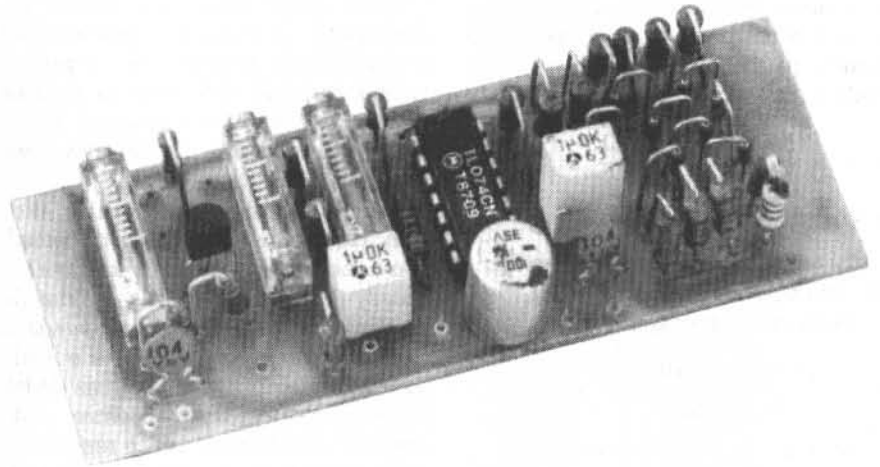


Termometr z czujnikiem platynowym Pt-100

kit AVT-147

Moduły uniwersalnego termometru-regulatora cieszą się dużym powodzeniem w sieci handlowej AVT. Górny zakres mierzonych temperatur przetwornika z tego zestawu wynosi tylko +120 °C.

Przedstawiamy przetwornik temperatury wykorzystujący czujnik platynowy Pt100, który pozwala mierzyć temperatury do +200...+600 °C.



Platynowy czujnik temperatury jest w rzeczywistości zwykłym rezystorem drutowym, tyle że wykonanym z cienkiego drutu platynowego umieszczonego w ceramicznym korpusie. Typowy czujnik Pt100 ma w temperaturze 0°C rezystancję 100Ω. Platyna, jak każdy metal, ma dodatni współczynnik temperaturowy, cały problem polega jednak na tym, że zależność rezystancji od temperatury nie jest ściśle liniowa. Z wystarczającą dla praktyków dokładnością można powiedzieć, że rezystancja metalowego opornika w funkcji temperatury wyraża się wzorem:

$$R_T = R_0 (1 + A \cdot T + B \cdot T^2)$$

gdzie:

T - temperatura [°C]

R_T - rezystancja w temperaturze T [°C]

R_0 - rezystancja w temperaturze 0°C (nominalna)

A, B - współczynniki (dla platyny A=3,90802x10⁻³; B=-5,802x10⁻⁷)

Jeśli czujnik ma być zastosowany w termometrze z odczytem cyfrowym, to najprawdopodobniej trzeba będzie zastosować układ linearyzacji charakterystyki. Nasz moduł jest wyposażony w skuteczny układ linearyzacji, ale nie zawsze trzeba go montować.

Po pierwsze - w termometrach pracujących w wąskim przedziale temperatur, np. +200...+250°C, linearyzacji nie trzeba przeprowadzać. Liniową kalibrację należy wykonać dla obu skrajnych temperatur zakresu wiedząc, że wskazania dla temperatur spoza tego zakresu obciążone będą pewnym błędem.

Po drugie - bardzo często w praktyce optymalne temperatury danego procesu technologicznego dobiera się doświadczalnie. Zwykle ważna jest powtarzalność, a nie dokładność bezwzględna. W wielu przypadkach można się zdecydować na układ bez linearyzacji mając świadomość, że danemu wskazaniu

na wyświetlaczu odpowiada temperatura nieco inna (wyższa lub niższa) w zależności od wyboru punktów kalibracji.

Tabela 1 pozwala w prosty sposób określić rezystancję czujnika Pt100 w różnych temperaturach. Wartości pośrednie dla temperatur dodatnich można obliczyć z podanego wcześniej wzoru.

