

AVR-owe „fusy”

Sygnal zegarowy – wiadomości podstawowe

Sygnal zegarowy jest dla procesora tym, czym dla nas bicie serca. Powoduje, że procesor w ogóle funkcjonuje. Często jednak zdarza się, że sygnał zegarowy doprowadzany z zewnątrz ma inną częstotliwość niż sygnał wewnętrzny, sterujący pobieraniem i realizacją przez CPU poleceń. W związku z tym wprowadzono dwa pojęcia: cykl zegarowy i cykl maszynowy. Ten pierwszy jest po prostu odwrotnością częstotliwości generatora zegarowego. Ten drugi uzyskuje się w wyniku uwzględnienia ewentualnych wewnętrznych podziałów sygnału zegarowego. Bardzo dobrym przykładem jest popularny mikrokontroler 8051, który w podstawowym wykonaniu ma cykl maszynowy 12-krotnie dłuższy, niż cykl zegarowy. Również, chociaż nastawa domyślna jest inna, procesor AVR może mieć cykl maszynowy różny od zegarowego. Będzie o tym mowa w dalszej części artykułu.

Pojęcia cyklu maszynowego nie należy utożsamiać z czasem realizacji instrukcji. W pewnych przypadkach



może tak być, jednak w większości popularnych mikrokontrolerów, realizacja pojedynczej instrukcji zajmuje od dwóch do kilku cykli maszynowych i od 8 do kilkudziesięciu cykli zegarowych.

Mikrokontroler AVR większość instrukcji wykonuje w czasie pojedynczego cyklu zegarowego. Jego nowoczesna konstrukcja jest jednym z przykładów, gdy cykl zegarowy jest równy cyklowi maszynowemu. Jak łatwo wywnioskować, im szybszy jest zegar procesora, tym więcej instrukcji jest on w stanie wykonać w jednostce czasu. Można z tego twierdzenia korzystać, jeśli porównuje się procesory o identycznych lub

Artykuł jest przeznaczony przede wszystkim dla Czytelników początkujących w dziedzinie mikrokontrolerów. Opisano w nim różnice pomiędzy cyklem zegarowym i cyklem maszynowym oraz opcje nastaw źródeł sygnału zegarowego (sprawiającą często kłopoty konfigurację bezpieczników konfiguracyjnych, tzw. fuse'ów) w procesorach AVR. Przedstawiono wady i zalety różnych rozwiązań, wskazano także potencjalne przyczyny problemów oraz sposoby radzenia sobie z nimi.

bardzo zbliżonych architekturach. Dla różnych architektur wynik porównania może być diametralnie różny.

Wybór źródła sygnału zegarowego

Konstrukcja mikrokontrolerów AVR umożliwia wybór różnych metod generowania sygnału zegarowego. Można używać zewnętrznego generatora, rezonatora kwarcowego lub ceramicznego, niektóre z układów posiadają wewnętrzny generator, którego częstotliwość może być ustalana za pomocą elementów RC dołączanych z zewnątrz lub wbudowanych w strukturę mikrokontrolera.

Zewnętrzny generator zegarowy to nic innego jak dołączane z zewnątrz

Cykl zegarowy to okres wytwarzanego na bazie rezonatora kwarcowego, elementów RC itp. sygnału zegarowego. Można go obliczyć jako odwrotność częstotliwości generatora zegarowego.

$$\text{cykl zegarowy} = 1/F_{\text{GEN}}$$

Cykl maszynowy to okres wewnętrznego sygnału zegarowego. Oblicza się go po uwzględnieniu wewnętrznych podziałów częstotliwości sygnału zegarowego. W mikrokontrolerze AVR cykl maszynowy = cyklowi zegarowemu.

$$\text{cykl maszynowy} = \text{wewnętrzny podział} \times 1/F_{\text{GEN}}$$

Dla uproszczenia porównań różnych procesorów wprowadzono pojęcie *mocy obliczeniowej*, dla której zwykle się używać jednostki zwanej MIPS. 1 MIPS to nic innego, jak 1 milion operacji na sekundę. W związku z tym, że w mikrokontrolerze AVR cykl maszynowy jest równy cyklowi zegarowemu, AVR taktowany sygnałem o częstotliwości 8 MHz ma moc obliczeniową w przybliżeniu równą 8 MIPS. Standardowy 8051, przy takich samych parametrach sygnału zegarowego, ma moc obliczeniową około 0,667 MIPS.

