemy zastosować rezystor R_p o bardzo małej rezystancji i wzmacnić występujące na nim napięcie. Sposób z **rysunku 13a** wydaje

13



14

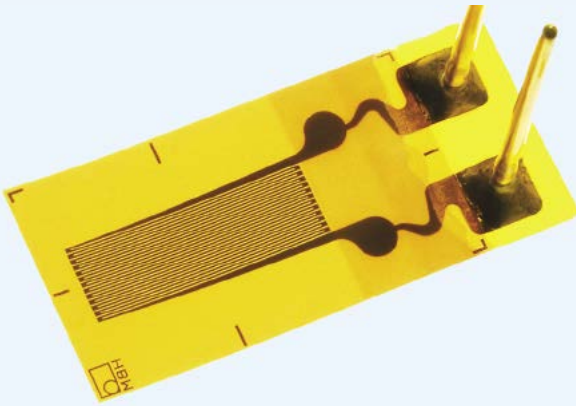


się prosty i oczywisty. Jednak często trzeba mierzyć mały spadek napięcia „od strony plusa” (ang. *high side*), według **rysunku 13b**, a wynik pomiaru ma być dostępny względem masy (miernik dołączony do masy). Ponadto z uwagi na niezerowe rezystancje ścieżek i przewodów, należałoby mierzyć napięcie bezpośrednio na rezystorze pomiarowym R_p , co ilustruje **rysunek 13c**. I to jest koncepcja pomiaru czteropunktowego, zwanego połączeniem Kelvina.

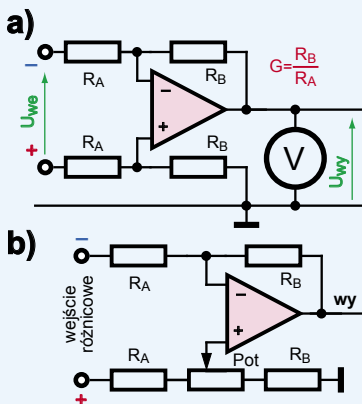
Do takich pomiarów nie wystarczy zwykły wzmacniacz – potrzebny jest **wzmacniacz różnicowy**.

Podobnie zwykły wzmacniacz nie wystarczy do współpracy z różnymi przetwornikami i elementami pomiarowymi, gdzie wzmacnione muszą być małe napięcia stałe i zmienne, występujące na tle dużych napięć stałych. Często takie przetworniki pracują w układzie mostka i współpracują ze wzmacniaczami różnicowymi według **rysunku 14**. W układzie mostkowym pracują na przykład **tensometry**, służące do pomiaru naprężeń. Tensometry (**fotografia 15**) to w istocie rezystory, których rezystancja zmienia się w za-

15

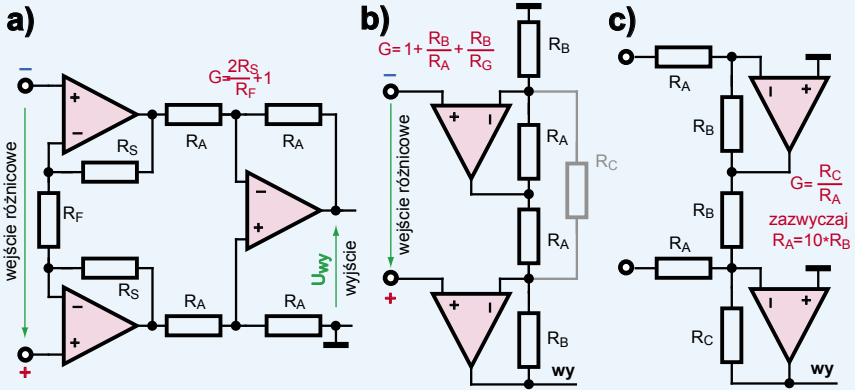


16



leżności od naprężenia (działającej na nie siły i wielkości rozciągnięcia). W takich przypadkach niezbędny jest wzmacniacz różnicowy, który może będzie mierzył wyłącznie małą różnicę napięć między dwoma punktami, a nie będzie reagował na wartość napięcia wspólnego.

