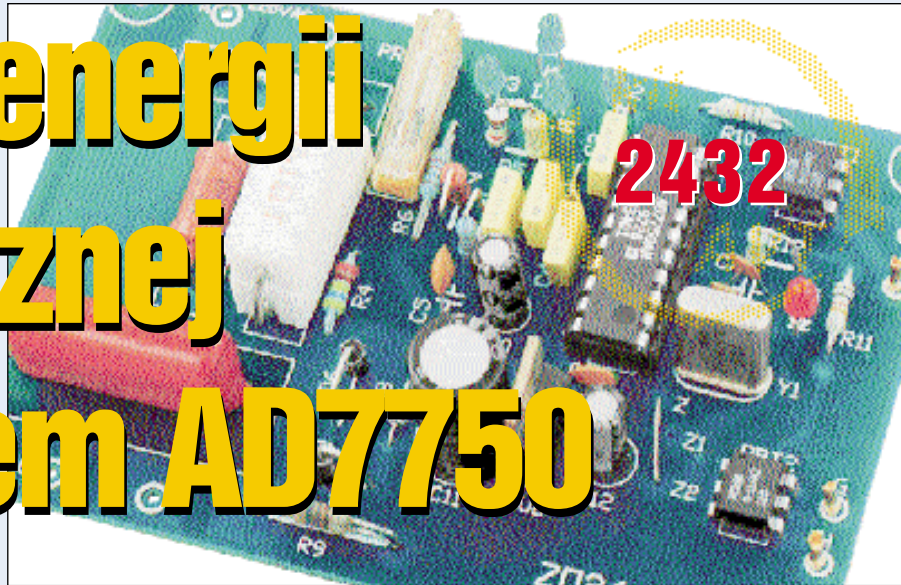




Licznik energii elektrycznej z układem AD7750



Część 2

Tylko dla dociekliwych i zaawansowanych

Opisana w części pierwszej zasada i procedura kalibracji jest łatwa do zrozumienia i wykonania. Rozumiejąc podstawowe zasady działania układu scalonego można również zmieniać zakres mierzonych mocy (prądów) – do tego naprawdę nie trzeba znać wszystkich szczegółów. Trzeba jednak przyznać, że informacje podane na 16 stronach karty katalogowej i w nocie aplikacyjnej, dotyczące dobierania elementów do konkretnego zastosowania, mogą się wydać bardzo skomplikowane i zawile. W rzeczywistości nie są trudne. Wystarczy tylko dobrze zrozumieć pewne kluczowe sprawy:

SPRAWA PIERWSZA – WSPÓLCZYNNIK PRZETWARZANIA. Przede wszystkim trzeba uświadomić sobie proste zależności zupełnie nie związane z układem AD7750. **Rozważania te są prawdziwe dla każdego licznika energii**, który ostatecznie ma pokazywać zużycie w kilowatogodzinach z dokładnością 0,01 kilowatogodziny. Jeśli rozdzielczość licznika ma wynosić 0,01kWh, to przy obciążeniu o mocy 1kW w ciągu godziny licznik musi zliczyć 100 impulsów.

$$1\text{kWh} = 100 \text{ impulsów}$$

inaczej mówiąc, przy obciążeniu 1kW, licznik musi zliczyć w ciągu godziny 100 impulsów. Godzina ma 3600 sekund, a więc w ciągu tych 3600 sekund musi pojawić się te 100 impulsów.

A więc przy obciążeniu 1kW, kolejne impulsy pojawiać się będą co 36 sekund, czyli będą mieć częstotliwość $1/36\text{s} = 0,02777(7)\text{Hz}$. Jeśli zużywana w danej chwili moc będzie inna, częstotliwość impulsów też będzie inna, ale będzie zawsze równa $0,02777(7)\text{Hz}$ na kilowat. Można powiedzieć, że **każdy licznik pokazujący zużycie energii z rozdzielczością**

0,01kWh musi zawierać przetwornik moc/częstotliwość o współczynniku przetwarzania $0,02777(7)\text{Hz/kW}$. Jeśli natomiast licznik energii miałby zliczać z rozdzielczością do 0,001kWh (1Wh), współczynnik przetwarzania musi wynosić $0,2777(7)\text{Hz/kW}$.

