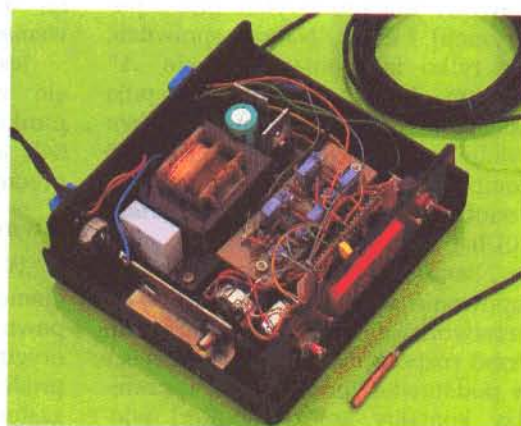


Prezentujemy kolejny odcinek opisu termometru-regulatora.

Przedstawiony w poprzednich numerach EP termometr można rozbudować, otrzymując regulator.

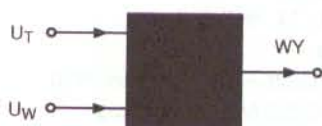
# Termometr -regulator, cz. 3

## kit AVT-104



### Sposób regulacji

Ogólnie biorąc, moduł regulatora porównuje wartość bieżącą z wartością zadaną i sygnał wyjściowy zależy od tego porównania. W uproszczeniu, możemy to przedstawić jako „skrzynkę” z dwoma wejściami i jednym wyjściem (rys. 1). W naszym przypadku sygnałem wejściowym jest napięcie proporcjonalne do temperatury ze współczynnikiem  $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ , co daje, dla przykładowej temperatury  $-12^\circ\text{C}$  wartość  $-120\text{mV}$ , a dla  $+82^\circ\text{C}$  -  $+820\text{mV}$ . Na wejście  $U_T$  jest podany sygnał z przetwornika temperatura/napięcie, na wejście  $U_W$  napięcie odpowiadające temperaturze, jaką chcielibyśmy otrzymać. Co jest na wyjściu? W naszym przypadku wybraliśmy regulację dwustanową, więc jest to „+” lub „-” zasilania. Wynika to ze stosowania do sterowania grzałek stycznika i przekaźnika. W innych rozwiązaniach może być to sygnał do



Rys. 1.

sterowania fazowego tyrystora lub triaka.

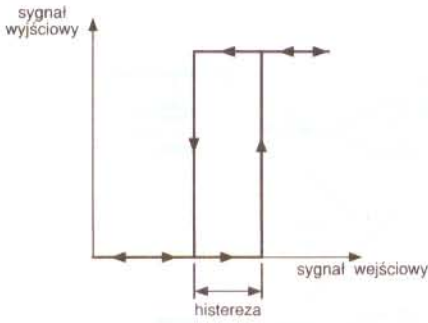
Dlaczego nie zastosowano takiego fazowego sterowania triaka? Dokładność regulacji mogłaby być wtedy dużo większa, ale w praktycznych zastosowaniach wahania stabilizowanej temperatury w granicach  $2...3^\circ\text{C}$  nie stanowią problemu. Ponadto, sterowanie fazowe (otwieranie triaka lub tyrystora tylko na część półokresu sieci) wiąże się z wytwarzaniem zakłóceń sieciowych, co przy mocach kilku lub kilkudziesięciu kW stanowi spory problem. Przedstawione rozwiązanie umożliwia natomiast tzw. grupowe sterowanie triaka, to znaczy włączanie i wyłączanie na określoną liczbę okresów sieci. Dlaczego zastosowano stycznik? Przy mocy obciążenia do ok.  $3,5\text{kW}$  można od biedy używać samego przekaźnika (RM81-16A). Przy większych mocach oraz przy obciążeniu trójfazowym używa się styczników. W naszych warunkach stosowanie styczników jest prostsze i pewniejsze. Iluż to domorosłych elektryków „grzebiąc” w maszynie pod napięciem powoduje zwarcie. W przypadku stycznika zadziała bezpiecznik w instalacji i nic poza tym się nie stanie. Struktura triaka w takiej sytuacji z całą pewnością

uległaby uszkodzeniu, ponieważ odporność jej jest dużo mniejsza niż typowego bezpiecznika sieciowego. Należałoby zastosować specjalne bezpieczniki do półprzewodników. Triaki i ich zabezpieczenia omówimy kiedyś dokładniej w Notatniku Praktyka.

