Piotr MAKLES
Zakład Elektronicznych Urządzeń Pomiarowych POZYTON

doi:10.15199/48.2020.12.05

Praktyczne układy kalibracji zegarów czasu rzeczywistego.

Streszczenie. *W artykule opisano budowę oraz podstawowe parametry układów zegarów czasu rzeczywistego stosowanych w urządzeniach elektronicznych. Przedstawiony został wpływ rozwiązań konstrukcyjnych i elementów elektronicznych na dokładność pomiaru czasu. Opisane zostały sposoby kalibracji stosowane w układach różnych producentów oraz przykład kalibracji zegarów z wykorzystaniem taniego układu NCD2400, zawierającego w swojej strukturze cyfrowo sterowane kondensatory.*

Abstract*. In the article construction and basic parameters of real-time clocks used in electronic devices has been described. The influence of design solutions and electronic components on the accuracy of time measurement has been presented. The calibration methods used in the chips of various manufactures and an example of real-time clock calibration using the NCD2400 chip with includes digital controlled capacitors in its structure has been described. (**Practical real-time clock calibration systems**).*

Słowa kluczowe: zegar czasu rzeczywistego, dokładność odmierzania czasu, kalibracja zegarów, generator kwarcowy.
Keywords: real-time clock, accuracy of time, clock calibration, quartz generator.

Wstęp

Większość obecnie produkowanych elektronicznych urządzeń pomiarowych, umożliwiających rejestrację zmierzonych wielkości, zapisuje dane pomiarowe z tzw. znacznikiem czasu. Znacznik ten zawiera dokładną informację o dacie i godzinie rejestracji, ułatwia więc późniejszą analizę danych pomiarowych. Do pomiaru czasu stosuje się zegary czasu rzeczywistego (ang. RTC - Real-Time Clock), których parametry decydują o dokładności odmierzanego czasu.

Dokładność odmierzania czasu w układach zegarów czasu rzeczywistego uzależniona jest od parametrów zastosowanego wzorca częstotliwości, czyli generatora taktującego wewnętrzne liczniki zegara. Wszystkie rozwiązania generatorów zegarów wbudowanych w strukturę, obecnie produkowanych mikrokontrolerów, współpracują z zewnętrznymi rezonatorami kwarcowymi. Nie stosuje się wstępnej kalibracji dokładności na etapie produkcji mikrokontrolera, wymagana jest więc kalibracja zegara gotowego urządzenia. Najczęściej polega ona na pomiarze częstotliwości generatora, za pomocą częstościomierza i obliczenia nastaw rejestrów konfiguracyjnych. Można też wykorzystać stabilny przebieg referencyjny o znanej częstotliwości i na jego podstawie obliczyć wymagane nastawy rejestrów.

Poniżej przedstawiono przykłady sposobów zwiększenia dokładności nowoczesnych układów RTC, stosowanych przez różnych producentów zarówno w mikrokontrolerach jak i niezależnych układach scalonych.

- ***Zastosowanie generatorów kwarcowych współpracujących z zewnętrznym rezonatorem o częstotliwości 32,768 kHz (tzw. kwarc zegarkowy).***

  Często stosowane są trymowane przez producenta kondensatory obciążenia rezonatora kwarcowego wewnątrz układu scalonego, co wymusza stosowanie określonych typów rezonatorów. Dokładność odmierzania czasu zależy jednak od tolerancji oraz od pojemności pasożytniczych połączeń zewnętrznych wyprowadzeń rezonatora. Przykładem nowoczesnego układu zegara czasu rzeczywistego zawierającego w swojej strukturze kondensatory obciążenia jest układ MAX31341 [1] produkowany przez firmę Maxim Integrated. Wewnętrzna pojemność obciążenia wynosi 6 pF i wymaga zastosowania zewnętrznego rezonatora kwarcowego dostosowanego do pracy z taką pojemnością.
- **Zmienna pojemność obciążenia rezonatora kwarcowego.**
  Rozwiązanie stosowane wewnątrz mikrokontrolerów wyposażonych w zegar czasu rzeczywistego, polegające na możliwości zmiany pojemności wbudowanych kondensatorów za pomocą rejestrów konfiguracyjnych mikrokontrolera. Rozwiązanie to można spotkać w układach wielu producentów. Układy rodziny Kinetis K2x [2], produkowane przez firmę NXP, umożliwiają np. załączenie obciążenia rezonatora kondensatorami o wartościach 16 pF, 8 pF, 4 pF oraz 2 pF.
- **Rezonator kwarcowy wbudowany wewnątrz obudowy układu zegara RTC.**
  Rozwiązanie stosowane tylko w przypadku układów zewnętrznych, podłączanych do mikrokontrolera. Układy są kalibrowane przez producenta co zapewnia dużą dokładność pomiaru czasu. Niektóre układy zapewniają dodatkowo kompensację wpływu temperatury na częstotliwość pracy generatora. Rozwiązanie zapewniające dużą dokładność odmierzania czasu (lepiej niż 0,3 s/dobę). Układy DS3234 [3] produkcji Maxim Integrated oraz RX8900 [4] produkcji Epson są przykładami zegarów czasu rzeczywistego z wbudowanym rezonatorem kwarcowym oraz układem korekcji wpływu temperatury na dokładność pomiaru czasu. Deklarowana przez producenta układu DS3234 dokładność jest lepsza niż ±0,3 s/dobę w zakresie temperatur od -40 °C do +85 °C. Układ RX8900 jest produkowany w 2 wersjach o dokładności ±0,3 s/dobę oraz ±0,4 s/dobę. Charakteryzuje się on znacznie mniejszym niż DS3234 prądem zasilania wynoszącym typowo 0,7 uA przy napięciu 3V.