Układ AD7750 jest przetwornikiem moc/czynna/częstotliwość i ma osiem trybów pracy, ale do pracy w roli licznika energii trzeba wykorzystać tryb 2 albo tryb 6. W tych trybach chwilowa częstotliwość wyjściowa jest wprost proporcjonalna do iloczynu

$$U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

czyli do mocy czynnej. Cała filozofia polega w praktyce na takim dobraniu rezystorów, by współpracujący licznik (np. elektro-mechaniczny) pokazywał zużycie wprost w kilowatogodzinach. Jak wykazano, współczynnik przetwarzania mocy czynnej na częstotliwość dla wyjść F1 i F2 ma być równy:

$$\text{dla rozdzielczości licznika } 0,01\text{kW}: 0,02777(7)\text{Hz/kW},$$

$$\text{dla rozdzielczości licznika } 0,001\text{kW}: 0,2777(7)\text{Hz/kW}.$$

Natomiast w trybie 2 dla wyjścia FOUT współczynnik przetwarzania ma być równy: dla rozdzielczości 0,01kWh: $16 \cdot 0,02777(7)\text{Hz/kW} = 0,444(4)\text{Hz/kW}$, dla rozdzielczości 0,001kWh: $16 \cdot 0,2777(7)\text{Hz/kW} = 4,44(4)\text{Hz/kW}$.

SPRAWA DRUGA – KLUCZOWY WZÓR. Katalog zawiera następujący wzór na częstotliwość impulsów na wyjściach F1, F2:

$$F1=F2 = F_{\text{MAX}} \cdot 1,32 \cdot V1 \cdot V2 \cdot \text{Gain} / V_{\text{REF}}^2$$

Gdzie:

F_{MAX} w trybie 2 (nóżka 11 do masy) wynosi 6,8Hz, a w trybie 6 (nóżka 11 do plusa zasilania) 13,6Hz.

V_{REF} to wewnętrzne napięcie odniesienia równe $2,5\text{V} \pm 10\%$.

Gain to wzmocnienie kanału nr 1, zależne od stanu nóżki 2. Jest ono równe jedności, gdy nóżka 2 jest zwarta do masy, i równe 16 gdy nóżka 2 jest zwarta do plusa zasilania.

V1, V2 to wartości skuteczne napięć na (różnicowych) wejściach V1, V2. Ponieważ w tym wypadku iloczyn $V1 \cdot V2$ uwzględnia przesunięcie fazowe, bo mnożone są wartości chwilowe, stąd we wzorze nie występuje kosinus φ .

SPRAWA TRZECIA – MOC A CZĘSTOTLIWOŚĆ. Podany właśnie wzór wydaje się trudny “do ugryzienia”. W istocie nie jest wcale taki straszny, a co ważne, jest to kluczowy wzór, z którego koniecznie trzeba skorzystać podczas projektowania układu dla własnych potrzeb. Podczas skalowania (kalibracji) przy danym napięciu sieci, np. 220V i jakimś prądzie, np. 10A, w rezystancyjnym obciążeniu wydzieli się moc (czynna), równa w tym wypadku 2,2kW. Tym samym częstotliwość impulsów na wyjściu F1 (oraz F2) powinna wynosić:

$$\text{dla rozdzielczości licznika } 0,01\text{kWh}: 0,02777(7)\text{Hz/kW} \cdot 2,2\text{kW} = 0,0611(1)\text{Hz},$$

$$\text{dla rozdzielczości licznika } 0,001\text{kWh}: 0,2777(7)\text{Hz/kW} \cdot 2,2\text{kW} = 0,611(1)\text{Hz}.$$

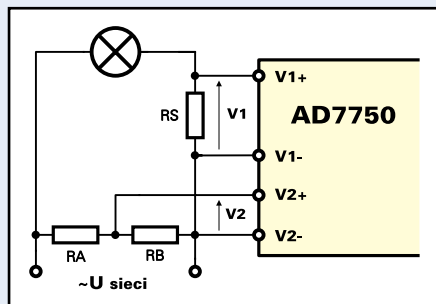
Dla innego napięcia i prądu (np. 230V, 5A) moc będzie inna, ale częstotliwość wyjściowa zawsze będzie do niej wprost proporcjonalna.

