

doi:10.15199/48.2017.08.10

Zwiększanie wydajności mikroprocesorów z wykorzystaniem informacji o otoczeniu

Streszczenie. W artykule autorzy przedstawiają system służący do praktycznej realizacji modelu kontroli temperatury układu scalonego uwzględniającego zmienne warunki otoczenia. Proponowany model umożliwi poprawę wydajności obliczeniowej układu scalonego, przy zachowanej stałej temperaturze pracy układu. Przedstawiona została fizyczna realizacja regulatora ΔT oraz wyniki działania systemu w odniesieniu do standardowego rozwiązania.

Abstract. In the article authors present a system for the practical implementation of the model of temperature control system, which takes into account the changing ambient conditions. The proposed solution improves performance of computing and maintains a constant operating temperature of the integrated circuit (microprocessor). The paper presents a physical realization of the ΔT control system and the computation performance of the system in relation to the standard solution. (**The microprocessors efficiency increasing using information about the environment**).

Słowa kluczowe: procesor, radiator, chłodzenie, regulator, wydajność

Keywords: processor, heat sink, cooling, control, performance, microprocessor throughput increase

Wprowadzenie

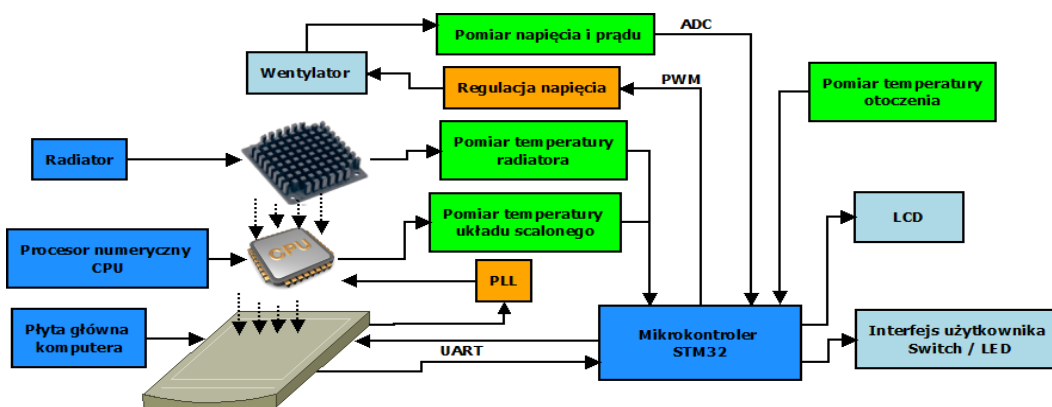
Obecnie zrealizowanych jest wiele algorytmów sterowania pracą układów scalonych w celu polepszenia ich wydajności. Większość rozważanych algorytmów opiera się na kontrolowaniu mocy procesora w zależności od zapotrzebowania na moc obliczeniową [1] oraz temperaturę układu. Każdy układ scalony generuje straty w postaci ciepła. Obecna miniaturyzacja układów scalonych powoduje generowanie dużej ilości ciepła w przeliczeniu na powierzchnię struktury [2]. Parametrem ograniczającym moc procesora jest jego temperatura. Ważnym elementem każdego systemu sterowania jest utrzymanie temperatury procesora na bezpiecznym poziomie przy jednoczesnej maksymalizacji wydajności układu scalonego [3-5]. Przedstawiony system sterowania ma na celu weryfikację praktyczną modelu opartego na sterowaniu pracą procesora za pomocą regulatora ΔT [1, 6, 7] oraz zbadanie możliwości zwiększenia maksymalnej wydajności procesora przy jednoczesnym zachowaniu stałej dopuszczalnej temperatury procesora. Do prawidłowego działania, proponowane rozwiązanie wymaga użycia dodatkowego czujnika temperatury wbudowanego w radiator. Implementacja algorytmu nie wymaga zmiany sprzętowej działającego układu scalonego, dzięki temu jest to uniwersalne rozwiązanie, łatwo implementowane w obecnych lub nowych układach scalonych.