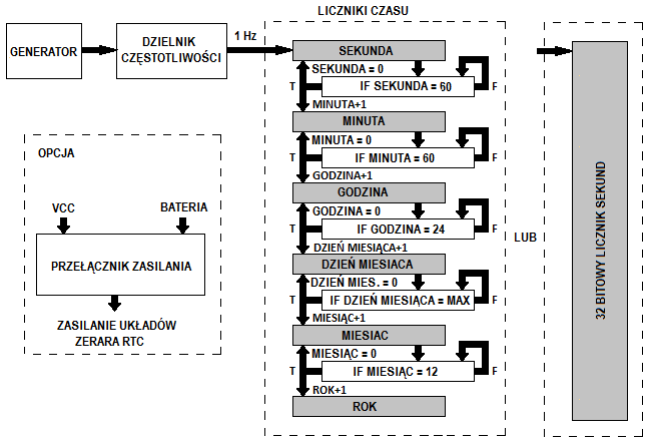
- **Zastosowanie generatora MEMS (ang. microelectromechanical system).**
  Generatory wykonane w technologii MEMS posiadają podobne parametry jak wbudowany rezonator wewnątrz układu scalonego. Przykładem układu z wbudowanym generatorem MEMS jest element o oznaczeniu MAX31343 [5] charakteryzujący się dokładnością pomiaru czasu lepszą niż ±0,4 s/dobę.
- **Dzielnik częstotliwości o zmiennym współczynniku podziału.**
  W tej metodzie kalibracji podział częstotliwości generatora zegara RTC należy tak ustawić, aby przebieg taktujący liczniki odmierzające czas wynosił dokładnie 1s. Taki sposób korekcji jest zastosowany np. w mikrokontrolerach serii STM32F10x [6] firmy ST. W układach znajduje się 32 bitowy licznik pełniący rolę zegara czasu rzeczywistego. Licznik ten jest sterowany za pomocą 20-bitowego preskalera który umożliwia dobranie częstotliwości tak, aby licznik odmierzał czas z interwałem czasowym równym 1 s.

- **Układ logiczny, który dodaje lub odejmuje sekundę co określony czas, wynikający z błędu spowodowanego niedokładnością generatora**.
  W rozwiązaniu tego typu należy obliczyć co jaki czas trzeba skorygować wartość licznika sekund i obliczoną wartość wpisać do odpowiedniego rejestru. W mikrokontrolerach Kinetis K2x, oprócz wspomnianej wcześniej możliwości zmiany pojemności obciążenia rezonatora kwarcowego, zastosowano również możliwość korekcji co określony czas licznika sekund. W podobny mechanizm korekcji wyposażone są również zewnętrzne zegary produkowane przez różnych producentów np. układy MCP7940x [7] produkowane przez firmę Microchip.
- **Taktowanie liczników zegara za pomocą sygnału 1PPS (ang. One Pulse Per Second) pochodzącego ze stabilnego źródła.**
  Sygnał 1PPS może pochodzić z odbiornika GPS lub generatora rubidowego, co zapewnia bardzo dużą precyzję pomiaru czasu. Wadą rozwiązania jest znaczny koszt. Przykładem układu RTC z możliwością taktowania sygnałem 1PPS jest wymieniony wcześniej układ MAX31341.

Budowa zegarów czasu rzeczywistego

Zegary czasu rzeczywistego produkowane są w postaci niezależnych układów scalonych lub są wbudowane w strukturę mikrokontrolera. Zewnętrzny układ podłączany jest do mikrokontrolera za pomocą interfejsu komunikacyjnego takiego jak SPI, I^2C lub równoległego.