Jeśli mamy pewność, że nikt niepowołany nie będzie dotykał naszego układu, możemy zastosować triaki. Należy się jednak liczyć z koniecznością stosowania radiatora - co jest związane z nieuniknionymi stratami na triaku. Do galwanicznego oddzielenia regulatora od triaka należy użyć optotriaków. Lepsze są w tym przypadku wersje z tzw. „złączeniem w zerze sieci” (np. MOC3040), co minimalizuje zakłócenia przy przełączaniu.

### Opis układu

Podstawowym elementem układu regulatora jest wzmacniacz różnicowy. W zależności od cech obiektu sterowanego można wprowadzić dodatkowe modyfikacje charakterystyki takiego wzmacniacza. Obszerne omówienie tego tematu można znaleźć w licznych podręcznikach szkolnych w dziale automatyki. Intuicyjnie wyczuwa się, że regulator do dużego komorowego pieca o masie kilkuset kilogramów będzie



Rys. 2.

inny niż regulator do grzejniczka elektrycznego w łazience (np. popularnej „farelki”).

Oczywiste jest, że zwiększenie wzmocnienia takiego wzmacniacza wiąże się ze zmniejszeniem błędu regulacji. Istotna jest także bezwładność cieplna, moc zainstalowanych grzałek, wahania temperatury zewnętrznej. Jest to bardzo złożone zagadnienie. Do naszych celów przyjmujemy, że wymagania nie będą zbyt wysokie. W związku z tym w module regulatora zastosowano układ proporcjonalny, bez elementów całkujących czy różniczkujących.

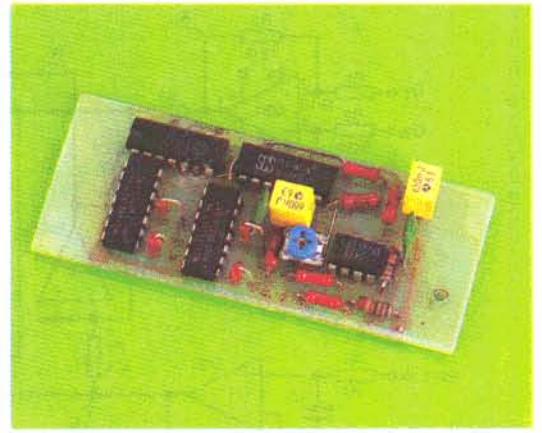
W układach wymagających dokładnego utrzymania temperatury należałoby dopasować charakterystykę regulatora do charakterystyki obiektu regulacji. Oprócz problemu dopasowania charakterystyk ważną sprawą jest zabezpieczenie przed drganiami styków. Gdy układ ma duże wzmocnienie, a w sygnale pomiarowym występują indukujące się wszędzie pasożytnicze przebiegi zakłócające, wtedy dla wartości temperatury bliskiej temperaturze nastawionej mogą wystąpić drgania i pulsowanie styków. Wyobraźmy sobie stycznik sterujący obciążeniem kilkudziesięciu kW, który łapie i puszcza kilka razy na sekundę. Aby ustrzec się tego stosuje się układ z dodatnim sprzężeniem zwrotnym (histerezą). **Rysunek 2** pokazuje przykładową charakterystykę takiego układu. Widać, że jest różnica między poziomem sygnału włączającego i wyłączającego. W naszym przypadku możemy mówić o temperaturze włączenia i wyłączenia. Gdy wyłączenie grzałek następuje przy 82°C, a włączenie przy 78°C mówimy, że histereza wynosi 4°C. Nie ma sensu zmniejszać histerezy regulatora poniżej 1°C. W praktycznych układach dojdzie jeszcze bezwładność obiektu i wahania rzeczywistej temperatury będą nieco większe. Przedstawia to **rys. 3**.