SPRAWA CZWARTA – ILOCZYN $V1 \cdot V2$. Znając już $F1=F2$, F_{MAX} , Gain, V_{REF} można podstawić je do podanego właśnie wzoru na F1. Jak widać, można wyliczyć iloczyn $V1 \cdot V2$. Występują tu dwie niewiadome, a brakuje konkretnych wartości V1, V2. I to właśnie jest zadanie dla konstruktora: zgodnie z **rysunkiem 7** należy odpowiednio dobrać wartość rezystora RS, by uzyskać potrzebną wartość V1, oraz rezystory dzielnika RA, RB, by uzyskać potrzebną wartość V2. Potrzebną częstotliwość F1 uzyska się przy różnych kombinacjach V1 i V2. V1 może być małe, a V2 duże albo odwrotnie. Jak to dobrać, od czego więc zacząć?

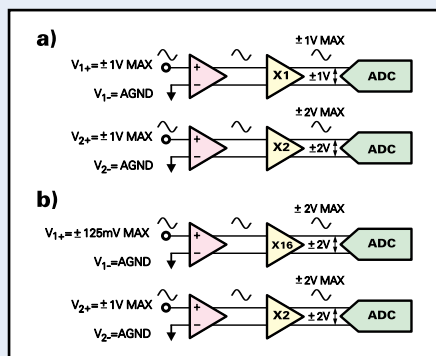
SPRAWA PIĄTA – REZYSTANCJA RS. W kolejnym kroku trzeba zacząć od dobrania V1

za pomocą RS. Według katalogu, przy wzmacnieniu 1x (nóżka 2 do masy) i niesymetrycznym wejściu (końcówka V1- do masy) dopuszczalne napięcie na wejściu V1+ wynosi $\pm 1V$. Przy wzmacnieniu 16x (nóżka 2 do plusa) dopuszczalne napięcie wynosi $\pm 125mV$. Ilustruje to **rysunek 8**.

Projektowany licznik ma pracować w jakimś zakresie prądów. Chwilowa, szczytowa wartość V1 przy maksymalnym prądzie nie powinna być większa od dopuszczalnego napięcia wejścia V1.



Rys. 7



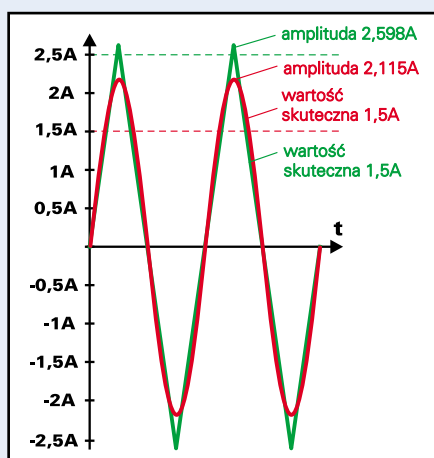
Rys. 8

Oczywiście trzeba wiedzieć, jaki będzie ten prąd maksymalny. Nie wynika to z żadnych wzorów, a zależy od zastosowania. Przykładowo dla domowego licznika energii maksymalny prąd wyniesie około 60A wartości skutecznej, a dla pokazowego licznika energii, wykonywanego w ramach pracy dyplomowej, powiedzmy 1,5A wartości skutecznej. Dla przebiegu sinusoidalnego odpowiada to wartości szczytowej odpowiednio 84,6A oraz 2,115A. Trzeba jeszcze wziąć pod uwagę, że prąd nie musi być sinusoidalny, tylko odkształcony. Odkształcony (np. przez regulator tyrystorowy) przebieg o wartości skutecznej 1,5A będzie miał wartość szczytową większą niż 2,115A. **Rysunek 9** pokazuje dwa przebiegi o wartości skutecznej 1,5A. Przebieg sinusoidalny ma amplitudę 2,115A, a trójkątny 2,598A. Jeśli więc w układzie mogą wystąpić przebiegi odkształcone, warto uwzględnić dodatkowy zapas. Nie ma tu jednak ścisłych reguł – wszystko zależy od potrzeb. W każdym razie należy zdecydować się na jakąś wartość prądu maksymalnego, większą (lub co najmniej

równą) od prądu szczytowego dla sinusoidy. Dla podanych zastosowań ten maksymalny, chwilowy prąd szczytowy mógłby wynosić dla wartości skutecznej 60A: **100A** dla wartości skutecznej 1,5A: **2,5A**