Dokładność wykonania rezystancji nominalnej 100Ω w temperaturze 0°C, w zależności od klasy czujnika, wynosi ±0,06...0,2Ω, co oznacza błąd ±0,15...0,5°C. Dopuszczalna odchyłka wzrasta z temperaturą i dla +600°C wynosi odpowiednio ±0,43...1,12Ω (±1,35...3,5°C).

Tab. 1. Charakterystyka rezystancja-temperatura czujnika Pt100

-100	0	°C	0	100	200	300	400	500	600	700	800
60,28	100,00	0	100,00	138,50	175,83	212,00	247,03	280,91	313,60	345,08	375,32
56,21	96,09	±10	103,90	142,29	179,50	215,56	250,47	284,23	316,80	348,16	378,27
52,12	92,16	±20	107,80	146,06	183,15	219,10	253,90	287,54	319,99	351,23	381,21
48,01	88,23	±30	111,68	149,82	186,80	222,63	257,32	290,84	323,17	354,29	384,14
43,88	84,29	±40	115,54	153,57	190,44	226,15	260,72	294,13	326,34	357,33	387,06
39,72	80,32	±50	119,40	157,31	194,06	229,66	264,11	297,40	329,49	360,36	389,96
35,54	76,34	±60	123,24	161,04	197,67	233,16	267,50	300,67	332,64	363,38	
31,34	72,35	±70	127,07	164,75	201,27	236,64	270,87	303,92	335,77	366,38	
27,11	68,34	±80	130,89	168,45	204,86	240,12	274,22	307,16	338,89	369,37	
22,83	64,32	±90	134,70	172,15	208,44	243,58	277,57	310,38	341,99	372,35	
18,56	60,28	±100	138,50	175,83	212,00	247,03	280,91	313,60	345,08	375,32	

Obliczmy teraz błędy układu bez linearyzacji, kalibrowanego w dwóch punktach. Nasz moduł dołączymy do cyfrowego wskaźnika z układem ICL 7107 (AVT-104/2).

Przykład pierwszy

Dwupunktową kalibrację wykonujemy dla temperatur 0°C i 100°C.

Dla tych dwóch temperatur wskazanie jest prawidłowe. Liniowy współczynnik przetwarzania rezystancji liczony na °C wynosi, jak wynika z tabeli 1:

$$\alpha = \frac{(138,50 - 100)\Omega}{100^\circ\text{C}} = 0,385 \Omega/^\circ\text{C}$$

W temperaturze +50°C rezystancja czujnika wyniesie 119,4Ω.

Wskazanie przyrządu będzie:

$$N = \frac{(119,4 - 100)\Omega}{0,385 \Omega/^\circ\text{C}} = 50,4^\circ\text{C}$$

Błąd w zakresie 0...+100°C nie przekroczy więc 0,4°C.

Przykład drugi

Dwupunktową kalibrację przeprowadzamy dla temperatur 0°C i +600°C.

Współczynnik przetwarzania wyniesie:

$$\alpha = \frac{(313,60 - 100)\Omega}{600^\circ\text{C}} = 0,356 \Omega/^\circ\text{C}$$

Największej odchyłki spodziewamy się w środku tego zakresu, dla temperatur ok. +300°C.

Czujnik Pt100 ma w temperaturze +300°C rezystancję 212,0Ω. Wskazanie wyniesie wtedy:

$$N = \frac{(212,00 - 100)\Omega}{0,356 \Omega/^\circ\text{C}} = 314,6^\circ\text{C}$$

Dla temperatur bliskich +300°C wskazanie będzie zawyżone o kilkanaście stopni.

Rezystancja doprowadzeń

Kolejnym problemem przy stosowaniu czujników platynowych jest rezystancja doprowadzeń. Ponieważ wielkością mierzoną jest rezystancja czujnika, więc jeśli czujnik jest znacznie oddalony od miernika i zastosowano cienkie przewody, to rezystancja przewodów (i jej zmiany z temperaturą) zafałszują wynik pomiaru. Według normy PN-88 M-53858

przekrój żył przewodów łączeniowych powinien być nie mniejszy niż 1mm² (w niektórych przypadkach dopuszcza się 0,5mm²).

Jeżeli dołączy się czujnik do miernika przy pomocy dwużyłowego przewodu ekranowanego o przekroju jednej żyły 0,1mm² i długości 10m, wówczas rezystancja przewodów wyniesie 3,4Ω.