Schemat blokowy proponowanego systemu

Obecnie stosowane systemy sterowania mocą układów

scalonych oparte są na pomiarze temperatury samego układu. W większości przypadków każdy z układów scalonych do prawidłowej pracy wymaga zastosowania dodatkowego układu chłodzącego w postaci radiatora lub radiatora połączonego z wentylatorem. Stosowanie dodatkowego radiatora powoduje, że układ złożony z procesora i radiatora posiada większą pojemność cieplną i jest mniej podatny na szybkie zmiany temperatury generowane przez układ scalony podczas zmiany jego wydajności. Dodatkowy radiator ze względu na swoją pojemność cieplną zwiększa czas reakcji procesora na zmianę warunków otoczenia. Czas reakcji układu scalonego na zmianę warunków otoczenia w takim przypadku został zdefiniowany jako TS [6]. Zastosowane rozwiązanie sterowania procesorem za pomocą regulatora ΔT pozwala dostarczyć informację o zmianie warunków otoczenia do procesora zanim zostanie to wykryte przez czujniki temperatury umieszczone w samym układzie scalonym. W chwili zwiększenia chłodzenia, zastosowanie wyżej wymienionej regulacji temperatury procesora pozwala wcześniej zwiększyć moc procesora przy jednoczesnym utrzymaniu jego temperatury na stałym poziomie, wpływając tym samym na zwiększenie wydajności procesora.

W artykule przedstawiony został kompletny system umożliwiający weryfikację sterowania pracą procesora numerycznego za pomocą regulatora ΔT [1]. Drugim ważnym zadaniem stanowiska pomiarowego jest możliwość kontrolowania i sterowania warunkami otoczenia układu scalonego.



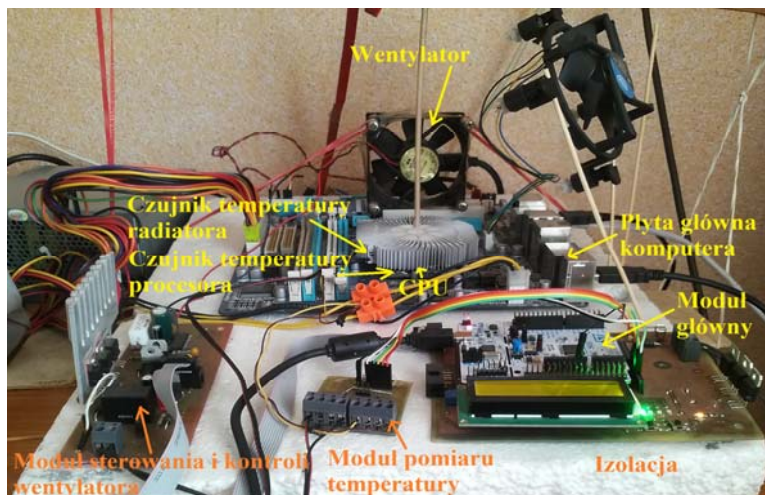
Rys.1. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

Rysunek 1 przedstawia schemat blokowy proponowanego stanowiska. Układem służącym do testów jest procesor numeryczny osadzony na płycie głównej komputera. Sterowanie pracą procesora zrealizowane jest poprzez pętle PLL, która umożliwia zmianę częstotliwości pracy procesora poprzez zmianę jego napięcia zasilania. Do kontroli temperatury otoczenia, radiatora oraz układu scalonego wykorzystany został zewnętrzny układ zrealizowany za pomocą mikrokontrolera STM32. Pomiar temperatury zrealizowany jest za pomocą czujników rezystancyjnych PT100. Do sterowania warunkami otoczenia wykorzystany został wentylator sterowany za pomocą mikrokontrolera STM32. W celu weryfikacji pracy

wentylatora zrealizowany został również układ umożliwiający pomiar napięcia i prądu zasilania wentylatora. Wymiana danych pomiędzy płytą główną a układem do sterowania i kontrolowania warunkami otoczenia zrealizowana jest za pomocą interfejsu UART. Dane pomiarowe zapisywane są w pamięci komputera.

