

Miernik energii elektrycznej i watomierz, część 1

AVT-555



Korzystając intensywnie z komputera, często zostawiamy go włączonym przez 24 godz/dobę. Zadajemy sobie wówczas pytanie: „Ile energii zużywa ten komputer?”. Odpowiedź na to pytanie pozwala obliczyć ile to kosztuje. Niestety rada w rodzaju: „zmiierz pobór prądu amperomierzem, pomnóż przez 220V i czas włączenia“ nie jest właściwa.

Do prawidłowego pomiaru mocy czynnej wymagany jest bardziej skomplikowany miernik niż amperomierz - jest nim watomierz. Natomiast aby określić pobraną energię należy „śledzić” pobieraną moc zasilania w czasie.

Rekomendacje: miernik energii niezbędny wszystkim użytkownikom urządzeń zasilanych z sieci energetycznej, którym zależy na zminimalizowaniu wysokości rachunków płaconych za energię elektryczną.

O mocach w telegraficznym skrócie

Obliczenie mocy pobranej przez odbiornik jest łatwe, gdy jest on zasilany ze źródła prądu stałego. Wystarczy zmierzyć napięcie i prąd, pomnożyć i otrzymujemy moc w watach. Gdy chcemy obliczyć moc odbiornika zasilanego z sieci prądu przemiennego, sytuacja się komplikuje. Aby poprawnie obliczyć moc czynną (P) pobraną przez odbiornik należy jeszcze znać przesunięcie fazowe pomiędzy przebiegiem sinusoidalnym napięcia i prądu. Pomnożenie tylko wartości skutecznych napięcia i prądu da w wyniku moc pozorną (S), która jest pobierana z sieci, ale nie jest zamieniana w całości na pracę. Przyjmijmy, że napięcie i prąd ma przebieg sinusoidalny wyrażający się wzorem:

$$u(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \phi)$$

gdzie:

U, I - wartości skuteczne,
 ϕ - przesunięcie fazowe między U a I.

Moc chwilowa pobierana przez odbiornik w chwili t jest równa:

$$p(t) = u(t) \times i(t) = UI \cos \phi \cdot (1 - \cos(2\omega t)) - UI \sin \phi \cdot \sin(2\omega t)$$

$$p(t) = P(1 - \cos(2\omega t)) - Q \sin(2\omega t),$$

zatem:

$$P = UI \cos \phi ; Q = UI \sin \phi ; S = UI$$

Charakterystyka przyrządu

Pomiar wielkości:

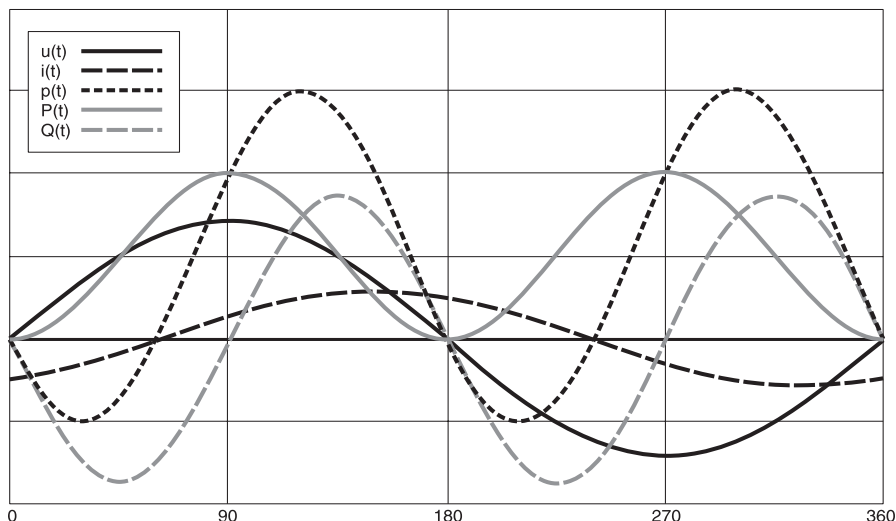
- ✓ mocy chwilowej (w odstępach 1-sekundowych) czynnej, biernej i pozornej,
- ✓ energii czynnej, (pozornej - opcja), energii czynnej w zadanym przedziale czasowym, również w systemie dwutaryfowym,
- ✓ wyliczenie współczynnika mocy PF,
- ✓ napięcia RMS, średniego, amplitudy dodatniej i ujemnej połówki przebiegu,
- ✓ prądu RMS (oraz j.w.),
- ✓ częstotliwości napięcia.