Schemat blokowy zegara czasu rzeczywistego przedstawia rysunek 1. Podstawowy układ zegara składa się z szeregu liczników oraz komparatorów sterujących pracą poszczególnych liczników. Wszystkie produkowane zewnętrzne układy RTC zawierają w swojej strukturze niezależne liczniki zliczające sekundy, minuty, godziny, dni tygodnia, dni miesiąca, miesiące, oraz lata. Dodatkowo układy te mogą zawierać wiele różnych funkcji, jak na przykład: korekcję lat przestępnych, rejestry zapisujące datę oraz czas wystąpienia jakiegoś zdarzenia (np. zmianę stanu na końcówce wejściowej układu) lub podtrzymywaną bateryjnie pamięć RAM. W zegarach znajdujących się wewnątrz struktury mikrokontrolerów, zamiast niezależnych liczników, można spotkać jeden 32 bitowy licznik zliczający sekundy od ustalonej daty. Obliczenie daty oraz czasu należy więc w tym przypadku wykonać programowo na podstawie ilości sekund zliczonych przez ten licznik.



Rys.1. Schemat blokowy układu zegara czasu rzeczywistego.
T - wynik porównania „prawda" F – wynik porównania „fałsz".

Większość układów zegarów RTC zarówno zewnętrznych, jak i wbudowanych w strukturę mikrokontrolera posiada dwa wejścia zasilania. Zasilanie główne (VCC na rysunku 1) oraz bateryjne, do którego należy podłączyć baterię lub kondensator o dużej pojemności. W przypadku braku zasilania głównego przełącznik zasilania powoduje automatyczne przełączenie na zasilanie bateryjne umożliwiając poprawne odmierzane czasu. Dodatkowo niektóre obwody wewnętrzne, mogą zostać przełączone w tryb obniżonego poboru mocy, co zmniejsza prąd baterii. Wyłączane są również interfejsy komunikacyjne.

Najczęściej stosowane generatory jako wzorzec częstotliwości wykorzystują rezonator kwarcowy o częstotliwości 32,768 kHz. Sygnał z generatora jest dzielony przez 2^{15} co daje przebieg o częstotliwości 1 Hz, który jest wykorzystywany przez liczniki zliczające czas. W nowoczesnych, zewnętrznych zegarach RTC stosowane są generatory wykonane w technologii MEMS. W porównaniu z generatorem kwarcowym generator MEMS charakteryzuje się następującymi zaletami [8]:

- duża odporność na udary i wibracje,
- lepsza stabilność długoterminowa,
- niewielkie wymiary w porównaniu z rezonatorem kwarcowym,
- prosty montaż w strukturze układu scalonego,
- prosta kompensacja temperaturowa,
- mniejszy koszt,
- większa odporność na wysokie temperatury występujące w procesie montażu układu,
- możliwość czyszczenia zmontowanych obwodów drukowanych za pomocą myjek ultradźwiękowych.

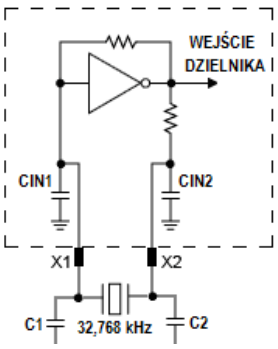
Rezonatory MEMS wykonane są z krzemu więc mogą być łatwo zintegrowane z logiką zegara RTC, a do wytwarzania struktur stosowana jest technologia używana w produkcji układów scalonych np. fotolitografia. Ponadto umieszczony w tej samej strukturze krzemowej czujnik temperatury zapewnia dokładny pomiar temperatury generatora, co umożliwia precyzyjną korekcję wpływu nagrzewania na częstotliwość pracy. Dużą zaletą jest również fakt niewielkiej, trwałej zmiany częstotliwości w przypadku szoku termicznego jaki może wystąpić w procesie lutowania układu. Jak podaje firma Maxim Integrated [8] trwała zmiana częstotliwości, generatora MEMS zegara RTC, w przypadku oddziaływania wysokiej temperatury nie przekracza ±1ppm. Dla rezonatorów kwarcowych zmiana ta jest większa i może wynosić ±5ppm.

W obecnie produkowanych mikrokontrolerach nie są stosowane układy rezonatorów MEMS.