Jeśli zatem termometr będzie kalibrowany z krótkimi przewodami o pomijalnej rezystancji, a potem czujnik zostanie dołączony za pomocą takiego przewodu o rezystancji rzędu 3,4Ω, to wskazanie będzie zawyżone o około 9°C!

W przypadku stosowania długich przewodów łączeniowych przedstawione źródła błędów konieczne należy wziąć pod uwagę. Właśnie z uwagi na rezystancję doprowadzeń często w praktyce stosuje się linie trzy- lub czteroprzewodowe oraz dodatkowe rezystory wyrównawcze. Taki rezystor wyrównawczy, o rezystancji 10Ω, wykonany jest przez nawinięcie pewnej ilości drutu oporowego na małą szpuleczkę. W trakcie instalacji czujnika Pt100, w zależności od długości przewodów łączeniowych, należy z rezystora wyrównawczego odwinąć stosowną ilość drutu oporowego tak, aby sumaryczna rezystancja doprowadzeń i rezystora wyrównawczego wynosiła 10Ω.

W naszym układzie nie przewidziano tego rodzaju wieloprzewodowych połączeń ani rezystora wyrównawczego (choć można go oczywiście zastosować) - czujnik dołączony jest przy pomocy linii dwużyłowej. Dla uniknięcia błędów kalibrację należy po prostu przeprowadzić z użyciem tego odcinka przewodu, który rzeczywiście zostanie zastosowany.

Inne rezystancyjne czujniki temperatury

Oprócz bardzo dobrych, ale i droższych, czujników platynowych stosuje się niekiedy czujniki niklowe i miedziane. Niestety mogą one pracować tylko w zakresie temperatur co najwyżej do +180°C, stąd ich niewielkie znaczenie.

Zależność rezystancji miedzi od temperatury jest często stosowana w praktyce do określania temperatury pracujących uzwojeń (silników, transformatorów). Rzeczywiście, najprościej jest zmierzyć temperaturę wewnątrz uzwojenia przez porównanie jego rezystancji w temperaturze pokojowej i po nagraniu. Sposób ten

warto zapamiętać, może on kiedyś okazać się przydatny także w praktyce amatorskiej.

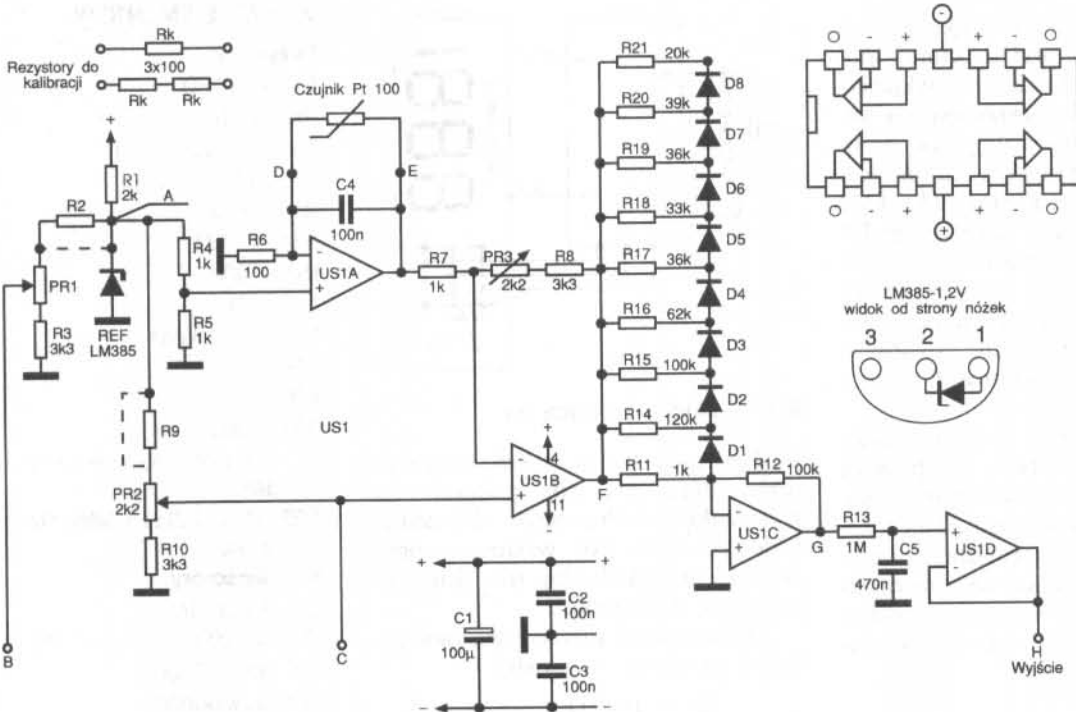
Opis układu

Schemat elektryczny modułu przetwornika temperatura/napięcie z wykorzystaniem czujnika Pt100 jest pokazany na rysunku 1.

