

Dział „Projekty Czytelników” zawiera opisy projektów nadesłanych do redakcji EP przez Czytelników. Redakcja nie bierze odpowiedzialności za prawidłowe działanie opisywanych układów, gdyż nie testujemy ich laboratoryjnie, chociaż sprawdzamy poprawność konstrukcji.

Prosimy o nadsyłanie własnych projektów z modelami (do zwrotu). Do artykułu należy dołączyć podpisane oświadczenie, że artykuł jest własnym opracowaniem autora i nie był dotychczas nigdzie publikowany. Honorarium za publikację w tym dziale wynosi 250,- zł (brutto) za 1 stronę w EP. Przesyłanych tekstów nie zwracamy. Redakcja zastrzega sobie prawo do dokonywania skrótów.

Próżniomierz elektroniczny

**Projekt
130**

Prezentowany projekt opracował, co prawda, redakcyjny współpracownik, ale zastosowane w nim rozwiązania są tak oryginalne i niepowtarzalne, że postanowiliśmy zrobić wyjątek i opublikować opis w dziale „Projekty Czytelników”.



Tak się złożyło, że był mi potrzebny próżniomierz, który umożliwiałby pomiar próżni w zakresie 50...760 mmHg (milimetrów słupa rtęci) w aparaturze szklanej. Dokładność grała rolę drugorzędną. Dysponowałem co prawda próżniomierzem mechanicznym, jednakże był on duży i nieporęczny – posiadał metalowy gwint 1/2 cala, co praktycznie uniemożliwiło jego dobre połączenie z aparaturą szklaną. Chcąc nie chcąc zacząłem myśleć o innym próżniomierzu. Dysponując znaczną kwotą można oczywiście zrobić wszystko. Gorzej, gdy pieniędzy nie ma i trzeba nieco „pokombinować”. Tak właśnie powstał ten projekt.

Szukając informacji o metodach pomiaru próżni trafiłem na wzmiankę o próżniomierzu rezystancyjnym Piraniego. Budowę takiego czujnika wyjaśnia rys. 1. W szklanej bańce wtopione są dwie elektrody, pomiędzy którymi jest rozpięty drut wolframowy. Ależ to jest żarówka! stwierdzi zapewne Czytelnik i nie będzie daleko od prawdy. Otóż żarówka takim czujnikiem może być – wystarczy do jej bańki dolutować szklaną rurkę. Dzięki temu można wewnątrz bańki zmieniać ciśnienie gazu. Zasada pomiaru próżni takim czujnikiem jest niemal banalna: metalowe włókno jest rozgrzewane prą-

dem elektrycznym do pewnej temperatury. Temperatura ta nie może być jednak zbyt wysoka, bo w tlenowej atmosferze włókno się spali. Gdy ciśnienie wewnątrz czujnika zacznie się zmniejszać włókno będzie coraz gorzej chłodzone (mniejsza ilość gazu odbierającego ciepło włóknu). Włókno zwiększy więc swoją temperaturę, a co za tym idzie także swoją oporność. Zatem zmiany ciśnienia przekładają się na zmiany oporności włókna czujnika. Jak wiadomo bowiem z fizyki, oporność metalu rośnie wraz z temperaturą i wyraża się zależnością:

$$R = R_0 [1 + \alpha(t - t_0)]$$

przy czym:

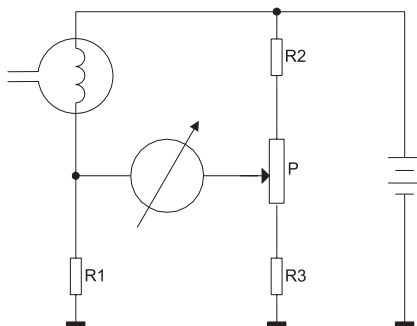
R – oporność metalu w temperaturze t,

R₀ – oporność metalu w temperaturze t₀ (np. przy 0°C),

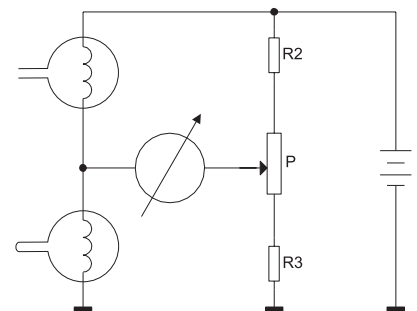
α – współczynnik temperaturowy, zależny od rodzaju metalu.