Nawet zmniejszenie histerezy do zera (co jest możliwe także w naszym regulatorze) nie zmniejszy do zera wahań stabilizowanej temperatury.

Aby stabilizacja była lepsza należy częściej, lecz na krótko, włączać grzałki, a regulator powinien wręcz „przewidywać”, na ile te grzałki włączać.

W stanie ustalonym jest to wykonalne, w praktyce jednak występują różne czynniki zakłócające (jak np. zmiana temperatury zewnętrznej), co stwarza duże trudności w precyzyjnej regulacji. W układach praktycznych tego typu istnieje zazwyczaj możliwość regulacji wielkości histerezy. Używa się także układów monostabilnych, aby przy przełączaniu zapobiec kilkukrotnemu złapaniu i puszczeniu przełącznika.

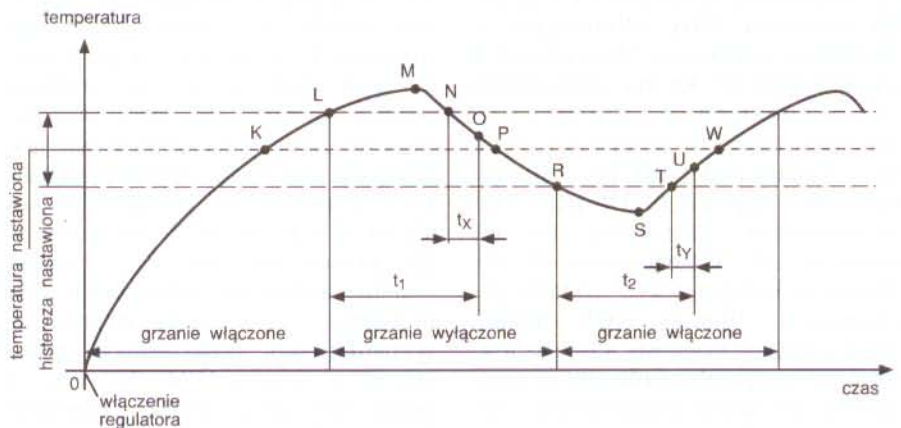
Na **rys. 4** przedstawiono schemat elektryczny układu. Układ scalony US1 to pojedynczy wzmacniacz operacyjny, pracujący jako wzmacniacz różnicowy. Do wejścia UT jest doprowadzony sygnał z przetwornika T/U, a do wejścia UW napięcie odpowiadające żądanej temperaturze. Rezystancja wejścia UW wynosi prawie 130kΩ (szeregowe połączenie R3, R4), natomiast wejścia UT - tylko 6,19kΩ (R1). Taki układ pozwala na zadawanie temperatury z elementu o dużej rezystancji wewnętrznej (np. z potencjometru). Wzmocnienie układu z US1 wynosi ok. 20x. W punkcie A otrzymujemy więc napięcie błędu o współczynniku ok. 200mV/deg. Oznacza to, że w przypadku równych napięć UT i UW w punkcie A napięcie wynosi 0V, niezależnie od wartości