Układ scalony REF jest źródłem napięcia odniesienia. Ponieważ moduł jest przeznaczony do współpracy z modułami uniwersalnego termometru/regulatora (zestawy serii AVT-104), przewidziano wyjście napięcia wzorcowego 1,000V (punkt B) dla wskaźnika AVT-104/2 lub 104/3. Przewidziano miejsce na rezystory R2 i R9, ale prawie nigdy nie będą one potrzebne (chyba, że ktoś zastosuje potencjometry o znacznie mniejszej rezystancji), dlatego ich pola lutownicze są zwarte odcinkami ścieżek. Dzielnik z dwóch jednakowych rezystorów R4, R5 ustala napięcie na wejściach wzmacniacza operacyjnego US1A równe połowie napięcia odniesienia (ok. 0,62V). R6 decyduje o wartości prądu płynącego przez czujnik Pt100 (0,62V/100Ω = 6,2mA). Nie należy zwiększać tego prądu, aby uniknąć błędów wynikających z samopodgrzewania czujnika. Dużo mniejsze wartości tego prądu też nie są korzystne - ewentualne zakłócenia mogą mieć wartość zbliżoną do wartości sygnału pomiarowego. Do odfiltrowania zakłóceń zmiennoprądowych służą elementy C4, R13 i C5 wraz z wtórnikiem US1D.

Ponieważ przez czujnik płynie prąd ok. 6,2mA, a czułość czujnika dla temperatur bliskich zeru wynosi ok. 0,388Ω/°C więc w punkcie E uzyskamy czułość przetwarzania w przybliżeniu 2,3mV/°C. Dla prawidłowego działania obwodów linearyzacji potrzebna jest większa czułość przetwarzania, dlatego wprowadzono wzmacniacz US1B o wzmocnieniu ok. 4,3 w celu osiągnięcia w punkcie F czułości ok. 10mV/°C. Potencjometr PR2 pozwala uzyskać w punkcie F napięcie 0V dla temperatury 0°C, a PR3 decyduje o czułości przetwarzania.

Zwróćmy tu uwagę, że gdy napięcie odniesienia wyniesie 1,23V (typowa wartość dla LM385 w wersji 1,2V), to „przy okazji“, przy podanych założeniach, otrzymamy w punkcie C napięcie bardzo bliskie wartości 1V. W typowych za-



Rys. 1. Schemat elektryczny miernika temperatury

stosowaniach właśnie to napięcie będzie napięciem odniesienia dla wskaźnika ICL7107, dlatego zestaw AVT-147 nie zawiera R2, R3, PR1 i R9.

W zakresie 0...+50°C, czułość przetwarzania wynosi 0,388Ω/°C, my zaś chcemy uzyskać w punkcie F -10mV/°C, dlatego przy pomocy PR3 należy ustawić czułość -25,773mV/Ω. W temperaturze +600°C rezystancja czujnika Rt wyniesie 313,6Ω, co da w punkcie F napięcie:

$$U = (313,6 - 100)\Omega \cdot (-25,7773 \text{ mV}/\Omega) = -5,5 \text{ V}$$

Stosując zasilacz AVT-104/Z o napięciach +5V, -7V możemy w takiej sytuacji, ze względu na wyjściowe napięcie nasycenia US1B, mierzyć temperatury do ok. +600°C. Teoretycznie czujnik Pt100 może pracować do ponad +800°C, jednak do pomiaru takich temperatur należałoby zmienić wartości elementów.