Wzmacniacz różnicowy. Sam wzmacniacz operacyjny ze swej natury jest wzmacniaczem różnicowym, czyli reaguje tylko na różnicę napięć, a nie na napięcie wspólne. Jednak wzmacnienie „gołego wzmacniacza operacyjnego” jest ogromne – zdecydowanie zbyt duże do praktycznych zastosowań. Jeżeli chcemy wzmacnić małą różnicę napięć, występującą na tle dużego i zmieniającego się napięcia wspólnego, wtedy można wykorzystać prosty wzmacniacz różnicowy według **rysunku 16a** z dwoma parami identycznych rezystorów (par o identycznym stosunku rezystancji).



W rzeczywistości, z uwagi na rozrzuty tolerancji elementów, dla zrównoważenia układu potrzebny jest niewielki potencjometr, np. według **rysunku 16b**, który wyrównując stosunki rezystancji zapewni znakomite tłumienie zmian napięcia wspólnego.

Taka prosta wersja ma jednak wady i w praktyce często stosuje się „kanoniczną” wersję wzmacniacza różnicowego (pomiarowego) według **rysunku 17a**. Dwie inne konfiguracje pokazane są na **rysunku 17b i 17c**. Ta ostatnia wersja

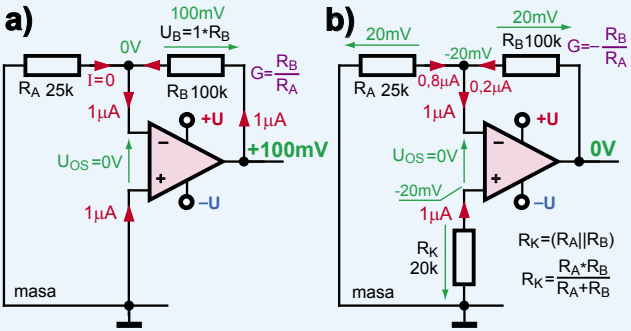
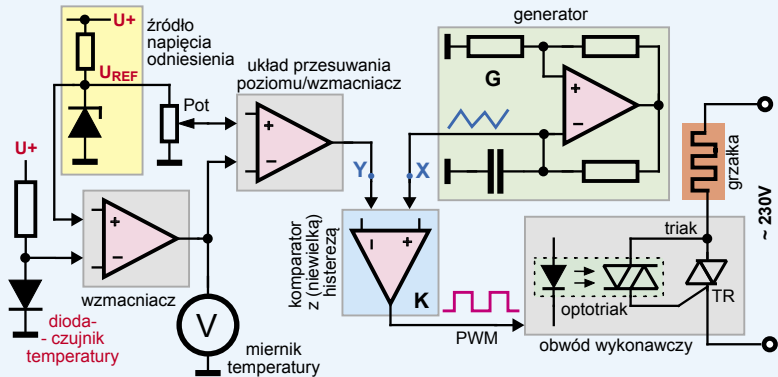
pozwała mierzyć małe różnice napięć, występujące na tle napięć wspólnych przekraczających zakres napięcia zasilania układu, i o ile rezystancje R_A są odpowiednio większe od R_B .

W takich wzmacniaczach pomiarowych, a także we wszelkich innych wzmacniaczach, gdzie wymagana jest dokładność i precyzja, trzeba pamiętać nie tylko o precyzji użytych rezystorów, ale też o takich źródłach błędów, jak napięcie niezrównoważenia i jego dryft cieplny, omawiane w wykładzie 12, a także o pokrewnym problemie wynikającym z niedoskonałości obwodów wejściowych wzmacniaczy operacyjnych.

Otóż w idealnym przypadku prąd wejść wzmacniaczy operacyjnych powinien być równy zeru. Jak już było to sygnalizowane w wykładzie 11 na **rysunku 11b**, prąd wejściowy ma pewną wartość, zwłaszcza we wzmacniaczach z tranzystorami bipolarnymi na wejściach. Prądy wejściowe wywołują znaczące spadki napięć na współpracujących rezystancjach i te spadki napięcia są wzmacniane. Ilustruje to przykład z **rysunku 18a**, dotyczący wzmacniacza operacyjnego o zerowym napięciu niezrównoważenia, ale z prądami wejściowymi o wartości $1 \mu\text{A}$. Właśnie dlatego we wzmacniaczu odwracającym zaleca się dodanie rezystora korekcyjnego R_K w obwodzie wejścia „dodatniego” według **rysunku 18b**. Jego wartość powinna być równa wypadkowej rezystancji równoległego połączenia R_A i R_B .