Zakres i rozdzielczości:

- ✓ napięcie: zakres 270 VAC, rozdzielczość 0,1 V,
- ✓ prąd: zakres 14 AAC, rozdzielczość 1 mA lub 10 mA (powyżej 250 mA),
- ✓ moc: 3200 VA, rozdzielczość 0,1 VA,
- ✓ energia: maks. 2000000 kWh, rozdzielczość 1 Wh,
- ✓ pasmo pomiarowe ok. 7 kHz.

Pobór mocy: 2VA/0,25W.

Zewnętrzne wymiary: 110x90x40, obudowa plastikowa (konieczna całkowita izolacja galwaniczna).



Rys. 1. Zależności pomiędzy mocami, napięciem i prądem w zależności od kąta przesunięcia fazowego

Jak wynika z analizy równania, przebieg mocy chwilowej ma również kształt sinusoidy, ale o dwukrotnie większej częstotliwości (2ω). W dodatku moc chwilowa może przybierać wartości ujemne (rys. 1). Wielkość $\cos\phi$ jest znana Czytelnikom: im mniejszy kąt przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem a prądem, tym większa jest moc czynna. Gdy prąd jest opóźniony względem napięcia, to obciążenie ma charakter indukcyjny (np. silniki), natomiast gdy je wyprzedza, to obciążenie ma charakter pojemnościowy. Symbolem Q oznaczono moc bierną.

Jest ona wydzielana na reaktancji, moc czynna na rezystancji a moc pozorna na impedancji odbiornika. Przebieg mocy biernej jest przesunięty w stosunku do przebiegu mocy czynnej o 90° (analogicznie jak prąd w stosunku do napięcia), a więc zależność między tymi mocami można przedstawić w trójkącie mocy (rys. 2). Moc bierna może mieć dwojaki charakter zależny od rodzaju obciążenia: indukcyjny lub pojemnościowy. Na tych wykresach występuje moc bierna indukcyjna. Całkując (uśredniając) moc chwilową w czasie trwania jednego okresu otrzymujemy moc czynną P , natomiast całkując moc czynną P w czasie t otrzymujemy energię czynną E zużytą przez odbiornik.

W przypadku przebiegów niesinusoidalnych obliczanie mocy jest bardziej skomplikowane. Moc

czynna jest sumą mocy czynnych dla każdej z harmonicznych napięcia i prądu. W typowym odbiorniku z prostownikiem i kondensatorem wygładzającym jedynie prąd ma bardzo odkształcony przebieg od sinusoidy. Zatem moc

Uwaga!
Ze względu na bezpośrednie podłączenie przyrządu do sieci 230VAC, w zależności od zorientowania wtyczki sieciowej włożonej do gniazdzka, na masie przyrządu, a więc i na metalowej ramce wyświetlacza LCD może pojawić się faza napięcia sieciowego! Z tego względu praca z przyrządem bez obudowy z tworzywa sztucznego jest wysoce niebezpieczna.

czynna jest przede wszystkim zależna od podstawowej (pierwszej) harmonicznej o częstotliwości 50 Hz. Moc pozorna jest obliczana klasycznie: jako iloczyn wartości skutecznych napięcia i prądu. Stosunek mocy P/S nie jest jednak oznaczany jako $\cos\phi$, lecz jako PF (*power factor* - współczynnik mocy). W obu przypadkach ($\cos\phi$, PF) należy dążyć do tego, aby odbiornik pobierał jak najmniej mocy biernej, lecz osiągnięcie tego celu realizuje się różnymi sposobami.