Jako wskaźnik stosujemy ICL7107 z wyświetlaczem 3,5 cyfry, więc dla temperatur powyżej +200°C uzyskamy rozdzielczość wskaźnika 1°C. Stosując napięcie odniesienia ICL7107 równe 1V, powinniśmy dla temperatur 0...+600°C podać na wejście pomiarowe ICL7107 napięcie 0...+600mV. W naszym module realizuje to US1C. Dla temperatur do +50°C napięcie w punk-

cie F nie przekracza 500mV, nie przewodzi więc żadna z diod D1...D8. Wzmocnienie ustalone jest stosunkiem R12 do R11 i wynosi -0,1. Dla tego zakresu temperatur czułość przetwarzania wynosi 2,5773mV/Ω, co daje na wyjściu oczywiście 1mV/°C.

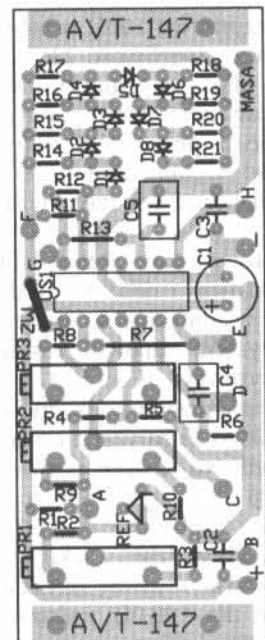
Przy wzroście temperatury napięcie w punkcie F spada i kolejno zaczynają przewodzić diody D1...D8. Wejście kolejnej diody w stan przewodzenia oznacza dołączenie równoległe do rezystancji R11 pewnej wypadkowej rezystancji diod i rezystorów R14...R21. Zmienia to wzmocnienie US1C tak, aby dla dowolnej temperatury zakresu czułość przetwarzania temperatury na napięcie wynosiła 1mV/°C.

Wartości rezystorów obwodu linearyzacji zostały dobrane drogą eksperymentu i dokładna symulacja komputerowa może nieco skorygować te wartości, niemniej jednak w układzie modelowym uzyskano odchyłkę wskazań w całym zakresie nie większą niż 1°C, co jest wynikiem zupełnie satysfakcjonującym.

Oczywiście zmiany wartości elementów R4...R8 (zmieniają czułość przetwarzania w punkcie F na wartość inną niż -25,773mV/Ω) oznaczają konieczność dobrania od nowa wartości R14...R21.

Wspomnijmy jeszcze, iż - podobnie jak w wielu dotychczas opisa-

nych układach - podczas kalibracji zostaną uwzględnione napięcia niezrównoważenia wzmacniaczy operacyjnych. Pewien niewielki wpływ będą miały tylko zmiany temperaturowe napięć niezrównoważenia, a dla wyższych temperatur mierzonych - zmiany napięcia przewodzenia diod w układzie linearyzacji, nie ma to jednak znaczenia w praktycznych zastosowaniach.



Rys. 2. Rozmieszczenie elementów na płytce drukowanej

Montaż i uruchomienie

Montaż układu z rysunku 1 można wykonać na płytce, której mozaikę ścieżek pokazano na wkładce, zaś rozmieszczenie elementów na **rysunku 2**. Jak zwykle najpierw montujemy zwoję, rezystory i inne elementy bierne, na końcu zaś układ scalony. Nie należy montować D1 - zostanie ona wlutowana po kalibracji. Jeśli moduł ma pracować niezawodnie w warunkach przemysłowych, to lepiej nie stosować podstawki, a US1 wlutować bezpośrednio w płytkę.

Po zmontowaniu płytki należy dołączyć czujnik Pt100 za pomocą tego przewodu połączeniowego (niekoniecznie ekranowanego), który zostanie użyty do normalnej pracy.

Moduł zmontowany ze sprawnych podzespołów nie wymaga uruchomienia, należy go natomiast dokładnie skalibrować.

Kalibracja

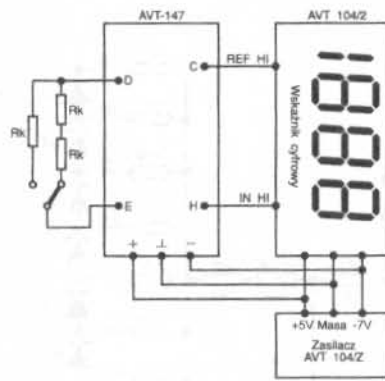
Regulację przeprowadzimy w układzie zestawionym wg **rysunku 3**, używając zasilacza i wskaźnika, które będą współpracować z naszym modułem. W ten sposób możemy uzyskać dużą dokładność, ponieważ przy kalibracji uwzględnimy parametry wskaźnika i ewentualny wpływ zasilacza.