Mając tę wartość, należy dobrać wartość RS, by przy tym prądzie nie przekroczyć dopuszczalnego napięcia V1. Dla wzmacnienia 1x i napięcia szczytowego 1V RS musiałby mieć wartość dla wartości skutecznej 60A: $RS=1V/100A=10m\Omega$ dla wartości skutecznej 1,5A: $RS=1V/2,5A=0,4\Omega$ a dla wzmacnienia 16x odpowiednio: $RS=0,125V/100A=1,25m\Omega$ $RS=0,125V/2,5A=50m\Omega$

Jak widać, przy większym wzmacnieniu wartości rezystancji są ośmiokrotnie mniejsze, co oznacza, że mniejsze będą też straty mocy w rezystorze RS.



Rys. 9

I jeszcze jeden istotny szczegół. Rezystancja RS wcale nie musi być równa wyliczonej – nie może być większa, bo wejście V1 zostanie przesterowane, ale może być mniejsza, nawet znacznie mniejsza. Jak podano wcześniej, można byłoby uzyskać potrzebną wartość iloczynu $V1 \cdot V2$ przy małym napięciu V1 (czyli małej wartości RS) – wystarczyłoby zwiększyć wartość V2. Jednak obniżanie wartości RS znacznie poniżej wyliczonej nie jest zalecane. Chodzi tu o zakres prądów mierzonych, który powinien być jak najszerszy. Oba napięcia V1 i V2 są przetwarzane na postać cyfrową przez dwa 16-bitowe przetworniki A/D. Przy wartości rezystora RS kilkusetkrotnie mniejszej od wyliczonej, napięcie V1 też będzie mniejsze i zakres napięć wyjściowych przetwornika A/D nie będzie wykorzystany. Uniemożliwi to precyzyjny pomiar także przy małych prądach. Gdy jednak wartość RS będzie równa lub tylko troszkę mniejsza od wyliczonej, wykorzystany będzie pełny zakres przetwornika i dokładność rzędu 1% będzie zachowana w zakresie szerszym nawet niż 0,01...1 prądu maksymalnego.

SPRAWA SZÓSTA – NAPIĘCIE V2. Katalog podaje, że maksymalne napięcie (różnicowe)

na wejściu V2 wynosi $\pm 1V$. W praktyce okaże się, że do uzyskania potrzebnego współczynnika przetwarzania napięcie to musi być zdecydowanie mniejsze – rzędu kilkunastu czy kilkudziesięciu miliwoltów. Wartość napięcia V2 dobiera się za pomocą dzielnika RA, RB (rysunek 7), by uzyskać wyliczoną wcześniej wartość iloczynu $V1 \cdot V2$, a licznik pokazywał zużycie energii w kilowatogodzinach.

W praktyce obliczenia przeprowadza się szybko. Trzeba tylko rozumieć podane własnie zależności.

PRZYKŁAD 1 (W ten sposób obliczane były wartości elementów podane na rysunku 4 i w spisie elementów.) Przypuśćmy, że prąd maksymalny (wartość skuteczna) licznika energii prądu zmiennego budowanego w ramach pracy dyplomowej ma wynosić 1,5A. Dla czystego przebiegu sinusoidalnego daje to wartość szczytową 2,115A. Licznik powinien prawidłowo pracować z przebiegami odkształconymi, o współczynniku szczytu CF większym niż 1,41 – porównaj rysunek 9. Przyjmijmy, że zakres prawidłowej pracy powinien sięgać nie 2,115A, tylko do 2,5A wartości szczytowej.

