

MSP430: mikrokontrolery, które (prawie) nie pobierają prądu, część 8

Komparator analogowy

Mikrokontrolery z rodziny MSP430 znane są z dobrego wyposażenia w peryferia, w tym również peryferia rodem ze świata analogowego. Można tu znaleźć wzmacniacze operacyjne i komparatory napięcia a także specjalizowane bloki zawierające wzmacniacze operacyjne o regulowanym wzmocnieniu. W tym odcinku cyklu omówimy moduł Comparator A.

Blok ten występuje w większości mikrokontrolerów serii F1xx i F4xx. Komparator A to komparator napięcia, czyli specjalizowany wzmacniacz operacyjny służący porównaniu wartości napięć i wskazaniu w określony sposób napięcia wyższego (niższego).

Komparator analogowy musi charakteryzować się dużym wzmocnieniem napięciowym i niskim napięciem niezrównoważenia. Istotnym parametrem jest też czas reakcji i szybkość narastania zbocza na wyjściu. Poprawianie tych parametrów odbywa się kosztem liniowości pracy układu i to ukierunkowanie architektury jest tym, co odróżnia komparatory od wzmacniaczy operacyjnych.

Komparator wbudowany w mikrokontroler MSP430 nie odbiega właściwościami od swych scalonych odpowiedników, ale dzięki obudowaniu wieloma przydatnymi elementami i świetnemu zintegrowaniu z innymi modułami mikrokontrolera staje się

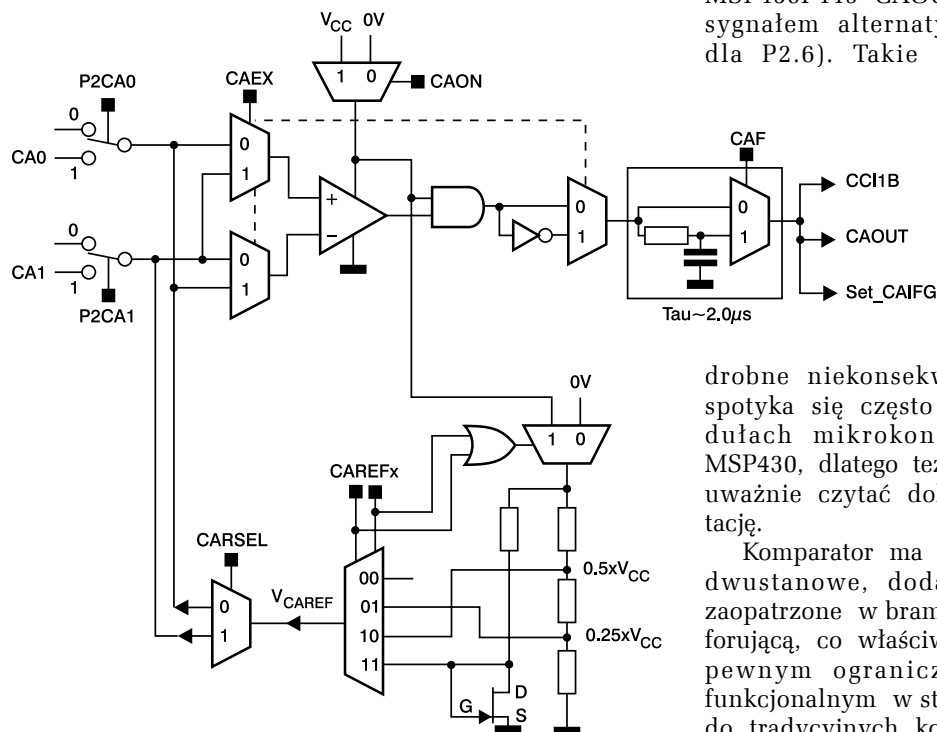
znakomitym narzędziem i może znaleźć zastosowanie w wielu różnorodnych aplikacjach.