Duże zmiany oporności spowodowane zmianą temperatury wykaże więc taki metal, dla którego współczynnik temperaturowy będzie duży. Takim metalem jest między innymi wspomniany już wolfram, dla którego α = 4,8 · 10⁻³ 1/°C.

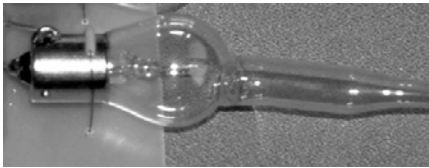
Pomiar oporności włókna czujnika może być zrealizowany przy użyciu mostka Wheatstone’a (rys. 1). Poprzez pokręcanie potencjometrem P



Rys. 1. Budowa czujnika Piraniego



Rys. 2. Budowa skompensowanego termicznie czujnika Piraniego



Fot. 3. Wygląd czujnika ciśnienia wykonanego z żarówki samochodowej

sprowadza się mostek do równowagi (na zero wskazań wskaźnika równowagi) i z położenia potencjometru można wyznaczyć oporność włókna. Jeśli przez R_p oznaczyć oporność potencjometru, zaś przez x położenie jego ślizgacza w [%] (potencjometr liniowy) wówczas warunek równowagi można zapisać jako:

$$R1 \cdot (R2 + R_p \cdot x) = R \cdot [R3 + R_p(100 - x)]$$

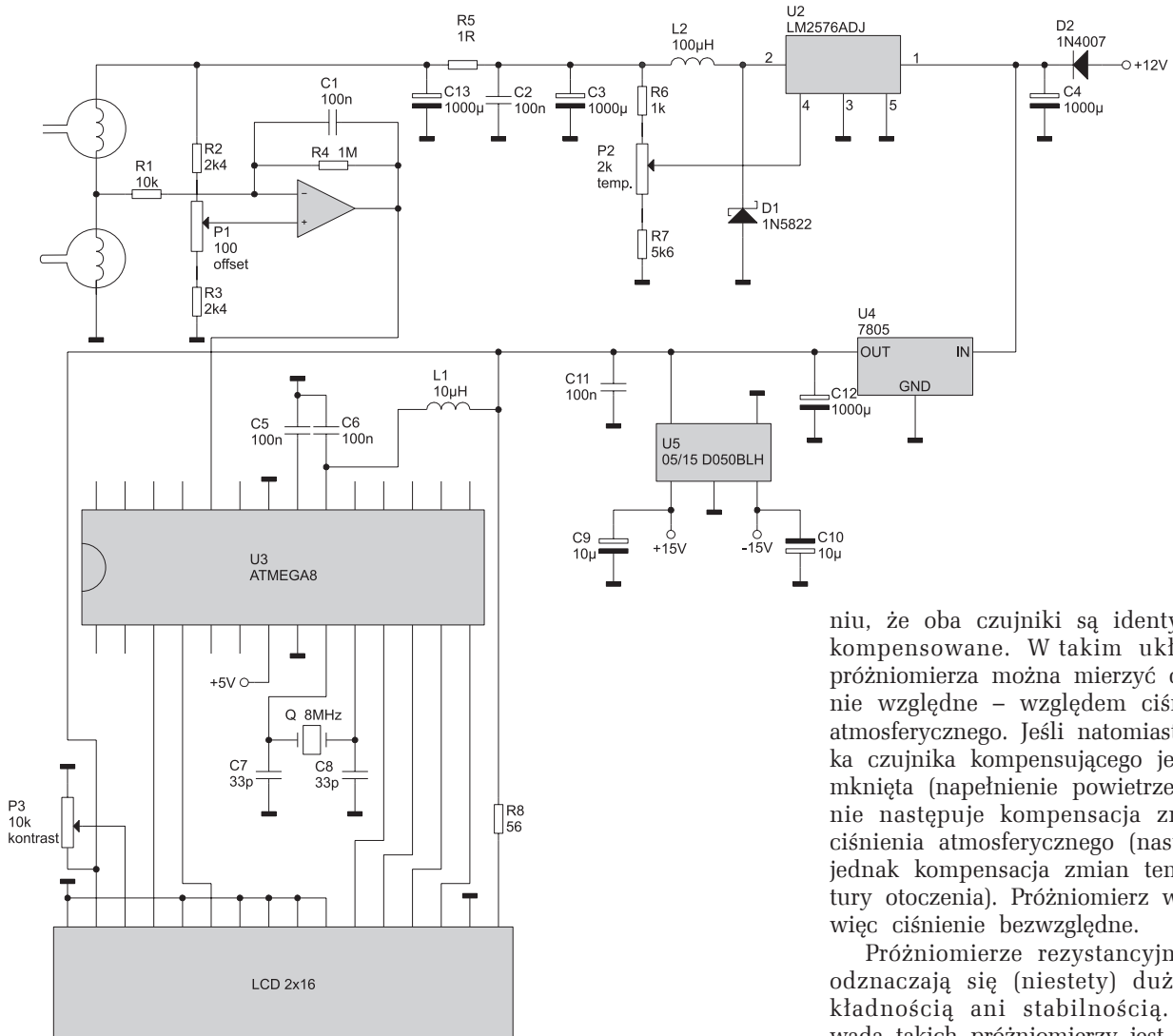
$$i \text{ stąd: } R = \frac{R1(R2 + R_p \cdot x)}{R3 \cdot R_p(100 - x)}$$