Wyjaśnienia wymaga jeszcze pojęcie wartości skutecznej (inaczej RMS). Wartość skuteczna prądu zmiennego odpowiada takiemu natężeniu prądu stałego, który płynąc w obciążeniu rezystancyjnym wydzieli identyczną moc co prąd zmienny. Dlatego najlepszym sposobem na zmierzenie wartości

skutecznej dowolnego przebiegu w szerokim zakresie częstotliwości jest metoda kompensacyjna na dwóch grzejnikach rezystancyjnych. Wartość skuteczną można również wyliczyć dokonując obliczeń na skwantowanym przebiegu napięcia za pomocą procesora.

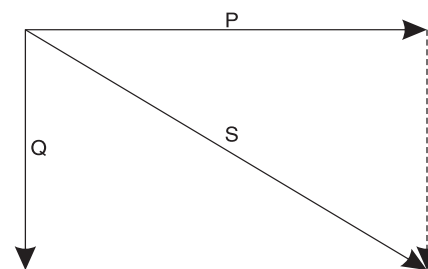
Działanie układu ADE7759

Pomiar mocy metodą analogową jest możliwy na dwa sposoby. Pierwszy i najprostszy, to pomiar watomierzem wskazówkowym. Jest to miernik magnetoelektryczny, w którym wychylenie wskazówki jest proporcjonalne do iloczynu napięcia i prądu chwilowego, a więc również jest uwzględnione przesunięcie fazowe.

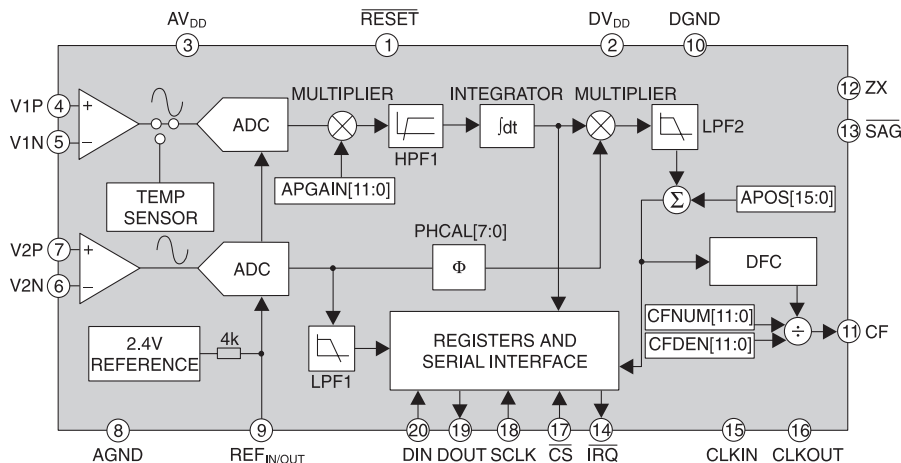
Drugi sposób polega na obliczeniu mocy przez analogowy układ mnożący zbudowany ze wzmacniaczy operacyjnych, jednak niewielka dopuszczalna dynamika sygnału na wejściu i wyjściu czyni taki przyrząd trudnym w obsłudze.

Ale wraz z rozwojem techniki cyfrowej możliwe stało się obliczenie mocy (i nie tylko) w sposób całkowicie cyfrowy. Wystarczyłoby w zasadzie skwantować przebieg napięcia i prądu z odpowiednią częstotliwością, a resztą zajęłyby się już odpowiednio zaprogramowany procesor. Jednak wydajność obliczeniowa tego procesora musiałaby być dość duża, ponieważ wymagana jest wysoka częstotliwość próbkowania sygnałów, aby przebiegi niesinusoidalne (o szerokim widmie częstotliwości) nie powodowały zbyt dużego błędu.