Architektura modułu ComparatorA

Komparator A, podobnie jak każdy komparator analogowy i niemal każdy

wzmacniacz operacyjny, posiada wejście odwracające (-) i nieodwracające napięcie (+) oraz pojedyncze wyjście. Pod tymi pojęciami rozumiemy wejścia i wyjścia elementu porównującego napięcie, stanowiącego „serce” modułu. Wejścia te jednak nie są dostępne bezpośrednio na wyprowadzeniach mikrokontrolera (patrz rys. 22). Na zewnątrz są dostępne sygnały: CA0 i CA1 oraz wyjście CAOUT, od których do wnętrza mikrokontrolera prowadzi wiele multiplekserów i kluczy analogowych. Połączenie wejść CA0 i CA1 z wej-

ściami (+) i (-) komparatora jest włączane bitami $P2CA0$, $P2CA1$ w rejestrze $CACTL2$. Z kolei ustawienie bitu $CAEX$ w rejestrze $CACTL1$ powoduje zamianę wejść miejscami. Bity $P2CA0$ i $P2CA1$ jednocześnie przypisują wyprowadzeniu mikrokontrolera funkcje alternatywne do wyprowadzenia portu (w tym wypadku wejścia komparatora). Dzieje się tak bez dodatkowych operacji np. na rejestrze wyboru $P1SEL$. Włączenie wyjścia CAOUT wymaga natomiast dodatkowego ustawienia w rejestrze $P2SEL$ (w mikrokontrolerze MSP430F449 CAOUT jest sygnałem alternatywnym dla P2.6). Takie jak ta,



Rys. 22. Budowa modułu komparatora analogowego

drobne niekonsekwencje, spotyka się często w modułach mikrokontrolera MSP430, dlatego też warto uważnie czytać dokumentację.

Komparator ma wyjście dwustanowe, dodatkowo zaopatrzone w bramkę buforującą, co właściwie jest pewnym ograniczeniem funkcjonalnym w stosunku do tradycyjnych komparatorów. Układ posiadający

Tab. 4. Rejestry konfiguracyjne modułu komparatora analogowego ComparatorA

Nazwa rejestru			Funkcja rejestru			Adres	
CACTL1			Konfiguracyjny			0x59h	
CAEX	CARSEL	CAREFx	CAON	CAIES	CAIE	CAIFG	
CACTL2			Konfiguracyjny			0x5A	
			P2CA1	P2CA0	CAF	CAOUT	
CAPD			Odlączenie portów I/O			0x5C	
CAPD7	CAPD6	CAPD5	CAPD4	CAPD3	CAPD2	CAP1	CAPD0
BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0

List. 10. Listing programu realizującego komparator napięcia

```

P1DIR |= BIT0; // P1.0 jako wyjście
CAPD |= 0x08; // Disconnect port pins
CACTL1 = CARSEL + CAREF0 + CAON; // 0.25 Vcc do (-) komparatora
CACTL2 = P2CA0; // P1.6 - wejście (+) komparatora

while (1) // test działania komparatora
{ // sygnał z P1.0 jest zapetlony na wejście
  // komparatora
  if ((CAOUT & CACTL2))
  {
    P1OUT &=~ BIT0; // jeśli CAOUT = 1 to P1.0 = 0 (inwersja)
    delay();
  }
  else
  {
    P1OUT |= BIT0; // jeśli CAOUT = 0 to P1.0 = 1 (inwersja)
    delay();
  }
}
    
```

wyjście zdolne do przyjmowania stanów innych niż logiczne „0” i logiczne „1”, miałby zapewne szersze zastosowania (np. jako prosty wzmacniacz operacyjny), ale komparatora wbudowanego w MSP430 nie można w ten sposób użyć. Bramka wyjściowa ma możliwość negowania sygnału wyjścia. Sterowanie inwertera sprzężono ze sterowaniem multiplexserem przełączającym wejścia (+) i (-) komparatora i jest również realizowane przez bit *CAEX*. Mechanizm przełączania wejść i negacji wyjścia służy do eliminacji wpływu napięcia niezrównoważenia (potrafi być duże – do 30 mV) na wynik pracy komparatora, poprzez pro-