Dokładność odmierzania czasu

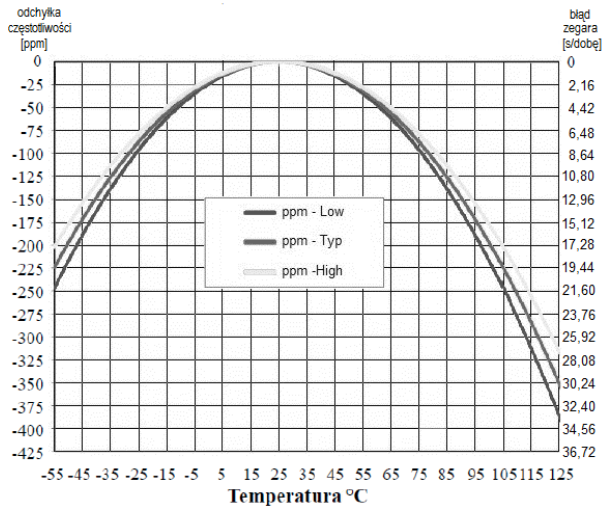
Schemat generatora kwarcowego, stosowanego w układach zegarów czasu rzeczywistego przedstawia rysunek 2. Dokładność odmierzania czasu zegarów RTC w głównej mierze zależy od parametrów rezonatora kwarcowego oraz od kondensatorów obciążenia generatora. Zaznaczone na schemacie kondensatory CIN1 oraz CIN2 reprezentują pojemności wewnętrzne układu generatora, natomiast kondensatory C1 i C2 są to pojemności dołączane na zewnątrz układu scalonego. Poprzez zmianę wartości tych elementów możliwa jest korekcja częstotliwości generatora. Większa wartość pojemności powoduje niższą częstotliwość oscylacji, co w konsekwencji prowadzi do wolniejszej pracy zegara. W niektórych typach układów pojemności wewnętrzne CIN1 oraz CIN2 są dobrane do konkretnego typu rezonatora kwarcowego. W praktycznych rozwiązaniach występuje jednak konieczność korekcji częstotliwości z powodu błędów dokładności odmierzania czasu wynikających z rozrzutu parametrów rezonatorów kwarcowych. Typowa tolerancja rezonatorów kwarcowych wynosi ±10 ppm lub

±20 ppm (ang. parts per milion - liczba części na milion) co daje maksymalny błąd dokładności odmierzania czasu odpowiednio ±0,865 s/dobę lub ±1,73 s/dobę. Dla wielu urządzeń pomiarowych jest to wartość zbyt wysoka. Na przykład norma PN-EN62054-21 [9], w której określono maksymalny błąd pomiaru czasu w licznikach energii elektrycznej wymaga, aby zegar licznika przy zasilaniu sieciowym posiadał dokładność lepszą niż ±0,5 s/dobę (±5,8ppm), oraz ±1,0 s/dobę (±11,6ppm) w przypadku zasilania z baterii podtrzymującej pracę zegara.



Rys.2. Schemat generatora kwarcowego.
CIN1, CIN2 pojemności wewnętrzne układu scalonego.
C1, C2 pojemności zewnętrzne generatora.

Częstotliwość pracy rezonatora kwarcowego silnie zależy od temperatury pracy. Nominalna częstotliwość w danych katalogowych jest zazwyczaj podawana dla temperatury 25 °C ±3°C. Na rysunku 3 zamieszczony został wykres zmiany częstotliwości pracy w zależności od temperatury rezonatora ABS07 produkcji Abracon Corporation [10]. Dodatkowo na wykresie zostały umieszczone wartości błędu w odniesieniu do doby.



Rys.3. Błąd dodatkowy zegara RTC spowodowany wpływem temperatury na rezonator kwarcowy.

Parametrem wpływającym na częstotliwość rezonansową jest również starzenie się elementów. Dla rezonatorów kwarcowych największa zmiana częstotliwości następuje w pierwszym roku pracy i jej maksymalna wartość nie przekracza ±3 ppm. Zmiana ta jest w dużym stopniu zależna od sposobu obróbki mechanicznej oraz montażu kryształu kwarcu wewnątrz obudowy. Pozostałe elementy wchodzące w skład generatora również podlegają procesowi starzenia, jednak ich wpływ na parametry całego układu jest niewielki. Dobrej jakości kondensatory COG wraz z upływem czasu zmieniają swoją pojemność nie więcej niż ±0,1 %, co przy pojemnościach rzędu 10 pF daje zmianę mniejszą niż 10 fF. Kondensatory te mają również niewielki dryft temperaturowy [11].

Przykład programowej korekcji wpływu temperatury na pracę generatora zegara RTC został opisany w pracy [12]. W ofercie firm produkujących zegary RTC można spotkać układy scalone, które mają wbudowany rezonator kwarcowy oraz układ kompensacji temperatury. Obwody kompensacji temperatury powodują jednak zwiększenie prądu zasilania układu, dlatego niektóre rozwiązania dokonują pomiaru i kompensacji co określony czas, np. co 1 minutę.