Na szczęście producenci układów scalonych konstruują coraz to lepsze i wymyślniejsze „kostki“, integrujące wiele układów niełatwych do dyskretnego zrealizowania. Układy z rodziny ADE775x firmy



Rys. 2. Trójkąt mocy



Rys. 3. Schemat blokowy układu ADE7759

Analog Devices są tego przykładem, a najnowszy układ ADE7759 (dostępny w sprzedaży), to właściwie kompletny watomierz sterowany cyfrowo poprzez magistralę szeregową SPI. Na rys. 3 przedstawiono jego schemat blokowy.

Opiszę teraz działanie układu scalonego, zaznaczając co zostało wykorzystane w opisywanym przyrządzie. Jak widać, układ zawiera dwa tor pomiarowe przetwarzające sygnały wejściowe: tor V1 - prądowy i tor V2 - napięciowy. Poza jednakowymi przetwornikami analogowo-cyfrowymi (A/C) tory znacznie różnią się od siebie. Wzmacniacze programowalne mają możliwość ustawienia jednej z pięciu wartości wzmocnienia: 1, 2, 4, 8 lub 16. Tor napięciowy ma zakres wejściowy napięcia ustawiony na $\pm 0,5$ V (różnicowo), natomiast tor prądowy ma dodatkowo jeszcze dwa zakresy do wyboru: $\pm 0,25$ V i $\pm 0,125$ V. Te wartości odpowiadają 63% pełnej skali na wyjściu przetwornika A/C. Ponieważ w opisywanym watomierzu nie jest wykorzystywane wyjście impulsowe CF, nie ma potrzeby kalibrowania przetwarzania bezpośrednio w ADE7759 za pomocą rejestrów. Dlatego też zmieniłem w projekcie maksymalne napięcie wejściowe doprowadzone do wejść na 100% skali A/C. W efekcie kanał napięciowy może „przyjmować” napięcie z zakresu do 0,79 V, a kanał prądowy prąd do 0,395 V. W rezultacie lepsza jest dynamika mierzonych wartości napięć. Wzmocnienie wzmacniaczy ustawia się za pomocą jednego z rejestrów bloku GAIN. Ze wzmacniaczy sygnał trafia na

przetworniki A/C typu sigma-delta. Przetworniki dają na wyjściu 20-bitową liczbę w uzupełnieniu do dwóch (U2). Wartość liczbową w kanale prądowym można korygować w zakresie $\pm 50\%$ za pomocą rejestru APGAIN (tutaj nie wykorzystywany). W kanale prądowym występują jeszcze dwa bloki specjalne. Pierwszym jest filtr górnoprzepustowy HPF1 eliminujący składową stałą, a drugim jest cyfrowy układ całkujący przeznaczony do współpracy z cewką Rogowskiego, służącą do pomiaru prądu. Obydwa bloki nie są wykorzystywane w tym watomierzu.

W kanale napięciowym umieszczono blok korekcji fazowej sterowany rejestrem PHCAL, wymagany, gdy do pomiaru prądu użyto przekładnika prądowego lub gdy filtr HPF1 zostanie włączony. Ponieważ ten watomierz mierzy prąd za pomocą bocznika, nie jest wymagana żadna korekta fazy. Następnie sygnały obu torów trafiają do układu mnożącego. Wynikiem mnożenia jest 20-bitowa liczba w kodzie U2 odpowiadająca wartości chwilowej mocy czynnej. Uśrednianie mocy chwilowej w filtrze dolnoprzepustowym LPF2 daje moc czynną. Suma tej wartości mocy z zawartością rejestru APOS pozwala zminimalizować błąd wartości niezerowej mocy przy braku obciążenia. Akumulacja mocy w 40-bitowym rejestrze AENERGY pozwala mierzyć dokładnie ilość zużytej energii elektrycznej przez podłączony odbiornik.