źródło sygnału o poziomach takich, jakich wymaga mikrokontroler. Może być zbudowany z użyciem elementów TTL lub CMOS, może być również gotowym, zapewniającym bardzo wysoką stabilność częstotliwości doprowadzanego sygnału (np. z własną stabilizacją termiczną oraz stabilizacją napięcia zasilającego) modułem generatora zegarowego.

Sygnał z zewnętrznego generatora musi być doprowadzony na nóżkę oznaczoną jako XTAL1 (rys. 1). Nóżkę XTAL2 pozostawia się w takim przypadku niepodłączoną. Zewnętrzny sygnał zegarowy powinien mieć bardzo krótkie czasy zboczy (do kilkudziesięciu ns) i w celu zapewnienia stabilnej pracy mikrokontrolera musi mieć czysty kształt prostokątny.

Rezonator kwarcowy dołączany z zewnątrz to jedna z najczęściej wykorzystywanych metod taktowania mikrokontrolerów. Jej zaletą są właściwości samego rezonatora, to jest duża stabilność generowanej częstotliwości w funkcji czasu oraz temperatury otoczenia przy jednocześnie umiarkowanej cenie. Rezonatory dostępne są w wielu rozmiarach i dla

różnych wartości częstotliwości. Na rys. 2 pokazano sposób dołączenia rezonatora kwarcowego. Mikrokontroler AVR posiada układ generatora wbudowany w strukturę. Kwarc dołącza się pomiędzy wyprowadzenia XTAL1 i XTAL2.

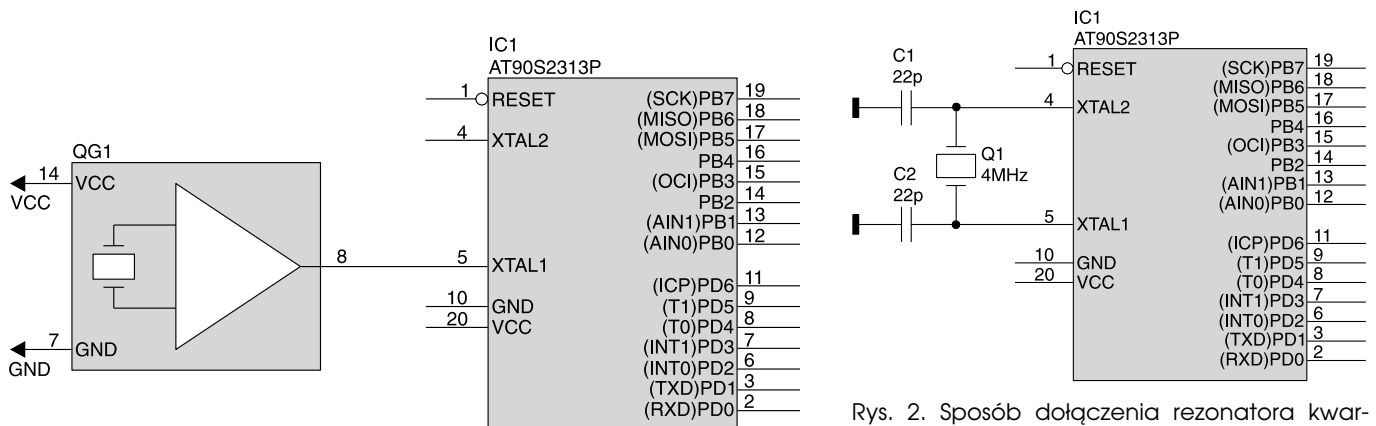
Jest to chyba jedna z najpowszechniej stosowanych metod generowania sygnału zegarowego. Stosując ją, nie można jednak zapominać o podstawowych właściwościach fizycznych i elektrycznych rezonatora. Bez żadnych problemów można kupić rezonator kwarcowy na pożądaną częstotliwość. Należy wybierać takie, które pracują z rezonansem równoległym. Jak wynika z rysunku, do poprawnej pracy wymagają one dodatkowo dwóch kondensatorów o pojemności (według materiałów firmy Atmel) $30\text{ pF} \pm 10\text{ pF}$. Każdy jest w stanie kupić kwarc i dołączyć go wraz z dwoma kondensatorami do mikrokontrolera. Nie ma w tym żadnego problemu. Otóż może się okazać, że pojemności dołączone do rezonatora są mimo wszystko problemem.