Kolejnym parametrem generatora kwarcowego, wpływającym na dokładność pracy zegara RTC jest wpływ napięcia zasilania na pracę generatora. Często napięcie VCC, zasilające zegar RTC ma wartość 3,3 V lub 5V, natomiast jako podtrzymanie pracy stosowana jest bateria alkaiczna o napięciu 1,5 V lub litowa 3V. Różne napięcia mogą być więc przyczyną zmiany parametrów pracy układów generatora, co w konsekwencji prowadzi do zmiany częstotliwości oscylacji. Autor spotkał mikrokontrolery, które przy zasilaniu napięciem 3,3V i kalibracji generatora zegara charakteryzowały się dokładnością lepszą niż ±0,2 s/dobę, natomiast w przypadku pracy z baterii o napięciu 3V błąd zwiększał się do wartość - 2,1 s/dobę.

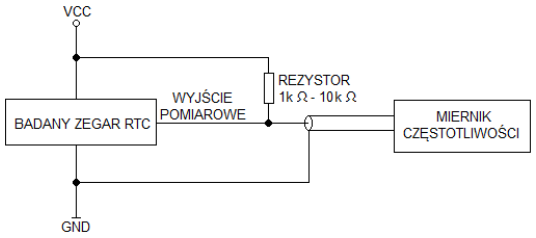
Rezonatory kwarcowe przeznaczone do pracy w układach zegarów czasu rzeczywistego produkowane są w wersjach współpracujących z różnymi pojemnościami obciążenia. Najczęściej spotykane wymagają zastosowania kondensatorów 6 pF lub 12,5 pF. Mniejsza pojemność obciążenia powoduje mniejszy pobór prądu, jednak taki rezonator jest mniej stabilny i bardziej podatny na zakłócenia. Aby zwiększyć dokładność pracy zegara należy więc stosować rezonatory współpracujące z pojemnością 12,5 pF wraz z odpowiednimi kondensatorami obciążenia. Dodatkowo w celu ograniczenia wpływu zakłóceń zewnętrznych należy zwrócić szczególną uwagę przy projektowaniu obwodu drukowanego i stosować się do następujących zaleceń:

- rezonator wraz z kondensatorami należy umieścić możliwie blisko wyprowadzeń układu scalonego,
- blisko wyprowadzeń oraz ścieżek obwodu rezonatora nie należy prowadzić ścieżek innych obwodów, zwłaszcza takich, w których występują sygnały cyfrowe o wysokich częstotliwościach,
- na warstwie umieszczonej poniżej obwodu rezonatora należy umieścić masę połączoną z wyprowadzeniem GND układu RTC, przelotka łącząca powinna znajdować się możliwie blisko wyprowadzenia układu scalonego,
- wyprowadzenia oraz ścieżki obwodu rezonatora należy otoczyć ścieżką ekranującą podłączoną do masy, zalecana szerokość ścieżki ekranującej nie powinna być mniejsza niż 1mm,
- nie należy lutować obudowy rezonatora kwarcowego (wysoka temperatura może powodować trwałą zmianę częstotliwości pracy rezonatora).

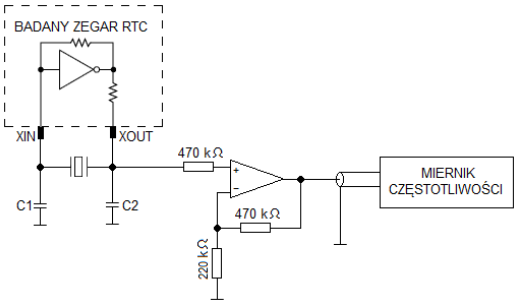
Kalibracja i pomiary

Pomiary dokładności pracy generatorów zegarów czasu rzeczywistego najwygodniej jest wykonać używając dokładnego miernika częstotliwości. Wiele zegarów RTC wyposażonych jest w dedykowane wyprowadzenie ułatwiające pomiar. Najczęściej jest to wyprowadzenie typu otwarty kolektor, które do poprawnego pomiaru wymaga zastosowania zewnętrznego rezystora podciągającego o wartości od kilku do kilkunastu kΩ. Schemat podłączenia miernika częstotliwości do takiego układu został pokazany na rysunku 4. Najczęściej na wyjściu pomiarowym