ste zanegowanie wyjścia komparatora. Mechanizmu tego łatwo używa się przy wielokrotnym porównaniu powtarzającego się sygnału (ale tylko wtedy, gdy ma on zawsze tę samą postać), gdzie dwukrotne wykonanie porównania, każdorazowo z innym ustawieniem, daje podstawy do korekcji (np. poprzez uśrednienie). Trzeba też pamiętać, że prawidłowe porównanie napięć zachodzi tylko pod warunkiem utrzymania ich wartości poniżej $V_{cc}-1$ [V]. Nie oznacza to, że na wejścia nigdy nie należy podawać napięć o wyższych wartościach. Napięcia mogą być wyższe, jeśli porównywanie ich wartości nie jest potrzebne. Komparator

charakteryzuje się pętlą histerezy wejścia o szerokości ok. 1 mV. Na wyjściu umieszczono dodatkowy blok filtru RC o stałej czasowej ok. 2 μ s, włączany bitem *CAF* (*CACTL2*).

Ponadto moduł komparatora posiada zintegrowane źródło napięcia odniesienia o przełączalnej wartości napięcia. Może to być napięcie proporcjonalne do napięcia zasilania (0,5 V_{cc} dla ustawienia $CAREF=[1,0]$ lub 0,25 V_{cc} dla [0,1]) lub napięcie o bezwzględnej wartości ok. 500 mV (dla $CAREF=[1,1]$). Źródłem napięcia referencyjnego jest proste złącze półprzewodnikowe, dlatego parametry stabilizacji względem napięcia zasilania i stabilności temperaturowej są kiepskie. Mimo to można go użyć jako odniesienie, np. do pomiaru własnego napięcia zasilania, co daje przyzwoite efekty. Napięcie referencyjne kierowane jest do wyprowadzeń CA0 lub CA1, w zależności od ustawienia bitu *CARSEL*.

Moduł komparatora włącza się bitem *CAON*. Warto poświęcić nieco uwagi ograniczeniu cza-

su włączenia komparatora – moduł pobiera ok. 50 μ A, dlatego warto wyłączać go, jeśli nie jest używany.

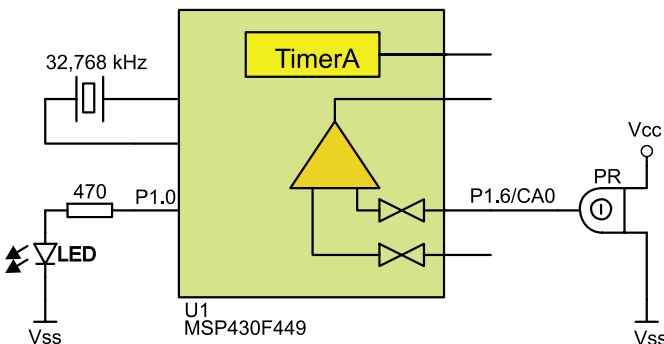
Stan wyjścia komparatora jest reprezentowany przez bit *CAOUT* w rejestrze *CACTL2*. W chwili zmiany stanu wyjścia komparatora, tj. wystąpienia zbocza o kierunku wyznaczonym przez bit *CAIES*, ustawiana jest flaga *CAIFG* w rejestrze *CACTL1*, a jeśli ustawiony jest bit przyzwolenia na przerwanie *CAIE*, nastąpi przejście do obsługi przerwania o wektorze *COMPATORA_VECTOR* (adres wektora 0xFF6).

Wyjście komparatora jest sprzężone z modułem licznika *TimerA* i może generować impuls wyzwalający operacje pomiaru czasu przez wbudowane w *TimerA* rejestry komparujące (*capture/compare*).