Rezonator kwarcowy do poprawnej, stabilnej pracy wymaga dołą-

czenia kondensatorów o ściśle określonych wartościach. Jak wspominałem wcześniej, ich wartość wynosi ok. 30 pF i jest porównywalna z wartościami wnoszonych, często szkodliwych, pojemności montażowych. Czasami może się zdarzyć, że po zmontowaniu układu oscylator kwarcowy nie startuje. Gdy zaczynamy poszukiwanie usterki i dotykamy wyprowadzeń mikrokontrolera np. sondą logiczną – ten w cudowny sposób „ożywa”. Po oddaleniu sondy i upływie bliżej nieokreślonego czasu – ponownie układ zamiera. W jaki sposób upewnić się, że przynajmniej teoretycznie dobraliśmy właściwe pojemności do stosowanego rezonatora?

Jeśli posiadamy kartę katalogową rezonatora, należy odszukać parametr o nazwie *Load Capacitance* (przykładowe parametry rezonatorów produkcji firmy CQ zestawiono w tab. 1). Może on być dla przykładu równy 20 pF. Oznacza to, że dla poprawnej pracy rezonator kwarcowy powinien mieć dołączoną pojemność o takiej wartości. Rezonator nie rozróżnia, czy jest to pojemność montażowa, czy dołączona celowo. W związku z tym nasuwa się jeden wniosek: wartość pojemności podana przez producenta rezonatora nie odpowiada wartości pojemności dołączanych kondensatorów. Powinno się również uwzględnić wnoszoną pojemność montażową wynikającą ze sposobu ułożenia ścieżek drukowanych, położenia punktów lutowniczych, prowadzenia mas, pojemności wejściowej doprowadzeń mikrokontrolera itp.

Typowo w układach amatorskich wartość tej dodanej pojemności waha się pomiędzy 6 a 10 pF. Uwzględniając powyższy opis, aby wyznaczyć właściwą wartość pojemności kondensatorów dołączanych do kwarcu,



Rys. 1. Dołączenie zewnętrznego generatora zegarowego

Rys. 2. Sposób dołączenia rezonatora kwarcowego do popularnego mikrokontrolera AT90S2313

Tab. 1. Parametry rezonatorów kwarcowych produkcji firmy CQ

Częstotliwość rezonansowa [MHz]	C_L [pF]	R_s [Ω]	Rezonans
1.8432	32	650	Częstotliwość podstawowa
2	32	650	
2.097152	32	550	
2.4576	32	350	
3	32	150	
3.2768	32	150	
3.57561	18	100	
3.57954	16	90	
3.58205	18	100	
3.58269	16	100	
3.6	30	100	
3.6864	20	100	
3.8392	15	100	
3.84	32	100	
3.848	15	100	
3.93216	20	100	
3.98	12	100	
3.9936	32	100	
4	20	100	
4.032	20	100	
4.096	16	100	
4.1943	12	100	
4.4336	16	80	
4.5	20	8080	
4.8	32	80	
4.9152	32	70	
5	32	60	
5.0688	32	50	
5.6448	32	50	
6	32	40	
6.144	32	40	
6.4	32	40	
6.5536	32	40	
7.159	20	40	
7.2	20	40	
7.3728	32	40	
7.68	32	40	
8	32	35	
8.192	20	35	
8.4672	20	35	
8.867238	20	35	
9.216	32	30	
9.6	32	30	
9.8304	32	30	
10	32	30	
10.24	18	30	
10.245	32	30	
10.7	32	30	
10.752	32	30	
11	32	30	
11.0592	32	30	
11.15	30	30	
11.503	20	30	
12	32	30	
12.288	32	30	
12.8	16	25	
13.875	32	30	
14	32	25	
14.1875	22	25	
14.318	32	25	
14.7456	32	25	
15	32	25	
15.36	32	25	
16	32	20	
16.9344	12	20	
17.472	32	20	
17.7344	32	20	
18	32	20	
18.432	32	20	
19.6608	32	20	
20	32	20	
22.1184	32	25	
24	32	25	
24.576	32	40	
26.601	18	50	
27	20	50	
27.095	20	50	
27.125	20	50	
27.145	20	50	
27.195	20	50	
28	32	50	
28.322	32	50	
29.4912	32	50	
32	32	50	
33.8688	20	50	
34.922	32	50	
35.2412	18	50	
36	32	50	
36.864	16	50	
40	32	50	
44.560	16	50	
45.470	16	50	
48	32	50	
49.86	32	50	

Częstotliwość podstawowa

3-harmoniczna

należy skorzystać z następującej zależności (uwzględnia ona wzajemne oddziaływanie na siebie pojemności):

$$C_x = 2 \times (C_L - C_M),$$

gdzie:

C_x - wartość pojemności dołączanej do kwarcu,

C_L - parametr *Load Capacitance*,

C_M - pojemność montażowa (średnio 8 pF).