Po wyskalowaniu można bezpośrednio z ustawienia suwaka potencjometru odczytać wartość ciśnienia.

Układ może pracować także na innej zasadzie. Nie trzeba bowiem sprowadzać mostka za każdym razem do równowagi. Stosując zamiast wskaźnika równowagi (kiedyś stosowano w tym celu galwanometr) odpowiednio wyskalowany mikroamperomierz lub miliwoltomierz można bezpośrednio ze skali miernika odczytać wartość ciśnienia. Do tej pory przemilczaliśmy pewną wadę czujnika Piraniego, polegającą na jego wrażliwości na zmiany temperatury otoczenia a także ciśnienia atmosferycznego. Mianowicie ze wzrostem temperatury otoczenia (a także spadkiem ciśnienia) pogarszają się warunki odprowadzania ciepła z drutu czujnika i temperatura drutu rośnie. Z tego względu próżniomierz wskazuje większą (lepszą) próżnię od tej, która faktycznie występuje w aparaturze. Odwrotnie, przy zmniejszaniu temperatury otoczenia (zwiększaniu ciśnienia) chłodzenie drutu czujnika jest lepsze i próżniomierz wska-

że próżnię gorszą od faktycznej. Istnieje kilka metod zapobiegania temu szkodliwemu zjawisku. Jedną z metod jest termostatowanie czujnika. Tą metodę należy jednak odrzucić w przedbiegach ze względu na znaczne skomplikowanie konstrukcji próżniomierza. Inna metoda polega na takim regulowaniu napięcia zasilania, by temperatura włókna czujnika była stała. Miarą próżni może być wtedy napięcie regulujące. Inna jeszcze metoda polega na zastosowaniu drugiego czujnika, włączonego w drugie ramię mostka (rys. 2). Dalej będę nazywał ten czujnik czujnikiem odniesienia.

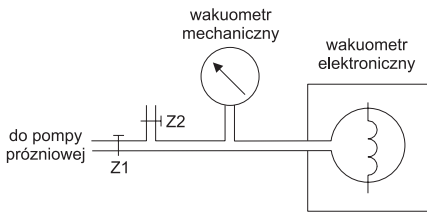
Ów czujnik powinien być napełniony powietrzem (bańka otwarta). Jest to ważne, bowiem inny gaz może mieć inne ciepło właściwe i oba czujniki są wtedy asymetryczne. W układzie z otwartą bańką czujnika odniesienia zmiany ciśnienia i temperatury otoczenia są (teoretycznie całkowicie – przy założe-



Rys. 4. Schemat elektryczny miernika

niu, że oba czujniki są identyczne) kompensowane. W takim układzie próżniomierza można mierzyć ciśnienie względne – względem ciśnienia atmosferycznego. Jeśli natomiast bańka czujnika kompensującego jest zamknięta (napełnienie powietrzem) to nie następuje kompensacja zmiany ciśnienia atmosferycznego (następuje jednak kompensacja zmian temperatury otoczenia). Próżniomierz wskaże więc ciśnienie bezwzględne.