Poza strukturą modułu, a dokładnie w modułach portów I/O (dotyczy to portów P1 i P2) wprowadzono jeszcze klucze umożliwiające całkowite odłączenie bufora wejściowego portu od wyprowadzenia zewnętrznego. Ma to związek ze zjawiskiem obserwowanym w układach CMOS, gdy napięcie wejściowe jest zbliżone do 0,5 V_{cc} . W takim wypadku obydwa tranzystory MOS pary komplementarnej są częściowo otwarte, co zwiększa pobór prądu w sposób niekontrolowany. Odlączenie wyprowadzeń CA0, CA1 i CAOUT wykonuje się z użyciem bitów sterujących w rejestrze *CAPD*.

Eksperyment pierwszy – komparator napięcia

Wszystkie opisane poniżej eksperymenty wykonano z życiem płytki ewaluacyjnej Demo449 (opis w EP 12/2007). Pierwszy eksperyment pozwala użyć komparatora w tradycyj-



Rys. 23. Schemat połączeń dla komparatora napięcia

ny sposób, jako układu porównującego wartości dwóch napięć. W tym wypadku porównywane jest napięcie podane na wejście CA0 działające jako wejście (+) komparatora z podanym na wejście (-) napięciem referencyjnym.

Konfiguracja komparatora obejmuje wybór rodzaju referencji i miejsca jej dołączenia (bit *CARSEL*) oraz włączenie komparatora. Potem następuje połączenie wejścia (+) z wyprowadzeniem CA0.

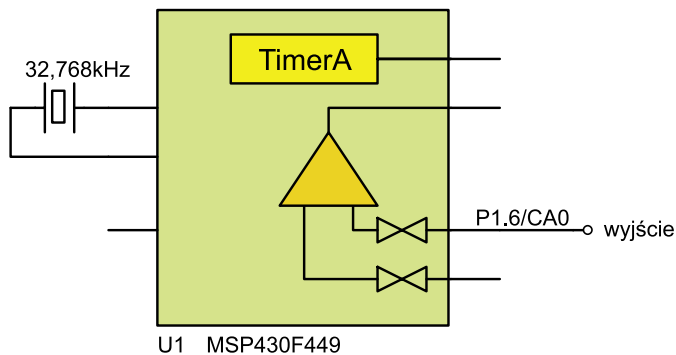
Operacja przypisania wyprowadzenia powinna właściwie być wykonywana jako pierwsza. Należy unikać pozostawienia wejścia komparatora bez podłączenia do obwodów zewnętrznych, by uniknąć jego niekontrolowanego przełączania, jednak w tak prostym eksperymencie nie ma to większego znaczenia.

Kolejny fragment programu ustala stan portu P1.0 w zależności od wyniku komparacji. Po uruchomieniu programu należy na wyprowadzenie P1.6 (CA0) podać napięcie np. potencjometru, by zaobserwować zmiany stanu linii P1.0 (oraz stan sygnału CAOUT w debuggerze). Do portu P1.0 można dołączyć diodę LED by obserwować działanie komparatora. Dodatkowo sygnał portu P1.0 można podłączyć bezpośrednio do P1.6 (CA0). W takim wypadku do obserwacji działania komparatora nie jest potrzebne podanie napięcia z potencjometru – układ będzie się samoczynnie przełączał.

List. 11. Listing programu generatora napięć odniesienia

```

Init_sys();
CAPD |= 0x08; // Disconnect port pins
CACTL2 = P2CA0; // P1.6 = +comp
while (1)
{
    CACTL1 = 0x00; //
    _BIS_SR(LPM0_bits);
    CACTL1 = CAREF0 + CAON; // 0.25*Vcc
    _BIS_SR(LPM0_bits);
    CACTL1 = CAREF1 + CAON; // 0.5*Vcc
    _BIS_SR(LPM0_bits);
    CACTL1 = CAREF1 + CAREF0 + CAON; // 0.5V
    _BIS_SR(LPM0_bits);
}
#pragma vector=BASICTIMER_VECTOR
interrupt void Basic (void)
{
    _BIC_SR_IRQ(LPM0_bits); // Clear LPM0 bits from 0 (SR)
}
    
```



Rys. 24. Schemat połączeń dla generatora napięcia odniesienia.