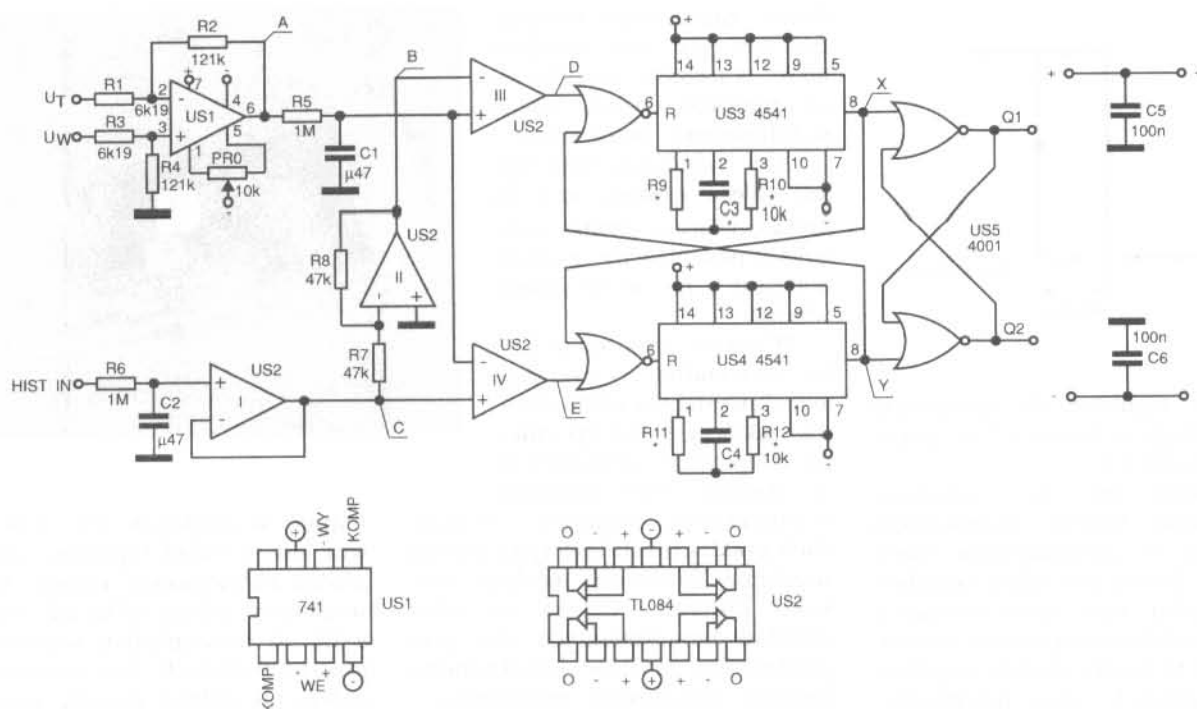
napięć w punktach UT, UW. Zatem jest to układ typowego wzmacniacza różnicowego, którego sygnał wyjściowy zależy tylko od różnicy, a nie od bezwzględnej wartości napięcia na wejściach. Aby to otrzymać, należy tak dobrać stosunki rezystancji, aby  $R2/R1=R4/R3$ .

Dla zastosowań precyzyjnych należy także zastosować potencjometr montażowy PR1 do korekcji zera (kompensacji napięcia niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnego). Do typowych aplikacji PR nie jest potrzebny, a jako R1...R4 można użyć zwykłych rezystorów MŁT 5% bez specjalnego doborzenia.

W punkcie A otrzymamy więc mniej lub bardziej dokładne napięcie określające, na ile temperatura rzeczywista różni się od nastawionej. Do tego punktu można więc przy dalszej rozbudowie dołączyć miernik. Może to być wskazówkowy przyrząd z zerem na środku skali lub można przez dzielnik 1:20 podać to napięcie na wejście naszego układu wyświetlacza. Wskaźniki takie stosuje się w niektórych produkowanych re-



Rys. 3.



Rys. 4.

w niektórych produkowanych regulatorach.