występuje przebieg prostokątny o częstotliwości rezonatora kwarcowego (32,768 kHz) lub taktujący liczniki zliczające czas (1 Hz). Aby można było dokonać pomiarów wiele układów wymaga odpowiedniego skonfigurowania: włączenie wyjścia pomiarowego, wybór częstotliwości. W przypadku układów, w których nie występuje wyjście pomiarowe lub nie jest dostępny sygnał pomiarowy przy pracy w trybie podtrzymania bateryjnego należy mierzyć częstotliwość na wyprowadzeniu rezonatora kwarcowego. Bezpośrednie podłączenie miernika częstotliwości do wyprowadzenia rezonatora kwarcowego spowoduje jednak duży błąd pomiaru lub nawet zatrzymanie pracy generatora. Należy więc zastosować sondę pomiarową, najlepiej aktywną, o dużej impedancji i małej pojemności wejściowej znacznie poniżej 1pF. Najlepszym jednak rozwiązaniem jest umieszczenie na płytce drukowanej badanego układu elementów sondy pomiarowej. Przykładowy schemat takiego układu jest przedstawiony na rysunku 5. Elementy układu pomiarowego należy umieścić możliwie blisko rezonatora kwarcowego zachowując wszystkie podane wcześniej zalecenia odnośnie projektu obwodu drukowanego. Ponieważ elementy sondy są na stałe umieszczone na płytce drukowanej obwody generatora pracują zawsze w identycznych warunkach.



Rys.4. Schemat układu do pomiaru częstotliwości generatora zegara RTC wyposażonego w wyjście pomiarowe.

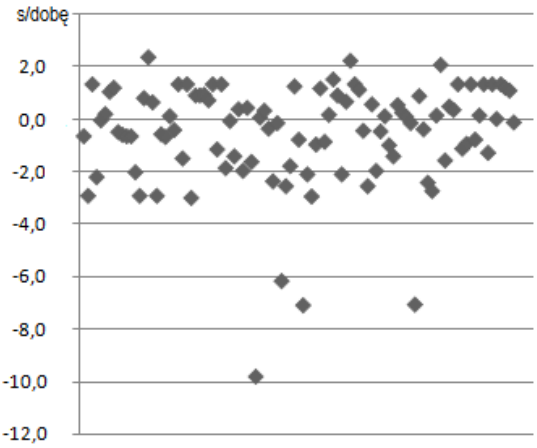


Rys.5. Przykładowy schemat sondy do pomiaru częstotliwości bezpośrednio z wyprowadzenia rezonatora kwarcowego.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów generatorów 100 zegarów sterujących pracą liczników energii elektrycznej. Częstotliwości generatorów mierzone były w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 4, następnie obliczone zostały błędy dokładności zegarów przedstawione na rysunku 6. Pomiary wykonane były w temperaturze odniesienia wynoszącej 23 °C ±3°C. Zegary RTC badanych urządzeń znajdują się wewnątrz struktury mikrokontrolera. Do zewnętrznych wyprowadzeń XIN oraz XOUT podłączone były rezonatory kwarcowe 32,768 kHz o tolerancji 10 ppm i pojemności obciążenia 12,5 pF. Jako zewnętrzne kondensatory obciążenia zastosowano kondensatory COG o pojemności 10 pF. Z wykresu wynika że rozrzut dokładności odmierzania czasu badanych urządzeń był nieakceptowalnie duży. Podczas badania układów zauważono również, że na rozrzut parametrów mają wpływ następujące elementy:

- tolerancja rezonatora kwarcowego,
- tolerancja pojemności kondensatorów obciążenia,
- tolerancja pojemności wewnętrznych układu scalonego (dwa różne układy scalone przylutowane do płytki zawierającej ten sam rezonator i kondensatory obciążenia różniły się dokładnością czasu dochodzącą do 2 s/dobę).

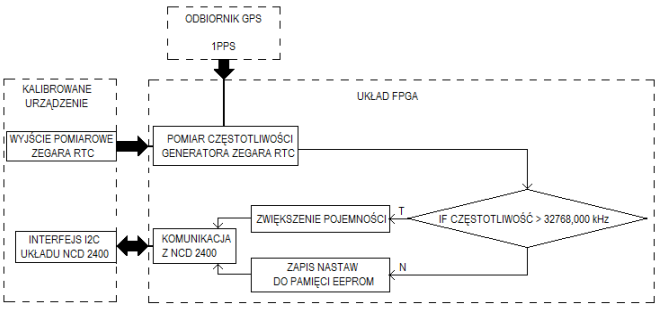
Aby umożliwić kalibrację czasu obwód drukowany wyposażony był w dodatkowe pady, do których w przypadku, gdy zmierzona częstotliwość generatora była za wysoka należało dolutować dodatkowe kondensatory o wartości od 1 do 4,7 pF. W przypadku, gdy częstotliwość była zbyt niska należało kondensatory wymienić na elementy o mniejszej pojemności. Zastosowana kalibracja poprzez dobór pojemności jest rozwiązaniem najprostszym oraz najtańszym. Jest to jednak proces czasochłonny, zważywszy, że po wymianie elementów (lutowanie) należy odczekać pewien czas, aby elementy osiągnęły temperaturę otoczenia.