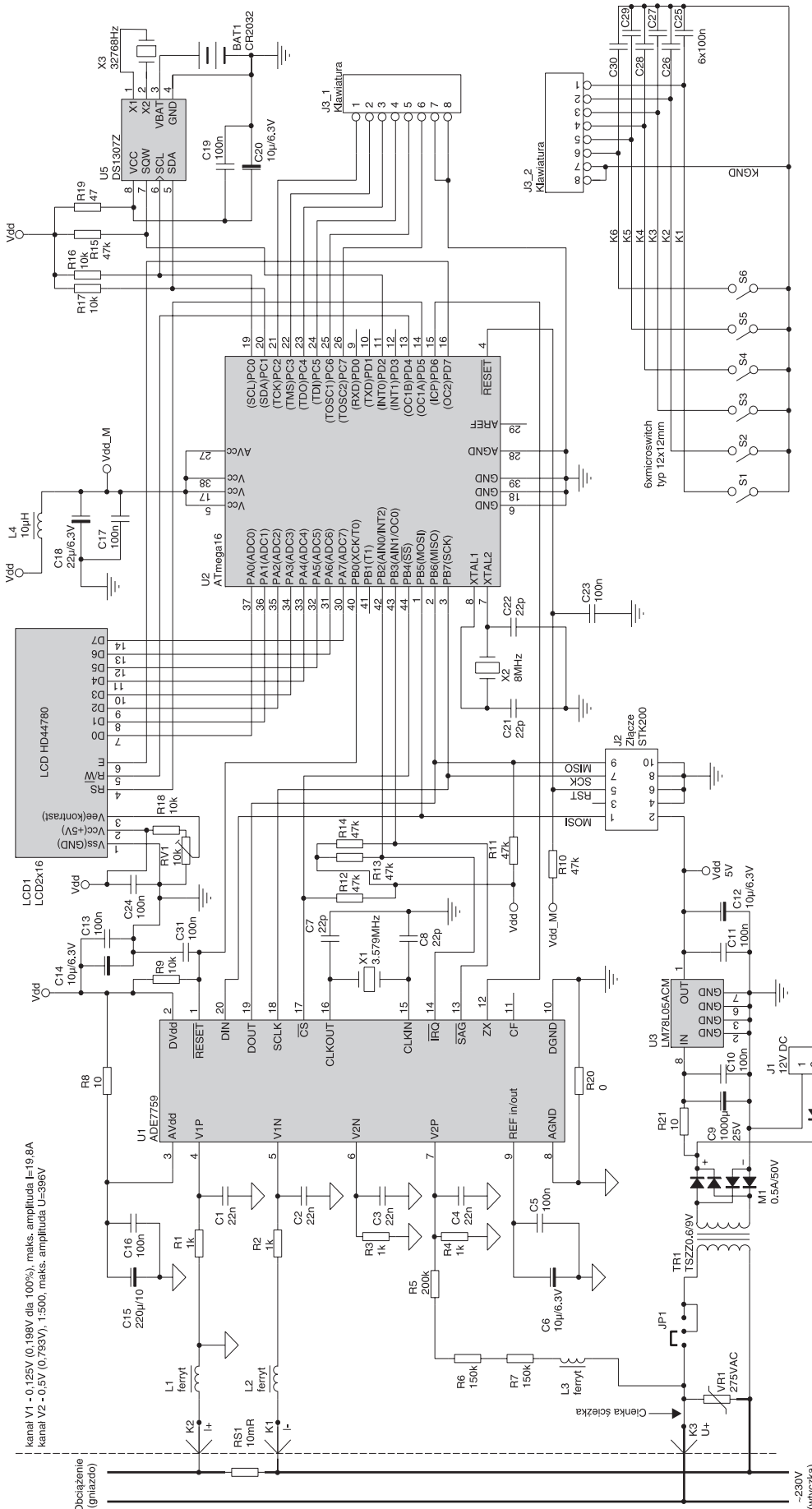
Ponieważ wszystkie te czynności odbywają się „sprzętowo”, w odpowiednich blokach układu ADE7759 możliwe stało się