Praktyczna realizacja systemu

Rysunek 2 przedstawia zrealizowany system do weryfikacji działania modelu sterowania za pomocą regulatora ΔT [1]. Stanowisko charakteryzuje się budową modułową, umożliwiającą dowolną jego konfigurację adekwatnie do wykonywanych pomiarów.



Rys.2. Stanowisko pomiarowe

Aby wyeliminować wymianę ciepła, płyta główna została zaizolowana od dolnej strony poprzez warstwę izolatora w postaci styropianu. System został dopasowany tak, aby umożliwić zastosowanie do badań dowolnego procesora. Najważniejszymi elementami są płyta główna z procesorem oraz układ kontrolno-pomiarowy, który został podzielony na kilka modułów: moduł główny, moduł sterowania i kontroli wentylatora, moduł pomiaru temperatury.

Zadaniem modułu głównego jest zbieranie i przetwarzanie danych pochodzących z czujników oraz odbieranie i przekazywanie danych do płyty głównej. Moduł pomiaru temperatury odczytuje dane z czujników temperatury, przetwarza mierzoną wielkość fizyczną na wartość elektryczną i przekazuje do modułu głównego. Układ sterowania i kontrolowania wentylatora służy do regulacji obrotów dołączonego wentylatora poprzez wypełnienie sygnału PWM pochodzącego z mikrokontrolera STM32 oraz umożliwia pomiar napięcia i prądu zasilania wentylatora. Stanowisko umożliwia jednocześnie pomiar trzech temperatur (w tym jeden pomiar za pomocą czujnika cyfrowego) oraz sterowanie mocą dwóch układów poprzez moduł sterowania i kontroli.

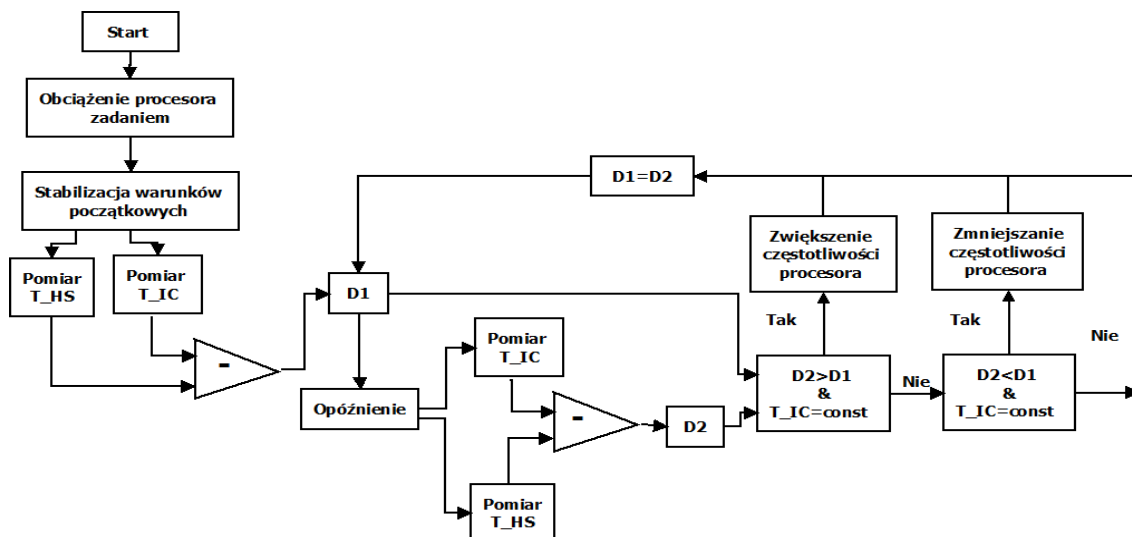
Procesor numeryczny działa w oparciu o system operacyjny Linux, w którym również został napisany algorytm sterowania pracą procesora i całego systemu. Do zmiany częstotliwości procesora wykorzystana została technologia „SpeedStep” [4] umożliwiająca zmianę napięcia i częstotliwości procesora podczas działania systemu operacyjnego. Na potrzeby pomiarów zastosowana została odpowiednia konstrukcja dociskająca radiatora do procesora i umożliwiająca tym samym odpowiednią wymianę ciepła pomiędzy wyżej wymienionymi elementami. Konstrukcja ta została odpowiednio dopasowana, aby zminimalizować jej wpływ na wymianę ciepła pomiędzy układem a otoczeniem.