Rys.6. Wyniki pomiarów generatorów RTC nie wyposażonych w układy kalibracji.

W celu poprawy dokładności pracy zegara czasu rzeczywistego oraz uproszczenia procesu produkcyjnego w nowej wersji urządzenia zastosowano dodatkowy układ do kalibracji zegarów. Kondensator obciążenia znajdujący się na wyjściu wzmacniacza generatora (C2 na rys. 2) został zastąpiony układem scalonym NCD2400. Układ ten w swojej strukturze zawiera sieć kondensatorów sterowanych cyfrowo. Dodatkowo układ posiada pamięć nieulotną typu EEPROM umożliwiającą zapamiętanie nastaw konfiguracyjnych w przypadku braku zasilania. Komunikacja z układem odbywa się z wykorzystaniem interfejsu szeregowego I^2C. Więcej informacji na temat układu NCD2400 można znaleźć w [13]. Pojemność kondensatora C1 została tak dobrana, aby przy domyślnych nastawach rejestrów NCD2400 częstotliwość pracy generatora była nieco większa od wymaganej 32,768 kHz. Kalibracja polega na załączaniu kolejnych sekcji NCD2400, aż do uzyskania właściwej częstotliwość pracy. Ze względu na brak możliwości podłączenia układu do mikrokontrolera sterującego oraz brak możliwości zmiany programu wewnętrznego produkowanego urządzenia, zbudowane zostało stanowisko do kalibracji, którego schemat pokazany jest na rysunku 7. W kalibratorze zastosowano układ FPGA, w strukturze którego zaimplementowany został miernik częstotliwości, logika obliczająca nastawy pojemności układu NCD2400 oraz interfejs komunikacyjny z tym układem. Jako wzorzec częstotliwości wykorzystany został sygnał 1PPS odbiornika GPS. Sygnał ten ma częstotliwość

równą 1 Hz i charakteryzuje się dużą dokładnością oraz stabilnością. Zmierzona za pomocą miernika częstotliwości odchyłka sygnału 1PPS nie przekraczała ±0,000001 Hz. Zastosowanie do kalibracji zegara RTC układu scalonego, zawierającego w swojej strukturze sterowane cyfrowo kondensatory, takiego jak NCD2400 jest rozwiązaniem autorskim niespotykanym w literaturze.



Rys.7. Schemat stanowiska do kalibracji zegarów RTC wyposażonych w układ NCD2400.

Eksperymentalna weryfikacja działania opisanego rozwiązania

Kalibracja generatorów znacznie poprawiła dokładność zegarów czasu rzeczywistego. Zmierzona w czasie kalibracji odchyłka nie przekracza ±0,05 s/dobę. Niestety rozwiązanie to nie uwzględnia błędu spowodowanego zmianą temperatury urządzenia, spełnione są jednak wymagania normy PN-EN62054-21 w zakresie dokładności pomiaru czasu zegarów w licznikach energii elektrycznej. Trzy egzemplarze skalibrowane w temperaturze 23 °C ±1°C poddano długookresowym pomiarom dokładności. Urządzenia zostały zsynchronizowane z wzorcem czasu i na 6 miesięcy umieszczone w pomieszczeniu o temperaturze zmieniającej się w granicach +18 do +29 °C. Po tym czasie porównano ponownie dokładność zegarów z wzorcem i obliczono średni błąd w odniesieniu do doby, który dla wszystkich badanych egzemplarzy miał wartość dodatnią i nie przekraczał +0,2 s/dobę.

Opisany wyżej sposób kalibracji zegarów czasu rzeczywistego doskonale sprawdza się w urządzeniach pracujących w środowisku o niewielkich wahaniach temperatury względem punktu kalibracji. W przypadku gdy projektowane urządzenie ma pracować w środowisku o dużej zmianie temperatur otoczenia stosuje się układy kompensujące wpływ temperatury na częstotliwość rezonatora kwarcowego. W tego typu rozwiązaniach doskonale spisują się zewnętrzne zegary RTC zawierające w swojej strukturze rezonator kwarcowy. Ponieważ czujnik temperatury umieszczony jest blisko rezonatora w tej samej obudowie układu scalonego zapewnione jest bardzo dobre sprzężenie termiczne. Przykładem takiego elementu jest układ o oznaczeniu DS3234, dla którego producent deklaruje dokładność lepszą niż ±3,5 ppm (0,3 s/dobę) w zakresie temperatur od -40 °C do +85 °C.