Dodatkowe wejście HIST IN służy do ustawiania wielkości histerezy. Można było zrobić prostszy układ ustawiania histerezy, takie rozwiązanie jest jednak najbardziej elastyczne - np. umożliwia cyfrowe zadawanie tak temperatury, jak i wielkości histerezy. Czulość wejścia HIST IN wynosi  $+100\text{mV/deg}$ , co oznacza, że aby otrzymać np. histerezę  $3^\circ\text{C}$ , należy ustawić  $U_{\text{HIST IN}} = 300\text{mV}$ . Napięcie podane na HIST IN musi być dodatnie, natomiast napięcie UW może mieć dowolną biegunowość, choć praktycznie temperatury ujemne reguluje się rzadko. Wzmacniacze operacyjne I-IV to począwszy od układu TL084. Wzmacniacz I jest buforem zapewniającym dużą rezystancję wejściową. Elementy C1, C2, R5, R6 stanowią filtry eliminujące ewentualne zakłócenia. Wzmacniacz II z rezystorami R7, R8 ma wzmacnienie  $-1$ . W punktach B i C otrzymujemy więc napięcia dodatnie i ujemne o wartości  $\pm U_{\text{HIST IN}}$ . Zauważmy, że napięcie  $|U_B - U_C|$  ma współczynnik  $200\text{mV/deg}$ , tak jak napięcie UA. Wzmacniacze III i IV stanowią komparatory - układy porównujące. Bramki NOR układu 4001 i układy czasowe 4541 zapewniają, że po przełączeniu układ może wrócić do stanu poprzedniego dopiero po upływie czasu ustalonego w układach 4541. Zabezpiecza to

całkowicie przed niekontrolowanymi drganiami styków przekaźnika i stycznika.

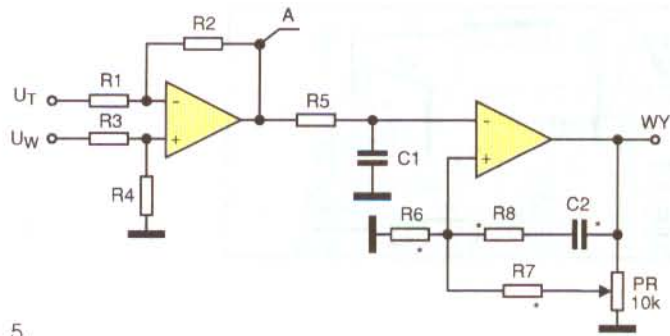
Założmy dla uproszczenia, że ustawiliśmy histerezę  $10^\circ\text{C}$ , zatem  $U_{\text{HIST IN}} = U_C = 1\text{V}$ , a  $U_B = -1\text{V}$ . Rozpocznijmy analizę od chwili, gdy temperatura rzeczywista jest równa zadanej i grzałka jest włączona (na rys. 3 punkt K). Temperatura rośnie, napięcie  $U_T$  również, a napięcie w punkcie A spada poniżej potencjału masy. Gdy napięcie UA jest w zakresie  $\pm 1\text{V}$ , na wyjściach komparatorów III i IV (punkty D, E) jest napięcie dodatnie - stan logiczny wysoki H. Na wyjściach układów czasowych (punkty X, Y) w stanie spoczynku jest stan niski L. Wzrost temperatury spowoduje spadek napięcia w p. A poniżej  $-1\text{V}$ . W punkcie D napięcie opadnie wtedy do stanu logicznego niskiego L. Ponieważ w p. Y także jest stan niski, na wyjściu bramki pojawi się stan wysoki. Stan ten podany na wejście zerujące R (reset) zatrzyma oscylator układu US3 i spowoduje pojawienie się stanu H w punkcie X. Na wyjściu Q1 pojawi się stan L - grzanie zostanie wyłączone. Jednocześnie stan H z wyjścia X utrzyma w każdym wypadku stan L na wejściu zerującym R układu US4. Na rys. 3 punkt wyłączenia grzałki oznaczono literą L. Temperatura czujnika temperatury wzrasta jeszcze w związku