zmniejszenie czasu potrzebnego na przetwarzanie próbek danych. Cykl pracy układu powtarza się z częstotliwością czterokrotnie mniejszą niż wynosi jego częstotliwość taktowania. Zalecana częstotliwość rezonatora kwarcowego wynosi 3,579545 MHz, a więc próbkowanie przebiegu wejściowego, mnożenie i akumulacja energii odbywa się z częstotliwością prawie 900 kHz. Z powodu występowania zjawiska aliasingu przy przetwarzaniu analogowo-cyfrowym, konieczne jest ograniczenie pasma sygnałów wejściowych za pomocą filtrów RC do około 7 kHz (dla -3dB spadku).

W kanale napięciowym występuje dodatkowo filtr LPF1 ograniczający pasmo przebiegu do 156 Hz. Jest on wykorzystywany przez blok detekcji przebiegu napięcia przez zero (wyjście ZX) oraz blok detekcji spadku lub zaniku napięcia (wyjście SAG). Szerzej o tym i jeszcze o innych funkcjach ADE7759 można przeczytać w opisie udostępnionym przez producenta. Wspomnę jeszcze o jednej ważnej funkcji, mianowicie o możliwości zgłaszania przerwania (wyjście IRQ) przez układ pomiarowy, jeśli wystąpi jedno z kilku zdarzeń. Może nim być pojawienie się w specjalnym rejestrze 20-bitowej próbki chwilowej napięcia, prądu lub mocy, co zostało wykorzystane w tym watomierzu do obliczenia wartości napięcia, prądu, mocy pozornej itp. Częstotliwość uaktualniania próbek została wybrana tak, aby program realizowany przez procesor zdążył obsłużyć przerwanie i dokonać niezbędnych obliczeń przed nadejściem kolejnej próbki. W praktyce udało się to wykonać w czasie krótszym niż 70 μ s, co dało rozdzielczość 280 próbek na okres sieci (50 Hz).

Podsumowując: moc i energia czynne są obliczane co 1,12 μ s sprzętowo w ADE7759, natomiast pozostałe wielkości są wyliczane programowo przez procesor sterujący, na podstawie próbek przychodzących co 71 μ s.

Do wszystkich funkcji i rejestrów dostęp jest możliwy poprzez szeregową magistralę SPI. Jest to bardzo wygodne i nowoczesne rozwiązanie - wszystkie ustawienia i kalibracje dokonywane są pro-



Rys. 4. Schemat elektryczny miernika mocy

gramowo za pomocą odpowiednich opcji i zmiennych. Magistrala SPI jest taktowana sygnałem SCLK, którego częstotliwość nie zależy od częstotliwości pracy układu ADE7759.

Zastosowanie 20-bitowego słowa wyjściowego z przetworników A/C pozwoliło uzyskać dużą dynamikę i rozdzielczość pomiarów napięć wejściowych. Producent deklaruje dokładność przetwarzania 0,1% przy dynamice 1000:1 i PF=1. Przy PF=0,5 i skrajnej wartości temperatury otoczenia, błąd rośnie do ±0,4%. Jest to znakomita dokładność i potrzebna jest dobra konstrukcja przyrządu (precyzyjne elementy, dobrze zaprojektowana PCB), aby nie pogorszyć znacząco tego wyniku.