Próżniomierze rezystancyjne nie odznaczają się (niestety) dużą dokładnością ani stabilnością. Inną wadą takich próżniomierzy jest to, że zmiana oporność nie zależy liniowo



Rys. 5. Schemat stanowiska do skalowania próżniomierza

od ciśnienia. W opisywanym układzie należy się liczyć z niedokładnością wskazań rzędu ± 10 mmHg.

Skąd jednak wziąć czujnik? Czy jest to bardzo kosztowny element? Stwierdziłem, że najtaniej będzie czujnik wykonać samemu (**fol. 3**). W tym celu wystarczy przerobić żarówkę samochodową 12 V/21 W, która kosztuje około 2 zł. Współczesne żarówki samochodowe są napełniane gazem obojętnym pod ciśnieniem zbliżonym do atmosferycznego. To umożliwia dotopienie w dość prosty sposób rurki do takiej żarówki.

Jeśli taką bańkę żarówki ogrzewać (wskazane jest tu użycie palnika Bunsena lub lepiej palnika na gaz i powietrze, dającego gorący i przy tym niezbyt duży płomień) zewnątrz palnikiem, to gaz w jej wnętrzu będzie miał coraz wyższe ciśnienie (w pewnym momencie wyższe od atmosferycznego). Jeśli temperatura będzie wystarczająco wysoka (należy powoli ogrzewać) wówczas szkło zacznie mięknąć (szkło sodowe, z którego wykonana jest żarówka mięknie w około 600...700°C) i w miejscu ogrzewania zacznie puchnąć pod ciśnieniem gazu aż w pewnym momencie z niewielkim hukiem powstanie w bańce dziura, do której można dotopić rurkę. O tej czynności trzeba napisać nieco więcej. Dotapiana rurka musi być koniecznie wykonana ze szkła sodowego. Inne gatunki szkła nie nadają się. Wynika to z faktu, że łączone szkła (bańki i rurki) nie mogą różnić się współczynnikami rozszerzalności cieplnej. W przeciwnym wypadku przy studzeniu łączenia szkło pęknie, niezależnie od tego jak bardzo byśmy się starali.

Przed złączeniem rurki z bańką żarówki koniec rurki i bańka w miejscu łączenia muszą być mocno ogrzane – szkło powinno być jasnopomarańczowe. W takiej temperaturze szkło będzie się już łączyć, dlatego należy przed złączeniem dotapianą rurkę obracać. Łączenie polega na dociśnięciu rurki do bańki. Przy tej

czynności szkło bańki nieco wkleśnie, dlatego należy szybko, lecz delikatnie dmuchnąć w dotopioną rurkę. Jest to czynność, która wymaga wyczucia. Dzięki temu bańka odzyska poprzedni kształt. Następnie łączenie należy powoli studzić w płomieniu palnika (zmniejszając stopniowo dopływ tlenu obniża się temperaturę płomienia), co może zająć do 5 minut. W tym procesie szkło się „odpręża”, zanikają powoli naprężenia w miejscu złączenia, dzięki czemu łączenie jest pewne. Zbyt szybkie studzenie prowadzi z reguły do pęknięcia łączenia. Po ostudzeniu mamy więc praktycznie gotowy czujnik, do którego można dołączyć gumowy wąż lub wtopić w aparaturę szklaną.