z bezwładnością obiektu, osiągając maksimum w punkcie M. Później temperatura zaczyna spadać, czyli napięcie w p. A zaczyna rosnąć. W momencie przekroczenia napięcia błędu  $-1\text{V}$  wyjście komparatora III (punkt D) wraca do stanu H (na rys. 3 punkt N). Powoduje to zdjęcie stanu H z wejścia R układu US3. Zaczyna pracować oscylator US3 i przez czas  $32,768$  okresów oscylatora (zależny od C3, R9, R10) na wyjściu X utrzymuje się jeszcze stan H (czas  $t_x$  na rys. 3). Po odliczeniu tych  $32,768$  taktów oscylator pracuje dalej, ale na wyjściu X pojawia się stan niski. Zauważmy, że przez czas, gdy X jest w stanie H (czas  $t_1$ ) sygnał z punktu E nie może przechodzić na wejście R układu US4. Gdyby więc nawet w punkcie E pojawiły się impulsy ujemne wynikające z zakłóceń lub dużej czułości układu przy zerowej histerezie, nie spowoduje to zmiany stanu wyjściowego przez cały czas  $t_1$ . Widzimy więc, że elementy oscylatorów obydwu układów 4541 należy dobierać do konkretnego zastosowania w zależności od bezwładności obiektu. Zapobiegają one częstemu niepotrzebnemu przełączaniu, a więc wypalaniu się styków.

Wróćmy do analizy układu. Temperatura dalej spada, napięcie UA rośnie. W chwili P (rys. 3)  $U_A = 0$ , a w momencie R  $U_A = +1\text{V}$ , zatem w punkcie E pojawi się stan L.

(w momencie O) do stanu niskiego, zatem na wejściu R układu US4 pojawi się stan H - wyjście Y przejdzie w stan wysoki. Spowoduje to ustawienie Q2=L i Q1=H, więc grzanie zostanie włączone. Ciepło grzałki nie może natychmiast przejść do czujnika temperatury, stąd temperatura jeszcze nieco opadnie do minimum w p. S. Następnie temperatura zacznie rosnąć. W momencie T nastąpi powrót punktu E do stanu H. Zdjęcie stanu wysokiego z wejścia zerującego US4 uruchomi oscylator i znów po 32,768 taktach oscylatora wyjście Y zmieni stan na niski (moment U). Przez cały czas, gdy Y=H, zablockowane są ewentualne impulsy z punktu D. Przez cały czas t2 (rys. 3) ewentualne zakłócenia nie mogą zmienić stanu wyjść Q1, Q2. Grzałki są włączone, temperatura rośnie, cykl się powtórzy.

W tym miejscu powstaje pytanie, dlaczego wybrano tak skomplikowany układ. Cały układ regulatora można również wykonać wg schematu pokazanego na rys. 5, na jednym podwójnym wzmacniaczu o-



Rys. 5.