Wykonajmy obliczenia dla podanych wyżej parametrów ($C_L = 20$ pF, $C_M = 8$ pF):

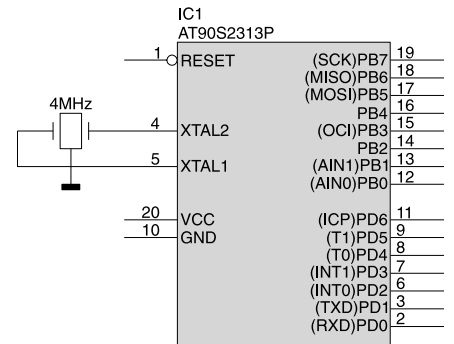
$$C_x = 2 \times (20 - 8) \text{ pF} = 2 \times 12 \text{ pF} = 24 \text{ pF}$$

Jak wynika z obliczeń, obie wartości pojemności dołączonych do mikrokontrolera powinny mieć wartość 24 pF. Może się jednak zdarzyć, że dysponujemy rezonatorem, o którym nie wiemy nic za wyjątkiem wydrukowanej na jego obudowie częstotliwości. Niestety w takiej sytuacji skazani będziemy na eksperymentowanie. Osobiście używam w takich przypadkach kondensatorów o pojemności około 27 pF przy częstotliwości do 8 MHz. Powyżej tej częstotliwości używam kondensatorów o pojemności 22 pF.

Powyższe informacje również należy traktować jako wskazówkę przy samodzielnym rozwiązywaniu problemów. Normalnie większość rezonatorów kwarcowych działa od razu po załączeniu zasilania, przy dołączonych pojemnościach z zakresu od 22 do 33 pF.

Ceramiczny rezonator o 2 wyprowadzeniach

Funkcjonalnie rezonator ceramiczny zbliżony jest do kwarcowego, z tym że jest znacznie tańszy. Konsekwencją ceny jest również jakość pracy, to jest stabilność i dokładność generowanej częstotliwości. W związku z tym nie zawsze będzie się on nadawał do taktowania pracą interfejsu asynchronicznego (UART), ale zależy to od jakości oferowanej przez danego producenta. Ma on jednak i swoje zalety. Rezonator ceramiczny nie jest tak delikatny jak kwarcowy i w związku z tym dobrze nadaje się do środowisk pracy, gdzie występują duże wibracje. Układ pracy rezonatora ceramicznego 2-wyprowadzeniowego jest identyczny, jak rezonatora kwarcowego, jednak wymaga dołączenia większych pojemności. Materiały firmy Atmel podają dla rezonatorów ceramicznych wartość 40 pF ± 10 pF.



Rys. 3. Sposób dołączenia zewnętrznego rezonatora ceramicznego

Rezonator ceramiczny o 3 wyprowadzeniach

Ma on identyczne właściwości, jak opisany poprzednik 2-wyprowadzeniowy. Różnica polega jedynie na tym, że ma wbudowane do wnętrza pojemności tak, że nie muszą być one dołączane z zewnątrz. Sposób dołączenia tego typu rezonatora pokazano na rys. 3. Przeważnie skrajne wyprowadzenia podłącza się odpowiednio do XTAL1 i XTAL2, a środkowe do masy. Jedną uwagę: ważne jest, aby masa była dołączona właściwie, wyprowadzenia XTAL1 i XTAL2 mogą być zamieniane.