Algorytm sterowania systemem

Sterowanie systemem zostało przedstawione na rysunku 3. Algorytm zaczyna się od ustalenia początkowych warunków pracy po wcześniejszym obciążeniu procesora odpowiednim zadaniem. Stabilizacja warunków początkowych polega na ustaleniu stałej temperatury procesora przy żądanym obciążeniu i określonych warunkach chłodzenia. Etap ten ułatwia określenie zmian warunków chłodzenia w dalszym sterowaniu. Kolejnym krokiem jest pomiar temperatury procesora T_{IC} i temperatury radiatora T_{HS} oraz wyznaczenie parametru $D1$ jako różnicy temperatur T_{IC} i T_{HS} . Następnie po krótkim opóźnieniu czasowym następuje kolejny pomiar temperatury procesora i radiatora oraz wyznaczenie parametru $D2$ jako różnicy tych temperatur. Wyznaczając kolejno po sobie parametry $D1$ i $D2$ można określić kierunek zmian warunków otoczenia radiatora, czyli pogorszenie lub poprawę chłodzenia.

W przypadku gdy $D2$ jest większa od $D1$ przy stałej temperaturze procesora, następuje zwiększenie częstotliwości pracy procesora. Jest to przypadek, gdy następuje polepszenie chłodzenia, w wyniku czego spadek temperatury na radiatorze następuje szybciej niż spadek temperatury procesora, jest to związane z odpowiednią pojemnością i rezystancją układu scalonego i radiatora.

Przypadek gdy $D2$ jest mniejsze od $D1$ odzwierciedla sytuację gdy następuje pogorszenie chłodzenia, w wyniku czego różnica temperatury pomiędzy procesorem a radiatorem zaczyna się zmniejszać. Aby utrzymać stałą temperaturę procesora następuje zmniejszenie jego częstotliwości. Ważnym elementem jest również kontrola temperatury procesora aby utrzymać ją na stałym poziomie, pomimo zmian warunków otoczenia.