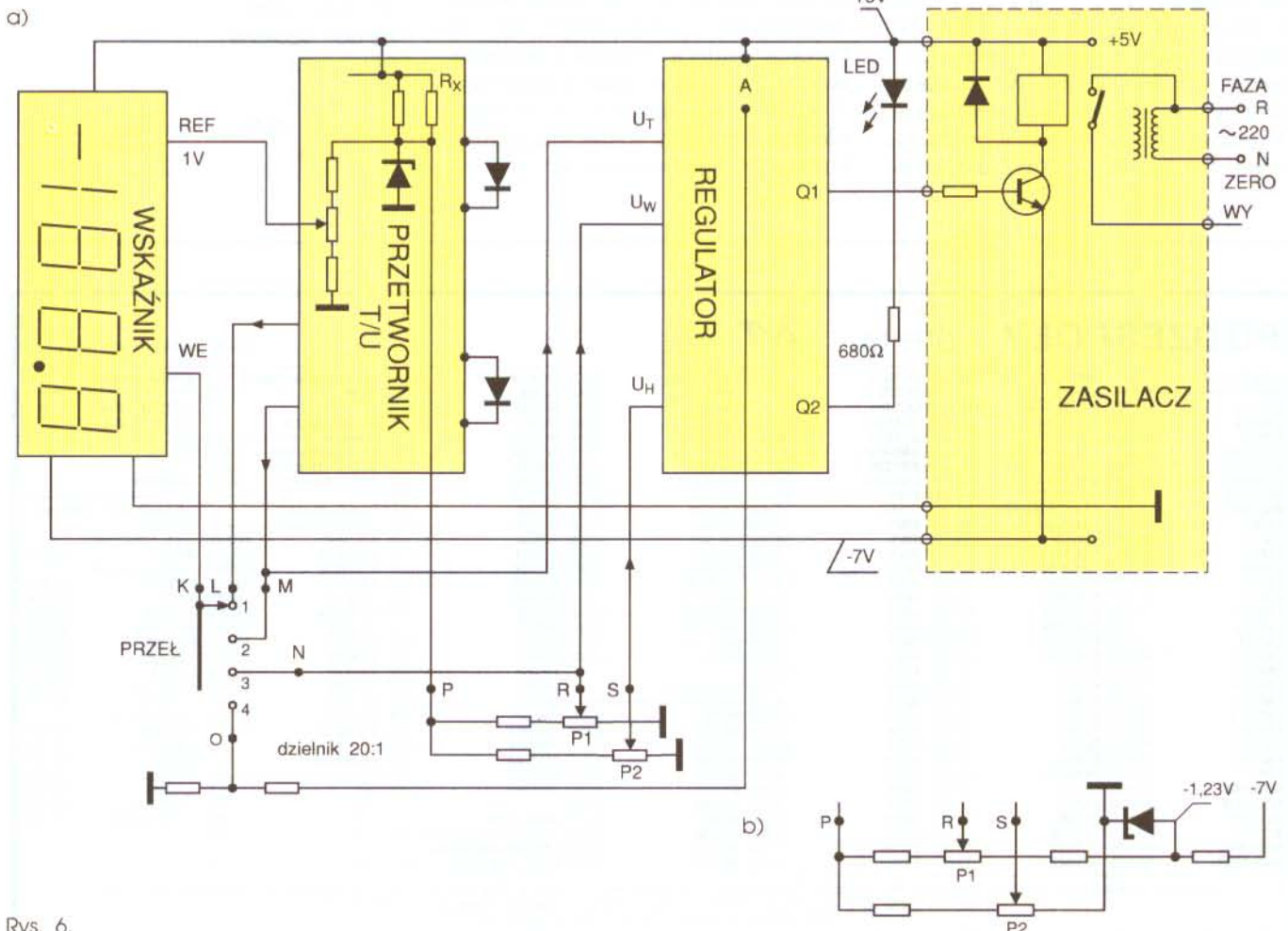
peracyjnym. W tym rozwiązaniu elementy R6, R7, PR decydują o wielkości histerezy. Kondensator C1 z rezystorami R8, R6 powodują, że po przełączeniu histereza przez pewien czas jest jeszcze głębsza, co zapobiega drganiom na wyjściu, gdy napięcie w p. A waha się lub zawiera zakłócenia.

Można także na oddzielnej płycie wykonać rozbudowany układ wzmacniacza z charakterystyką PID, który jeszcze bardziej dopasuje parametry regulacji do konkretnego obiektu. Wejście i wyjście takiego wzmacniacza należy włączyć zamiast rezys-

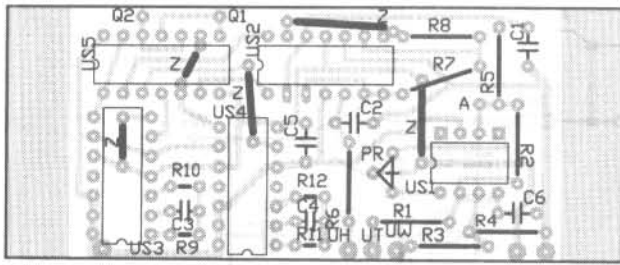
torą R5 (C1 usunąć). Ponieważ w wersji pierwotnej układ był przewidziany do sterowania dużymi mocami, optymalny okazał się taki właśnie układ regulacji dwustanowej.