Według karty katalogowej kostki AD7750 maksymalne napięcie szczytowe na wejściach kanału 1 przy wzmacnieniu 1 (n. 2 zwarta do masy) nie może przekroczyć $\pm 1V$. Natomiast przy wzmacnieniu 16, czyli zwarcie nóżki 2 do plusa zasilania maksymalne dopuszczalne szczytowe napięcie różnicowe między końcówkami V1+, V1- wynosi tylko $\pm 125mV$ – porównaj rysunek 8.

Decydujemy się pracować przy wzmacnieniu 16, bo da to mniejszą wartość RS i mniejsze straty mocy. A więc przy prądzie szczytowym 2,5A amplituda napięcia na rezystorze szeregowym ma wynieść co najwyżej 125mV. Tym samym rezystor szeregowy musi mieć wartość

$$RS = 125mV/2,5A = 50m\Omega$$

lub mniej (wtedy rozszerzymy zakres pomiarowy w górę).

Przyjmując wartość RS równą 50m Ω można przeprowadzić dalsze obliczenia nie zapominając, że do tej pory mówiliśmy o wartościach szczytowych, a przy obliczeniach mocy będziemy mówić o wartościach skutecznych. Należy tylko jeszcze ustalić, z jaką rozdzielczością ma pracować licznik energii. Dla stosunkowo małych prądów (1,5A) i związanych z tym mocy (do około 350W) przyjmijmy rozdzielczość 0,001kWh, co oznacza 1000 impulsów na kilowatogodzinę. Jak wykazano wcześniej, układ AD7750 pracujący jako przetwornik moc/częstotliwość musi mieć współczynnik przetwarzania równy 0,2777(7)Hz.

Mamy też do wyboru dwa tryby: tryb 2 i tryb 6. W drugim częstotliwość impulsów wyjściowych będzie mniejsza ($F_{max}=6,8Hz$), w szóstym – większa ($F_{max}=13,6Hz$). Inna będzie też częstotliwość impulsów na wyjściu w trybie 2: $F_{OUT}=16 \cdot F1$, a w trybie 6: $F_{OUT} =$

32*F1. Można pracować w dowolnym trybie – my wybierzmy tryb 2. Wtedy dla uzyskania wymaganej częstotliwości wartość napięcia V2 będzie dwukrotnie większa niż w trybie 6.

A teraz liczymy. Przy prądzie nominalnym 1,5Ask i napięciu 220Vsk moc zużywana w obciążeniu rezystancyjnym będzie równa 0,33kW, a więc przetwornik powinien wtedy dać na wyjściach F1, F2 częstotliwość równą

$$F1_{(0,33kW)} = 0,277(7) * 0,33 = 0,09166(6) \text{ Hz}$$

Przy prądzie nominalnym 1,5Ask spadek napięcia na RS, czyli napięcie V1 wyniesie:

$$V1 = 50m * 1,5Ask = 75mVsk$$

Po podstawieniu do podanego wcześniej wzoru

$$F1 = F2 = [1,32 * V1 * V2 * Gain / V_{REF}^2] * F_{MAX}$$

i przy uwzględnieniu, że $V1=75mVsk$, $Gain=16$, $V_{REF}=2,5V$, a częstotliwość F_{MAX} w trybie 2 jest równa 6,8Hz, wylicza się wartość napięcia V2, które przy obciążeniu 0,33kW (220V, 1,5A) da obliczoną właśnie częstotliwość. Można przekształcić wzór, ale można po prostu podstawić:

$$0,09166(6) \text{ Hz} = [(1,32 * 0,075Vsk * V2 * 16) / (2,5V)^2] * 6,8 \text{ Hz}$$

$$0,09166(6) \text{ Hz} = [1,584 * V2 / 6,25V^2] * 6,8 \text{ Hz}$$

$$0,09166(6) \text{ Hz} = 1,723392 * V2$$

stąd

$$V2 = 0,09166(6) / 1,723392 = 0,05319Vsk$$

Znaczy to, że przy napięciu sieci równym 220V (bo przy takim liczyliśmy moc), napięcie skuteczne V2 powinno wynosić 53,19mV. Dzielnik rezystorowy musi zmniejszyć napięcie w stosunku 4136:1 (220V:0,05319V).