Wewnętrzny generator RC

Jest on wbudowany w niektóre mikrokontrolery AVR z serii AT90 i wszystkie ATmega. Niektóre z AVR posiadają pojedynczy oscylator, podczas gdy inne mają aż cztery różne do wyboru. Zakres generowanych częstotliwości można ustawić w granicach od 4 do 9,6 MHz. W tab. 2

Tab. 2. Zestawienie mikrokontrolerów AVR wyposażonych w wewnętrzny generator RC

Nazwa mikrokontrolera	Częstotliwość generowana przez oscylator RC [MHz]
ATtiny12	1,2
ATtiny15	1,6
ATmega163	1,0
ATmega323	1,0
ATmega8	1,0; 2,0; 4,0; 8,0
ATmega16	1,0; 2,0; 4,0; 8,0
ATmega32	1,0; 2,0; 4,0; 8,0
ATmega64	1,0; 2,0; 4,0; 8,0
ATmega128	1,0; 2,0; 4,0; 8,0
ATmega8515	1,0; 2,0; 4,0; 8,0
ATmega8535	1,0; 2,0; 4,0; 8,0
ATmega162	8,0
ATmega169	8,0
ATtiny13	4,8; 9,6
ATtiny2313	4,0; 8,0
ATmega48	8,0

umieszczono zestawienie współcześnie produkowanych mikrokontrolerów AVR wyposażonych w oscylator RC.

Oscylator RC może być różny w różnych układach, ale we wszystkich spotkamy się z zależnością generowanej częstotliwości od wartości napięcia zasilającego mikrokontroler. Dlatego też w czasie produkcji wykonywana jest kalibracja oscylatora tak, aby zapewnić właściwą wartość generowanej częstotliwości przy zasilaniu napięciem 3,3 lub 5 V. Wewnętrzny generator można również kalibrować samodzielnie, ale mimo wszystko stabilność generowanej częstotliwości pozostawia nieco do życzenia. Na przykład producent zapewnia dokładność $\pm 10\%$, a wykonując kalibrację samodzielnie w pracującym układzie, w stabilnych warunkach zasilania można osiągnąć dokładność rzędu $\pm 1\%$. Niestety wartość częstotliwości będzie również wykazywać pewne fluktuacje w funkcji temperatury. Firma Atmel posiada znakomitą notę aplikacyjną mówiącą o sposobach użycia i kalibrowania oscylatora RC. Podane są w niej wszelkie zależności

i charakterystyki robocze. Zainteresowanych tematem odsyłam do lektury AVR053 (<http://www.atmel.com/>).

Aby włączyć wewnętrzny generator RC, należy ustawić odpowiedni bezpiecznik konfiguracyjny (*fuse*). Wiele ze sprzedawanych układów ma ten bit ustawiony już w momencie produkcji. Często można dzięki temu spotkać na grupach dyskusyjnych pytania w rodzaju: „Dołączyłem zewnętrzny kwarc 10 MHz, a układ pracuje o wiele wolniej. Co się dzieje?”. Należy upewnić się, że bit opcji generatora ma właściwą wartość nastawy. Będzie o tym mowa dalej.

Wobec tak licznych możliwości taktowania pracą mikrokontrolera pojawić się może pytanie: jak dobrać właściwy rodzaj generatora do konstruowanej aplikacji? To nie takie trudne, jak może się początkowo wydawać. Jeśli wymagana jest bardzo duża dokładność generowanej częstotliwości, należy użyć zewnętrznego, specjalizowanego generatora. Opcja ta jest również bardzo wygodna wówczas, gdy mamy do czynienia z dużymi wartościami częstotliwo-

ści zegarowej. Praktycznie można ją polecić już od ok. 30 MHz wzwyż. Bardzo dużą dokładność i stabilność generowanej częstotliwości zapewnia również rezonator kwarcowy. Może nie aż tak dobrą, jak specjalizowany generator, ale wystarczającą dla większości popularnych zastosowań. Polecam go do stosowania zwłaszcza przy korzystaniu z transmisji asynchronicznej (UART, tj. RS232, RS485 itp.). Mniejszą dokładność, ale za znacznie niższą cenę zapewnia rezonator ceramiczny. Jego stosowanie upraszcza układ i obniża koszt, choć może nie nadaje się do układów elektroniki profesjonalnej. Zdecydowanie najtańsze i najprostsze w użyciu jest wykorzystanie generatora RC wbudowanego w strukturę AVR. Niezbyt stabilny, wymagający kalibracji, ale wystarczający do zastosowania np. w zabawce, termometrze, czujce alarmowej i innych niezbyt wymagających, jeśli patrzeć na nie pod kątem rygorów czasowych, aplikacjach mikrokontrolera.

Jacek Bogusz, EP
jacek.bogusz@ep.com.pl