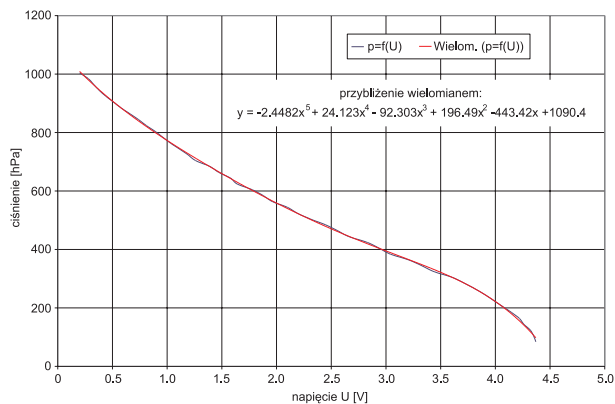
Czujnik odniesienia uzyskujemy podobnie. Różnica polega na tym, że po połączeniu rurki z bańką trzeba jeszcze nad ogniem ogrzać rurkę (obracając) do czerwoności i wyciągnąć nad ogniem (otrzymamy przewężenie) tak, by średnica rurki zmniejszyła się do ok. 1...2 mm. Po tym czujnik studzimy i na końcu zatapiamy przewężenie (studzenie jest konieczne celem uzyskania w zatopionej bańce ciśnienia zbliżonego do atmosferycznego).

Mając gotowe czujniki możemy przystąpić do wykonania próżniomierza, którego schemat elektryczny znajduje się na **rys. 4**. Precyzyjny wzmacniacz operacyjny MAX430 w układzie wzmacniacza odwracającego wzmacnia napięcie proporcjonalne do ciśnienia, uzyskiwane z mostka Wheatstone'a. Wzmocnienie tego wzmacniacza wynosi około 100. Za pomocą potencjometru P1 można mostek równoważyć. W praktyce jednak korzystne jest, by mostek (przy ciśnieniu atmosferycznym) był nieznacznie nierównoważony. Mostek musi być bowiem wyregulowany tak, by już przy ciśnieniu atmosferycznym wejście odwracające miało nieznacznie niższy potencjał od wejścia nieodwracającego. Dzięki temu uzyskujemy pewność, że napięcie na wyjściu wzmacniacza operacyjnego w zakresie mierzonych ciśnień nie będzie zmieniało znaku. Włączenie czujników jest takie, że obniżanie ciśnienia mierzzonego powoduje powstawanie coraz wyższego napięcia (dodatniego względem masy) na wyjściu wzmacniacza operacyjnego. Napięcie to jest doprowadzone do wewnętrznego przetwornika A/C mi-

krokontrolera ATmega8, który przelicza wartość napięcia na ciśnienie. W przypadku gdyby na wyjściu wzmacniacza operacyjnego pojawiło się jednak napięcie ujemne (np. wskutek uszkodzenia czujnika) zadziała dioda D1, która zabezpiecza przetwornik A/C mikrokontrolera przed uszkodzeniem. Obliczone ciśnienie w milimetrach słupa rtęci i w hektopaskalach jest wyświetlane na wyświetlaczu ciekłokrystalicznym (2 linijki po 16 znaków). Kontrast wyświetlanych znaków można regulować potencjometrem P3.

Dokładność pomiarów zależy w dużej mierze od stałości napięcia żarzenia czujników. Dlatego zastosowano impulsowy stabilizator napięcia żarzenia z układem scalonym typu LM2576-ADJ. Napięcie żarzenia może być ustawione potencjometrem P2. Scalony stabilizator 7805 dostarcza napięcia +5 V dla mikrokontrolera, wyświetlacza i jego podświetlenia oraz dla przetwornicy napięć symetrycznych ± 15 V dla wzmacniacza operacyjnego. Dioda D2 zapobiega uszkodzeniu układu w przypadku zamiany biegunów napięcia zasilającego. Z racji tego, że po włączeniu urządzenia potrzeba nieco czasu dla ustalenia się równowagi termicznej między czujnikami a otoczeniem (stabilizacja wskazań) przez dwie minuty następuje nagrzewanie wstępne czujnika (na wyświetlaczu jest w tym czasie widoczny pasek postępu) i dopiero po tym czasie następuje wyświetlenie wartości ciśnienia.