Budowa i działanie układu

Na rys. 4 pokazano schemat elektryczny watomierza. Jest to schemat aplikacyjny ADE7759, nieróżniący się bardzo od proponowanego przez producenta. Zasilanie części cyfrowej V_{DD} i analogowej AV_{DD} jest takie jak w nocie aplikacyjnej. Wyjście wewnętrzne napięcia odniesienia 2,4 V na nóżce 9 zostało zablokowane dwoma kondensatorami: 10 μF i 100 nF. Masa części analogowej jest połączona z masą cyfrową w jednym punkcie, pod układem U1 („symboliczny” rezystor R20 o rezystancji 0 Ω). Nieco zmieniony jest sposób podłączenia wejść pomiarowych do sieci 230 V. Napięcie z bocznika prądowego RS1 o wartości 0,01 Ω jest podane na wejście różnicowe V1P-V1N poprzez filtr antyaliasingowy R1-C1, R2-C2 i koraliki ferrytowe L1, L2. Koraliki ferrytowe zapobiegają przedostawianiu się z sieci do przyrządu impulsów zakłócających o wysokiej częstotliwości. Jak już podałem wcześniej, maksy-

malna wartość różnicowa w kanale prądowym została ustalona (w rejestrze GAIN) na 0,4 V przy wzmacnieniu $\times 2$. Daje to maksymalną amplitudę napięcia wejściowego 0,2 V, co odpowiada prądowi 20 A, czyli 14 A_{rms}.

Kanał napięciowy również posiada identyczne filtry antyaliasingowe. Napięcie sieciowe jest dzielone w stosunku 1:500 w dzielniku R4/(R4+R5+R6+R7). Punkt wspólny napięć wejściowych, czyli masa analogowa została wybrana w punkcie K2 za koralikiem ferrytowym, więc wejścia V1P i V2N są na poziomie masy.

Układ ADE7759 jest taktowany przbiegiem zegarowym o częstotliwości 3,579 MHz. Wyjście zgłaszania przerwania (IRQ) i detekcji zaniku lub spadku napięcia (SAG) oraz wejście uaktywniające magistralę SPI (CS) są podciągnięte do V_{dd} za pomocą rezystorów R13, R14 i R12. Wyjścia te są podłączone do odpowiednich linii mikrokontrolera sterującego.

Układem steruje mikrokontroler ATmega16 z popularnej rodziny AVR firmy Atmel. Tym co zdecydowało o jego wyborze, była dostępność sprzętowego interfejsu SPI, TWI (czyli I2C) oraz jednostki mnożącej, a także duża szybkość wykonywania obliczeń i możliwość programowania pamięci programu w układzie docelowym (ISP). ATmega16 posiada 16KB pamięci Flash, co daje możliwość zapisania prawie 8 tysięcy rozkazów - jest to więc spora pamięć jak na program pisany wyłącznie w assemblerze (takie było założenie). Z wyposażenia ATmega16 zostały wykorzystane jeszcze: *Watchdog* i *Brown-Out-Detector* (generuje sygnał zerujący przeryt przy zbyt niskim napięciu zasilania), funkcja ICP timera T1 (mierzenie czasu trwania impulsu) oraz dwa wejścia przerwań zewnętrznych (INT0 i INT2).

Mikrokontroler jest zasilany przez filtr LC (L4, C17, C18), co ma dodatkowo zapobiegać możliwości zakłócenia jego pracy. Taktowany jest sygnałem zegarowym stabilizowanym za pomocą rezonatora 8 MHz, dzięki czemu łatwo jest obliczyć czasy wykonywania procedur.

Do portu A oraz linii PD4 PD5 i PD7 podpięto alfanumeryczny wyświetlacz LCD 2x16. Do sześciu

linii portu C zostało dołączonych 6 przycisków S1...S6 wraz z kondensatorami C25...C30 służącymi do tłumienia drgań ich styków. Wejście INT0 (port PD2) i magistrala TWI (porty PC0, PC1) są połączone z zegarem czasu rzeczywistego DS1307. Układ ten pracuje z własnym kwarcem częstotliwości rezonansowej 32 kHz, a jego praca jest podtrzymywana baterią litową. Na wyjściu SQW podłączonym do INT0 w ATmega16 występuje przebieg o częstotliwości 1 Hz, który rozpoczyna start nowego cyklu pomiarów.