Do kalibracji niezbędne są dwa rezystory o dokładnie znanej wartości: jeden o nominalnie 100Ω, drugi z zakresu 200...300Ω. Należy jednak pamiętać, iż użycie „wyjętych z pudełka” rezystorów 100Ω o tolerancji 1% oznacza możliwość błędu ±3°C. Dlatego dla osiągnięcia większej dokładności należy te rezystory zmierzyć dobrym przyrządem. Nie muszą one mieć wcale dokładnie 100Ω, trzeba tylko znać ich rzeczywistą wartość.

Przeprowadzimy tylko kalibrację dwupunktową czułości „podstawowej”, a wystarczającą linearyzację charakterystyki zapewni zestaw stałych rezystorów R14...R21.

Kalibrację przeprowadzamy bez diody D1 (układ linearyzacji odłączony).

Wypadkowa czułość przetwarzania rezystancji na wyświetloną liczbę w zakresie temperatur 0...+50°C wynosi 0,388Ω/liczbę i taką czułość „podstawową” musimy uzyskać. Jednocześnie dla 100,0Ω wskazanie ma wynosić 000. Jeśli nasz rezystor 100Ω ma nieco odbiegającą od nominalu wartość, to najpierw obliczamy od-



Rys. 3. Układ do kalibracji

powiadającą tej wartości temperaturę, która ma się pokazać na wyświetlaczu. Podobnie obliczamy, jakie powinno być wskazanie przy czułości 0,388Ω/liczbę dla drugiego rezystora 200...300Ω.

Wskazanie po niezbędnym zaokrągleniu powinno wynosić:

$$N = \frac{(R - 100)\Omega}{0,388 \Omega/\text{liczbę}}$$

Dla przykładu, niech nasze rezystory mają odpowiednio 99,4Ω i 301,3Ω. Po dołączeniu rezystora o wartości 99,4Ω wskazanie na wyświetlaczu powinno być:

$$N1 = \frac{(99,4 - 100)}{0,388} = -1,55$$

w zaokrągleniu -2.

Dla drugiego rezystora:

$$N2 = \frac{(301,3 - 100)}{0,388} = 518,8$$

w zaokrągleniu 519.

Po dołączeniu pierwszego rezystora należy za pomocą PR2 ustawić wskazanie -2, następnie dołączyć drugi rezystor i za pomocą PR3 ustawić wskazanie 519. Potem znowu dołączyć pierwszy rezystor i... okaże się, iż układ się „rozjechał”. Ponownie ustawić PR2 aby wskazanie było

WYKAZ ELEMENTÓW

Rezystory

- R1: 2...2,2kΩ
- R4, R5, R7, R11: 1kΩ
- R6, R12: 100Ω
- R8, R10: 3...3,6kΩ
- R13: 1MΩ
- R14: 120kΩ
- R15: 100kΩ
- R16: 62kΩ
- R17, R19: 36kΩ
- R18: 33kΩ
- R20: 39kΩ
- R21: 20kΩ

Rk: rezystory do kalibracji: 100Ω 1% 3szt.

PR2, PR3: 2,2kΩ wieloobrotowe, do druku

Kondensatory

- C1: 100μF/16V
- C2-C4: 100nF ceramiczne
- C5: 330...1000nF

Półprzewodniki

- REF: LM 385 1.2V
- US1: TL084 lub TL074
- D1...D8: dowolne krzemowe np. BAV17

Różne

czujnik platynowy Pt100

-2 i znów dołączyć drugi rezystor i tak dalej... Po kilku takich próbach uzyskamy wreszcie właściwe wskazania, wtedy kalibracja jest skończona i należy wlutować diodę D1. Układ jest gotowy do pracy.

Piotr Górecki, AVT

Do wykonania kompletnego regulatora z cyfrowym odczytem temperatury, oprócz opisanego modułu potrzebne będą: zasilacz (AVT104/Z), wskaźnik (AVT104/2), moduł regulatora (AVT104/R) i obudowa z potencjometrami nastawczymi (AVT104/OR).