Ostatnią, a przy tym dość pracochłonną czynnością, jest uruchomienie i wyskalowanie próżniomierza. Pierwszą czynnością, którą należy wykonać jest wyregulowanie napięcia żarzenia czujników. W tym celu wyjmujemy z układu mikrokontroler, zaś do zacisków czujnika pomiarowego dołączamy woltomierz. Ze względu na czułość i niewrażliwość wskazań od temperatury otoczenia wskazane byłoby dość silne rozgrzanie drutu do znacznej temperatury. Jednakże wolfram już przy kilkuset °C łatwo się utlenia; z tego względu napięcie żarzenia musi być niskie, jednak wystarczające do nagrzania drutu przynajmniej do temperatury 150°C. Kompromisowym napięciem żarzenia jest 0,45...0,47 V przy ciśnieniu atmosferycznym. Przy wyższych napięciach po obniżeniu ciśnienia (a więc wzroście temperatury) już po paru godzinach widać



Rys. 7. Wykres zależności $p=f(U)$ dla czujnika wykonanego z żarówki samochodowej

ślady utlenienia drutu wolframowego. Nie należy do takiego stanu dopuszczać, gdyż czujnik zmienia wtedy swą charakterystykę (wskutek zmniejszenia przekroju drutu). Napięcie żarzenia ustawia się potencjometrem P2 mierząc przy tym napięcie na zaciskach czujnika. Po ustawieniu napięcia na 0,45 V na zaciskach czujnika pomiarowego należy skontrolować również napięcie żarzenia czujnika odniesienia. Jeśli różni się ono o więcej niż 20... 30 mV świadczy to o dużej asymetrii obu czujników. W takim przypadku osiągnięcie równowagi mostka za pomocą potencjometru P1 będzie niemożliwe. Poza tym kompensacja termiczna będzie nieskuteczna. Jeśli więc wystąpi znaczna asymetria czujników należy dobrać inne (zamieniając jeden z nich). Po wyregulowaniu napięcia żarzenia należy dołączyć woltomierz między wyjście wzmacniacza operacyjnego a masę i tak regulować potencjometrem P1, by woltomierz wskazał napięcie +0,3 V względem masy.

Do skalowania próżniomierza potrzebna będzie pompa próżniowa, wakuometr mechaniczny i dwa zawory (rys. 5). Najprościej będzie wykorzystać tu próżniowe zawory i trójniki szklane. Zamiast dwóch zaworów można wykorzystać jeden trójdrożny. Z racji stosunkowo niewielkiej próżni, łączenia między elementami aparatury mogą być wykonane wazęrum gumowym. Po zestawieniu aparatury należy zdjąć charakterystykę napięcia na wyjściu wzmacniacza operacyjnego w funkcji ciśnienia $U=f(p)$. Woltomierz jest więc włączony jak przy regulacji potencjometrem P1. Po uruchomieniu pompy próżniowej należy otworzyć zawór Z1 przy zamkniętym Z2. Następuje wówczas obniżenie ciśnienia za zaworem Z1, co wskaże wakuometr

mechaniczny. Jednocześnie napięcie na wyjściu wzmacniacza operacyjnego zacznie wzrastać. Po ustaleniu się wskazań wakuometru mechanicznego (najniższe możliwe do uzyskania ciśnienie) można zakręcić zawór Z1 i wyłączyć pompę. Jeśli ciśnienie po jego zakręceniu nie zacznie wzrastać świadczy to o szczelności aparatury. Jeśli jednak ciśnienie wzrasta świadczy to o nieszczelności – należy

poprawić łączenia i jeszcze raz wytworzyć próżnię. Po uzyskaniu największej próżni należy zanotować ciśnienie na podstawie wskazań wakuometru mechanicznego i odpowiadające temu ciśnieniu napięcie na wyjściu wzmacniacza operacyjnego. Następnie należy powoli wpuścić powietrze zaworem Z2, tak by wakuometr mechaniczny pokazał np. o jedną kreskę wyższe od poprzedniego. Należy znów zanotować wartość napięcia odpowiadającą nowemu ciśnieniu. Potem znów powtarzamy czynności wpuszczania powietrza, odczytania ciśnienia i napięcia aż powietrze w aparaturze osiągnie ciśnienie atmosferyczne.