Układ ADE7759 komunikuje się z mikrokontrolerem poprzez magistralę szeregową SPI (PB5...PB7). Wyjście SS (PB4), aktywne poziomem niskim, inicjuje komunikację w ADE7759. Magistrala SPI, sygnał RESET i zasilanie są także wyprowadzone na złącze szpilkowe J2 (standard STK200), które służy do programowania pamięci programu mikrokontrolera.

Przerwania z ADE7759 są zgłaszane zmianą poziomu z wysokiego na niski na wejściu INT2 (PB2). Poziom niski na linii SAG sygnalizuje zbyt niskie napięcie sieciowe lub jego brak, co jest wykorzystywane w programie do zapisu stanu liczników energii. Ponadto procesor ma możliwość wyzerowania ADE7759 poprzez linię PB0, co jest przydatne (właściwie wymagane) podczas restartu watomierza.

Pobór prądu przez układy scalone i wyświetlacz wynosi około 20 mA. Do obniżenia napięcia sieciowego zastosowany został miniaturowy transformator o napięciu wtórnym 9 V. Aby zmniejszyć udar prądowy przy włączeniu oraz zakłócenia z sieci, przed kondensatorem filtrującym znajduje się rezystor R21 (10Ω). Kondensator C9 ma dużą pojemność jak na tak niewielki pobór prądu, ponieważ jego zadaniem dodatkowym jest podtrzymanie działania watomierza jeszcze przez chwilę po zaniku napięcia sieciowego. Napięcie 5 V jest stabilizowane przez układ scalony U3 (78L05).

Złącze J1 służy do zasilania watomierza podczas programowania procesora. Niedopuszczalne jest wgrywanie programu przy zasilaniu przyrządu z sieci 230 V (choć jest to możliwe, gdy komputer nie jest uziemiony).

WYKAZ ELEMENTÓW

Rezystory

R1...R4: 1kΩ/1%
R5: 200kΩ/1%
R6, R7: 150kΩ/1%
R8, R21: 10Ω/5%
R9, R16...R18: 10kΩ/5%
R10...R15: 47kΩ/5%
R19: 47Ω/5%
RV1: 10kΩ potencjometr
RS1: 0,01Ω RS-3668671
VR1: 275VAC JVR-14N 431K

Kondensatory

C1...C4: 22nF/10%
C5, C10, C11, C13, C16, C17, C19: 100nF
C6, C12, C14, C20: 10μF/6,3V
C7, C8, C21, C22: 22pF/5% NPO
C9: 1000μF/25V
C15: 220μF/10V
C18: 22μF/6,3V
C23...C31: 100nF/20%

Półprzewodniki

U1: ADE7759
U2: ATmega16
U3: LM78L05ACM
U4: DS1307Z
D1: LL4148
M1: 0,5A/50V B080C1000DIL

Różne

X1: 3,579MHz
X2: 8MHz
X3: 32768Hz
S1...S6: microswitch 12x12
TR1: TSZ0.6/9V (Indel)
LCD1: LCD 2x16
BAT1: CR2032 podstawka
L1...L3: koralik ferrytowy 3,5x9 mm
L4: 10μH
J1, JP1: goldpiny
J2: DC10
obudowa Z5, kabel trójżyłowy z wtyczką, gniazdko sieciowe

Do ochrony przyrządu przed przepięciami w sieci zasilającej służy warystor VR1. Cienka ścieżka na płytce drukowanej pomiędzy przewodem sieciowym a transformatorem, dzielnikiem i warystorem pełni rolę bezpiecznika. Jumper JP1 służy do rozłączania transformatora od przewodów pomiarowych (sieciowych) podczas kalibracji watomierza napięciem stałym.

Grzegorz Gajewski
gayos@interia.pl

Wzory płytek drukowanych w formacie PDF są dostępne w Internecie pod adresem: pcb.ep.com.pl oraz na płycie CD-EP12/2003B w katalogu PCB.