Przeprowadzone badania długookresowej dokładności w środowisku o zmiennej temperaturze potwierdzają dużą stabilność temperaturową układu. Badane urządzenie, w którym zastosowano zegar RTC DS3234, zostało umieszczone w czarnej metalowej obudowie znajdującej się na zewnątrz budynku w nasłonecznionym miejscu. Mierzona w czasie badań temperatura wewnątrz obudowy zmieniała się w zakresie od -20 ºC do +45 ºC. Na początku pomiarów zegar RTC urządzenia został zsynchronizowany z zegarem odniesienia. Urządzenie pracowało nieprzerwanie przez okres 730 dni. Po tym czasie został odczytany zegar czasu rzeczywistego i porównany ze wzorcem. Błąd wynosił + 2 minuty 14 sekund co daje wartość średnią wynoszącą +0,18 s/dobę.

Wnioski

Dokładność odmierzania czasu przez zegary czasu rzeczywistego zależy od dokładności i stabilności generatora taktującego liczniki odmierzające czas. Największą dokładność zapewniają układy scalone z rezonatorem umieszczonym wewnątrz struktury oraz kompensacją częstotliwości w zależności od temperatury. Niestety takie rozwiązania są najdroższe. Zaproponowana w artykule metoda kalibracji z użyciem układu NCD2400 oraz zewnętrznego kalibratora jest niedrogim rozwiązaniem, umożliwiającym znaczną poprawę dokładności pracy zegarów czasu rzeczywistego do wartości odchyłki nie przekraczającej ±0,05 s/dobę. Rozwiązanie to nadaje się do zastosowania w urządzeniach zawierających specjalistyczne mikrokontrolery, w których nie ma możliwości wymiany mikrokontrolera na inny, wyposażony w zegar RTC z możliwością kalibracji. W nowo projektowanych urządzeniach pracujących w szerokim zakresie temperatur proponowane rozwiązanie można wzbogacić o pomiar temperatury i odpowiednią korekcję pojemności obciążenia rezonatora kwarcowego.

Autor: *Piotr Makles*
Zakład Elektronicznych Urządzeń Pomiarowych POZYTON Sp. z o.o. E-mail: p.makles@pozyton.com.pl

LITERATURA

[1] www. maximintegrated.com: MAX31341 Low-Curent, Real-Time Clock with I2C Interface and Power Management.
[2] www.nxp.com: KinetisK2x USB Microcontrollers based on Arm Cortex M4 Core.
[3] www.maximintegrated.com: DS3234 Extremely Accurate SPI Bus RTC with Integrated Crystal and SRAM.
[4] www5.epsondevice.com: RX8900 Real-Time clock module.
[5] www.maximintegrated.com: MAX31343 ±5ppm, I2C Real-Time Clock with Integrated MEMS Oscilator.
[6] www.st.com: RM0008 Reference manual.
[7] www.microchip.com: MCP79400 Battery-Backed I2C Real-Time Clock/Calendar with SRAM and EEPROM.
[8] www.maximintegrated.com: Accurate MEMS Real-Time Clocks 1st Edition.
[9] PN-EN 62054-21 Pomiary energii elektrycznej (prądu przemiennego). Sterowanie taryfami i obciążeniem. Część 21: Wymagania szczegółowe dotyczące zegarów sterujących.
[10] www.abracon.com ABS07 32,768 kHz SMD low profile crystal.
[11] www.avx.com COG (NPO) Dielectric General Specifications.
[12] Blazinsek I., Chowdhury A.: Enhancing the accuracy of standard embedded RTC module with random synchronization events and dynamic calibration. Przegląd Elektrotechniczny 11/2016.
[13] www.ixys.com NCD2400M Wide Capacitance Range, Non-volatile Digital Programmable Capacitor.
[14] www.renesas.com Application Note AN1400. ISL12022 RTC Accuracy Optimization Calibration Procedure.
[15] www.ti.com Implementing a Temperature Compensated RTC.
[16] www.iqdfrequencyproducts.com Quartz Crystal Aging.
[17] www.vectron.com Aging and Retrace in Oven Controlled Crystal Oscillators.
[18] Kumar A., Madan P. Oscillators: How to generate a precise clock source. Cypress Semiconductor 2013.
[19] Gheorge F.: Recommended Crystal for Microchip Stand-Alone real-Time Clock/Calendar Devices. Microchip Technology 2013.