Jeśli wakuometr jest wyskalowany w innych jednostkach niż hektopaskale (milibary), to należy dokonać przeliczenia każdego z ciśnień, jak to było wcześniej omówione. Nanosząc otrzymane punkty charakterystyki $U=f(p)$ na prostokątny układ współrzędnych otrzymamy wykres zmian napięcia na wyjściu wzmacniacza operacyjnego w funkcji zmian ciśnienia.

Na rys. 6 zamieszczono taki wykres dla czujnika pracującego w modelowym próżniomierzu.

Do skalowania próżniomierza wykres $U=f(p)$ z rys. 6 nie jest szczególnie przydatny, bowiem mikroprocesor musi wyliczać ciśnienie na podstawie napięcia ciśnienie a nie odwrotnie. Rysunek ten jednak zamieszczam celem lepszego uświadomienia, że dla czujnika Piraniego napięcie nie jest liniową zależnością ciśnienia, co stanowi jego pewną wadę. Należy dodać, że charakterystyka zależy też od rodzaju gazu (warunki odprowadzania ciepła z drutu zależą od ciepła właściwego gazu), zatem krzywa z rys. 6 odnosi się do powietrza.

Jeśli odwrócimy funkcję $U=f(p)$, to otrzymamy zależność $p=f(U)$ – rys. 6. Z tego wykresu możemy odczytać ja-

kie ciśnienie odpowiada napięciu wskazanemu przez woltomierz. Żądamy jednak, by ciśnienie było wyświetlane na ekranie wyświetlacza LCD.

Z tego też względu mikrokontroler musi jakoś wyliczać ciśnienie na podstawie wartości napięcia na wejściu przetwornika A/C (wyjściu wzmacniacza operacyjnego). Dlatego krzywą z rys. 6 należy opisać jakimś wzorem. Tak też czynimy, przybliżając przebieg krzywej wielomianem. Znalezienie takiego wielomianu w arkuszu kalkulacyjnym Excel jest bardzo łatwe – po sporządzeniu wykresu należy dodać linię trendu, zaznaczając że typ trendu ma być wielomianowy. Dobre przybliżenie daje już wielomian stopnia piątego (rys. 6). W „opcjach” należy zażądać wyświetlenia wzoru wielomianu na wykresie. Wzór ten jest w istocie „receptą” dla mikrokontrolera w jaki sposób ma wyliczać ciśnienie. Dla czujnika pracującego w modelu wzór ten przybrał postać:

$$p = -2,4482U^5 + 24,123U^4 - 92,303U^3 + 196,49U^2 - 443,42U + 1090,4$$

i taki też wzór zastosowano w programie dla mikrokontrolera.

Aleksander Zawada, EP

Aleksander.zawada@ep.com.pl

WYKAZ ELEMENTÓW

Rezystory

- R1: 10 kΩ 0,6 W 1%
- R2, R3: 2,4 kΩ 0,6 W 1%
- R4: 1 MΩ 0,6 W 1%
- R5: 1 Ω 5 W 1%
- R6: 1 kΩ 0,6 W 1%
- R7: 5,6 kΩ 0,6 W 1%
- R8: 56 Ω 0,6 W 1%
- P1: helitrym 100 Ω
- P2: helitrym 2 kV
- P3: potencjometr montażowy 10 kΩ

Kondensatory

- C1, C2, C5, C6: 100 nF/50 V
- C3, C4, C12, C13: 1000 μF/25 V
- C7, C8: 33 pF/50 V
- C9, C10: 10 μF/25 V

Półprzewodniki

- U1: MAX430
- U2: LM2576-ADJ
- U3: ATmega8
- U4: 7805
- U5: przetwornica 05/15 D050BLH DATEC

LCD: wyświetlacz 2x16 znaków

- D1: 1N5822
- D2L 1N4007

Inne

- L1: 10 μH
- L2: 100 μH
- Q: rezonator 8 MHz
- 2 żarówki samochodowe 12 V/21 W (od kierunkowskazów)
- 1 gniazdo ARK