W bardziej skomplikowanych wzmacniaczach taka korekcja jest trudniejsza, ale problem można ominąć, stosując wzmacniacze o bardzo małym prądzie wejściowym, rzędu pikoamperów.

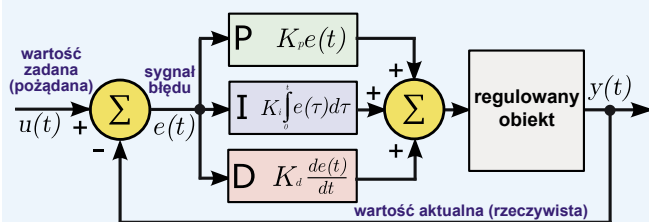
Na koniec wróćmy jeszcze do tytułowego regulatora. Gdybyśmy mieli w zestawie więcej wzmacniaczy operacyjnych, jego schemat blokowy mógłby wyglądać jak na **rysunku 19**. Napięcie z diody – czujnika jest wstępnie wzmacniane



17

18

19



i przesunięte tak, by wzrost temperatury powodował wzrost napięcia, dzięki czemu możemy też za pomocą miernika – woltmierzera na bieżąco monitorować temperaturę. Napięcie wprost proporcjonalne do temperatury jest podawane na układ przesuwania poziomym, gdzie potencjometrem ustawiamy pożądaną temperaturę stabilizacji.

Komparator K porównuje wzmacnione i przesunięte napięcie odpowiadające temperaturze z przebiegiem trójkątnym z generatora. Na wyjściu komparatora otrzymujemy sygnał prostokątny o wypełnieniu zależnym od temperatury. Takie regulatory z płynną regulacją wypełnienia impulsów (PWM) zapewniają zdecydowanie lepszą stabilizację temperatury niż proste regulatory dwustanowe z wykładu 8, ale tylko pod warunkiem, że czas cyklu generatora G będzie znacznie krótszy niż czas nagrzewania i stygnięcia regulowanego obiektu. I tu dochodzimy do istotnego problemu praktycznego: w takim regulatorze płynną regulację uzyskujemy przez częste włączanie i wyłączanie grzałki. Przełączanie następuje tu dużo częściej niż w najprostszym regulatorze dwustanowym, dlatego w takich regulatorach stosuje się trwalsze elementy wykonawcze, najczęściej wspomniane w wykładzie 3 tyrystory i triaki (w układzie z rysunku 19 triak Tr1 sterowany jest za pośrednictwem optotriaka, co zapewnia galwaniczną izolację od sieci energetycznej). Natomiast styki przełącznika mają ograniczoną trwałość i nie wytrzymałyby dłuższej pracy przy pełnym obciążeniu.

W praktyce wykorzystywane są regulatory określane **PID**, które w torze pomiarowym, oprócz wzmacniacza (P), zawierają też odpowiednio dobrane człony: całkujący (I) oraz różniczkujący (D). Temat regulatorów to bardzo obszerna, odrębna dziedzina – ogólna idea systemu z regulatorem PID pokazana jest na **rysunku 20**. Obecność dodatkowego uśredniającego członu całkującego (I) i przyspieszającego członu różniczkującego (D) pozwala poprawić parametry dynamiczne, czyli zmniejszyć błędy regulacji przy zmianach temperatur i szkodliwym wpływie na system innych czynników. O obwodach całkujących i różniczkujących dowiesz się nieco więcej w następnym wykładzie. ■

Piotr Górecki

Organizery i skrzynki narzędziowe



Organizer 5" 134 x 101 x 31mm
6 przegród
OMR5
5,50 zł



Organizer 7" 194 x 140 x 33mm
9 przegród
OMR7
8,00 zł



Organizer 10" 251 x 200 x 44mm
10 przegród
OMR10
12,50 zł

Organizer 340 x 285 x 145mm
18 wyjmowalnych przegród
ORB1
57,00 zł



Organizer 13" 326 x 257 x 48mm
regulowana ilość przegród (3-18)
OMR13
21,00 zł



Skrzynka narzędziowa 25" FIREBIRD
aluminiowa rączka, udźwieg 27 kg
N25RPA
96,50 zł