Wyjaśnienia wymaga jeszcze kilka spraw. Powyższe obliczenia przeprowadzono dla prądu nominalnego 1,5A i napięcia 220V. Ale można je przeprowadzić dla dowolnej wartości prądu i innego napięcia, na przykład 230V, które według norm jest obecnie nominalnym napięciem sieci energetycznej. Inne wartości napięcia i prądu dadzą inną moc, ale końcowy wynik będzie taki sam.

Ze względu na pewne nieuniknione odchyłki (np. napięcia odniesienia 2,5V) w praktyce wartość V2 nie będzie dokładnie równa 53,19mV i koniecznie należy przewidzieć możliwość płynnej regulacji w zakresie co najmniej $\pm 10\%$, by na koniec, po ostatecznej kalibracji, licznik dawał na wyjściach F1, F2 dokładnie 1000 impulsów na kilowatogodzinę. Oznacza to, że przyrząd musi być skalibrowany w warunkach normalnej pracy – nie można tego zrobić “na sucho”.

Przyjmując wartość R5 z rysunku 4 równą 100Ω, wypadkowa wartość R1, R1A i rezystancji czynnej PR1 powinna wynosić około 413,6kΩ. Wartości podane na schemacie umożliwią regulację w zakresie $\pm 10\%$ lub więcej. Jak podano wcześniej, podczas praktycznej kalibracji należy znać moc czynną P pobieraną aktualnie przez obciążenie, obliczyć odpowiadającą jej częstotliwość

$F1=0,277(7)*P$ i przy użyciu czasomierza oraz potencjometru PR1 sprawić, by tak rzeczywiście było. Podczas kalibracji zwykle łatwiej mierzyć częstotliwość na wyjściu FOUT, która w trybie 2 jest 16 razy większa niż F1.

Przykład 2. Należy zaprojektować jednofazowy licznik energii o prądzie nominalnym 5A, dający 100 impulsów na 1kWh. Współczynnik przetwarzania wyniesie 0,02777(7)Hz/kW. Przy prądzie nominalnym 5A i napięciu 220V moc na rezystancyjnym obciążeniu wyniesie 1,1kW. Częstotliwość impulsów wyjścia F1 ma wtedy wynosić

$$F1=0,02777(7)*1,1=0,0305(5) \text{ Hz}$$

Niech układ pracuje w trybie szóstym ($F_{MAX}=13,6\text{Hz}$; $F_{OUT}=32*F1$), przy wzmocnieniu w kanale “prądowym” równym 1 (nóżka 2 zwarta do masy) - maksymalne napięcie szczytowe wynosi wtedy $\pm 1V$.

Prąd nominalny, sinusoidalny o wartości skutecznej 5A ma amplitudę około 7,1A. My przytniemy dla bezpieczeństwa maksymalny prąd szczytowy 10A. Przy takim największym spodziewanym prądzie szczytowe napięcie V1 ma być równe 1V, stąd trzeba zastosować rezystor szeregowy RS o wartości

$$RS=1V/10A=0,1\Omega$$

Prąd nominalny 5Ask da na tej rezystancji napięcie

$$V1=5Ask*0,1\Omega=0,5Vsk$$

Po podstawieniu do kluczowego wzoru $F1_{(1,1kW)}=F_{MAX}*1,32*V1*V2*Gain/V_{REF}^2$ uzyskuje się

$$0,0305(5) \text{ Hz} = [1,32*0,5Vsk*V2*1/(2,5V)^2] * 13,6 \text{ Hz}$$

$$0,0305(5) \text{ Hz} = [0,66*V2/6,25V^2] * 13,6 \text{ Hz}$$

$$0,0305(5) \text{ Hz} = 1,43616*V2$$

stąd

$$V2 = 0,0305(5) \text{ Hz} / 1,43616 = 0,021276Vsk$$

Rezystory dzielnika napięcia sieci należy tak dobrać, by przy napięciu 220V na wejściu V2 napięcie wyniosło właśnie 21,276mV. Te nieco ponad 20mV to wartość dopuszczalna, jednak warto się zastanowić, czy nie lepiej jednak pracować w trybie 2, bo napięcie V1 byłoby wtedy dwukrotnie większe. Większe jest korzystniejsze ze względu na dokładność 16-bitowego przetwornika A/D o zakresie $\pm 1V$ w torze “napięciowym”

Ponadto może warto byłoby również pracować przy wzmocnieniu 16 w torze prądowym. Wtedy rezystor RS miałby znacznie mniejszą wartość i mniejsze byłyby straty mocy w RS (przy prądzie 5A w rezystancji 0,1 wydziela się 2,5W mocy strat).