Wybrano jednak układ przedstawiony na rys. 4, ponieważ jest bardziej elastyczny; daje możliwość zdalnego lub programowego ustawienia parametrów i można go łatwo dopasować do wielu typowych obiektów.

W typowym układzie aplikacyjnym regulatora należy korzystać z rys. 6. Ponieważ zwykle stabilizu-



Rys. 6.



Rys. 7.

jemy temperatury dodatnie, można wykorzystać napięcie wzorcowe układu D1 z płytki przetwornika T/U, dodając tylko rezystor RX, dostarczający tyle prądu, ile potrzeba do obwodu potencjometrów regulacji temperatury i histerezy P1 i P2 (jest to prąd Ix). Przy napięciach na potencjometrach P1, P2 równych 1V otrzymamy zakresy regulacji 0...100°C oraz histerezę 0...10°C. Jeśli regulacja ma obejmować temperatury ujemne, należy dołączyć potencjometr P1 do źródła napięć ujemnych, np. wg rys. 6b.

W pozycji 1 przełącznika PRZEŁ mierzymy temperaturę pierwszą z czujek pomiarowych. W pozycji PRZEŁ 2 mierzymy temperaturę, którą będziemy stabilizować. W pozycji 3 możemy odczytać na wyświetlaczu nastawioną temperaturę stabilizacji. W pozycji 4 wyświetlacz pokazuje odchyłkę od temperatury nastawio-

nej, tyle że z przeciwnym znakiem. Fotografie na początku artykułu pokazują regulator z trzypozycyjnym przełącznikiem. Oczywiście układ można uprościć, rezygnując z bloku wyświetlacza. Należy wtedy nanieść skalę przy potencjometrach P1, P2.

### Montaż i uruchomienie

Mozaika ścieżek płytki drukowanej jest pokazana na wkładce, zaś rozmieszczenie elementów na rys. 7.

Montaż należy wykonać wg ogólnych zasad, pamiętając o wykonaniu na początku pięciu zwor oznaczonych Z. W wykonaniu dokładnym należy dobrać pary rezystorów R1+R3, R2+R4, R7+R8. Jeżeli będzie zmontowany potencjometr PR do korekcyjnej napięcia niezrównoważenia, należy połączyć ścieżkę z końcówką 5 układu scalonego US1 (Uwaga: niektóre inne typy wzmacniaczy mają końcówki kompensacji nr 1 i 8).

Uruchamianie należy rozpocząć od kontroli pracy układów analogowych. Układ scalony US5 można wzlutować na samym końcu, sprawdzając uprzednio pracę układów czasowych US3 i US4.

Elementy dobierane zależą od bezwładności cieplnej układu. Czas impulsu wyjściowego wynosi w przybliżeniu  $t [s] = 50.000 \times R \times C [M\Omega \mu F]$ .

Czas ten powinien być kilkakrotnie krótszy od stałej czasowej obiektu (patrz rys. 3).

**Piotr Górecki, AVT**

### WYKAZ ELEMENTÓW

#### Rezystory

R1, R3: 6,9kΩ  
R2, R4: 121kΩ  
R5, R6: 1MΩ  
R7, R8: 47kΩ  
R9, R11: dobierany  
R10, R12: 10kΩ, dobierany  
PR0: 10kΩ

#### Kondensatory

C1, C2: 47μF  
C3, C4: dobierany  
C5, C6: 100nF

#### Układy scalone

US1: LM741  
US2: TL084  
US3, US4: 4541  
US5: 4001