Eksperyment drugi – napięcia odniesienia

Drugi przykład pokazuje, jak użyć wbudowanego w moduł komparatora źródła referencyjnego jako źródła napięcia odnie-

sienia dla zewnętrznych układów (rys. 24).

Przykładowy program (list. 11) pozwala wyprowadzić napięcie referencyjne na wyprowadzenia P1.6 (CA0) a potem cy-

klicznie zmienia napięcie uzyskując przebieg schodkowy. Ponownie, do uruchomienia układu potrzebne są dwie proste operacje.

Warto zwrócić uwagę na konstrukcję pętli *while*, w której umieszczono szereg poleceń wprowadzenia trybu obniżonego poboru mocy (tutaj LPM0). W połączeniu z cyklicznym przerywaniem od zegara *Basic Timer*, stanowią one elegancką i energooszczędną alternatywę pętli oczekiwania.

**Mariusz Kaczor
Contrans TI**

Moduł ComparatorA+

W mikrokontrolerach serii MSP430F2xx moduł komparatora napięcia został unowocześniony. Najbardziej widoczna zmiana w nowym module, nazwanym *ComparatorA+*, to zwiększenie liczby wejść komparatora do 7 i wprowadzenie dwóch multiplexerów, z których jeden może wybrać dowolne wejście z zakresu CA0 do CA2, natomiast drugi dowolne wejście z zakresu CA0 do CA7. Przyniosło to zmiany w sposobie sterowania komparatorem przez rejestr konfiguracyjny CACTL2. Bity P2CA0 i P2CA4 sterują binarnie wyborem wejścia dla pierwszej grupy, a bity P2CA1, P2CA2 i P2CA3 wybierają wejście z drugiej grupy. Poza tym wprowadzono możliwość zwarcia wejść komparatora (bit CASHORT). Zachowano możliwość zamiany miejscami połączeń wyprowadzeń (+) i (-) z użyciem bitu CAEX. Parametry takie jak napięcie niezrównoważenia, czy precyzja referencji nie uległy zmianie.

Tab. Rejestry konfiguracyjne modułu komparatora analogowego ComparatorA+

Nazwa rejestru		Funkcja rejestru				adres	
CACTL2		konfiguracyjny				0x5A	
CASHORT	P2CA4	P2CA3	P2CA2	P2CA1	P2CA0	CAF	CAOUT
BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0

eMeSpEk 430

Czytelników zainteresowanych mikrokontrolerami MSP430 zachęcamy do udziału w konkursie (piszemy o nim na str. 8) i odwiedzenia targów Automaticon 2008, podczas których będzie można otrzymać komputerkę z mikrokontrolerem MSP430F1232 (egzemplarz modelowy widoczny na zdjęciu obok).

Oprócz mikrokontrolera wyposażonego w 8 kB + 256 B pamięci Flash i 256 B pamięci RAM, komputerkę wyposażono w dwa źródła sygnałów zegarowych, dwa mikroprzełączniki, interfejs RS232, złącze JTAG, złącze USB (do zasilania), stabilizator napięcia 3,3 V, głośnik piezoceramiczny, gniazdo baterii 3 V oraz złącze wyświetlacza LCD 2 x 16 znaków ze sterownikiem 44780. Wszystkie linie I/O wyprowadzono na złączka szpilkowe.

Opis budowy komputerka wraz ze szczegółowym wykazem nagród publikujemy na stronie 73.