Podsumowanie

Podane przykłady pozwolą wykonać miernik mocy i licznik energii o dowolnym zakresie prądu, napięcia i mocy. Przykładowo do roli domowego licznika energii prąd nominalny należałoby zwiększyć do 15..20A (maksymalny do 60..80A). Przykład realizacji jednofazowego licznika energii o prądzie nominalnym 15A, przeznaczono dla gospodarstw domowych zaprezen-

towano w karcie katalogowej układu AD7750.

Układ może również znaleźć wiele innych interesujących zastosowań. Napięcie pracy nie musi być równe napięciu sieci. Miernik może także pracować przy prądzie stałym (wtedy nóżkę 14 trzeba zewrzeć do masy i uwzględnić wejściowe napięcia niezrównoważenia). W pozostałych trybach układ AD7750 może mierzyć nie tylko moc pobieraną, ale i oddawaną. Szczegóły opisane są w karcie katalogowej (AD7750.pdf lub 2080.pdf) i nocie aplikacyjnej AN-545 (an545.pdf), które można znaleźć na serwerze Analog Devices (www.analog.com) oraz na stronie EdW (www.edw.com.pl).

Możliwości zmian

Przyrząd w wersji podstawowej jest łatwy do wykonania i uruchomienia. Niektórzy zaawansowani Czytelnicy na pewno zechcą dostosować go do indywidualnych potrzeb, opierając się na wcześniej podanych wskazówkach. W tym celu na płycie przewidziano szereg punktów i ścieżek do przecięcia, które to ułatwią. Na schemacie ideowym (rysunek 4) zaznaczono je czerwonym kolorem.

I tak w wersji podstawowej napięcie dla wejścia “prądowego” V1 jest pobierane z punktów lutowniczych. Tym samym oprócz spadku napięcia na właściwym rezystorze(-ach) RS zmierzone będą spadki napięcia na doprowadzeniach rezystora i lutowanych złączach. Przy mniejszych prądach nie jest to problemem, natomiast przy dużych warto mierzyć spadek napięcia bezpośrednio na końcówkach rezystora. Umożliwią to punkty X, Y, w które należy wlutować kawałki przewodów prowadzące bezpośrednio do końcówek rezystora. Uwaga – koniecznie trzeba wtedy przeciąć ścieżki prowadzące od tych punktów do punktów lutowniczych rezystora RS.

Kto chciałby pracować w trybie 6 a nie w trybie 2, przetnie ścieżkę między punktami Z-Z2 i wykona zworę Z-Z1.

W wersji podstawowej wzmocnienie w torze “prądowym” wynosi 16, bo nóżka 2 jest zwarta do plusa zasilania. Kto chciałby pracować przy wzmocnieniu równym 1, przetnie ścieżkę pod układem scalonym i połączy zworą dwa punkty oznaczone u.

W wersji podstawowej tor “napięciowy” mierzy napięcie zasilające sieci, w tym spadek napięcia na rezystorze pomiarowym RS. W nietypowych zastosowaniach, gdyby układ miał pracować przy bardzo niskich napięciach, może zająć potrzeba pomiaru napięcia na obciążeniu z pominięciem spadku napięcia na RS. Można to uzyskać łącząc punkty oznaczone W i przecinając ścieżkę pomiędzy nimi a diodą D2. Oczywiście przy niskich napięciach roboczych oraz przy pracy w obwodach prądu stałego, trzeba zasilic układ z zewnętrznego zasilacza 5V, a nie stosować elementów zasilacza beztransformatorowego.

Piotr Górecki