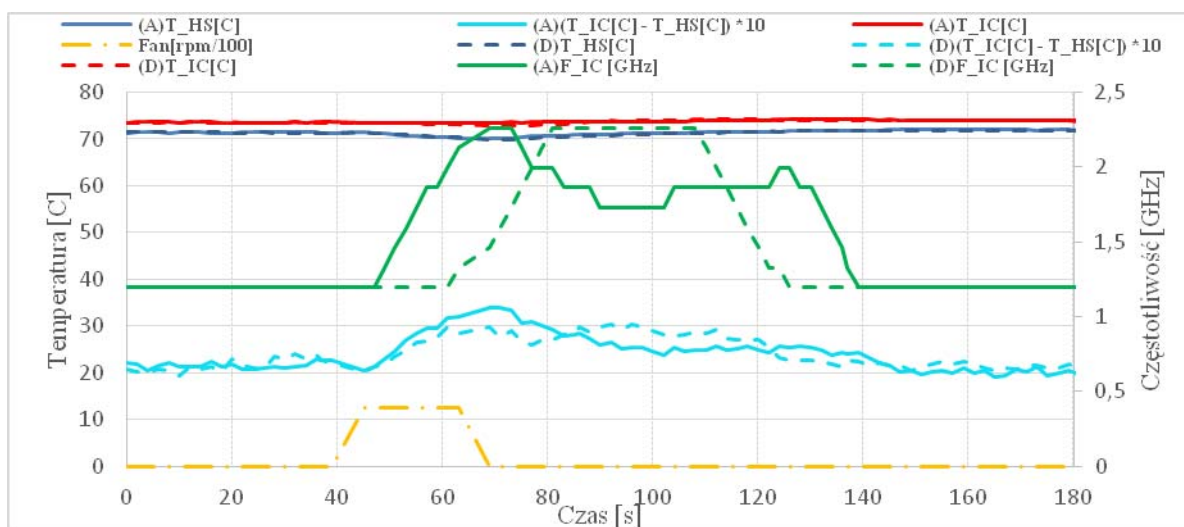


Rys.3. Algorytm działania systemu

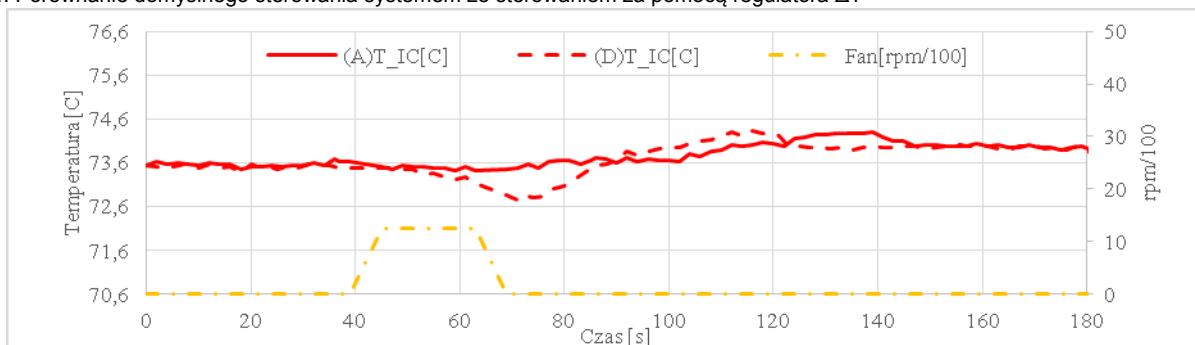
Wyniki działania systemu

Poniżej na rysunku 4 i 5 przedstawione zostało porównanie działania procesora numerycznego sterowanego domyślnie w oparciu o pomiar temperatury samego układu scalonego oraz proponowane sterowanie za pomocą regulatora ΔT . Na rysunku 4 wykres „Fan” przedstawia zmianę warunków chłodzenia, jako zmianę prędkości obrotowej wentylatora chłodzącego radiator. W początkowej fazie wentylator jest wyłączony. Włączenie

następuje w 39 sekundzie pomiaru i trwa do około 69 sekundy. Pomiar zaczyna się w każdym przypadku od ustalenia początkowej stałej temperatury procesora dla określonych warunków chłodzenia i określonej mocy samego układu scalonego. Dzięki zastosowaniu proponowanego algorytmu, następuje szybsze wykrycie polepszonoego chłodzenia i wcześniejsza reakcja systemu poprzez zwiększenie częstotliwości działania procesora.



Rys.4. Porównanie domyślnego sterowania systemem ze sterowaniem za pomocą regulatora ΔT



Rys.5. Porównanie temperatury procesora dla sterowania domyślnego oraz sterowania za pomocą regulatora ΔT

Gdzie: T_{IC} , T_{HS} – temperatura procesora i radiatora, F_{IC} – częstotliwość procesora, Fan – prędkość obrotowa wentylatora, poziom chłodzenia, (A), (D) – oznaczenia pomiarów dla stosowanego algorytmu opartego na regulatorze ΔT oraz domyślnego rozwiązania.

Czas reakcji dla proponowanego algorytmu to około 8 sekund. Dla standardowego rozwiązania czas reakcji wynosi około 22 sekundy. Czas reakcji na załączenie wentylatora dla sterowania standardowego jest około 14 sekund dłuższy od czasu reakcji dla proponowanego algorytmu. Różnica ta wynika z rezystancji i pojemności radiatora, co powoduje że spadek temperatury na układzie scalonym następuje później niż spadek temperatury radiatora, w sterowaniu za pomocą temperatury procesora powoduje to spore opóźnienie w reakcji na zmianę warunków chłodzenia.

Na rysunku 4 zaznaczona została różnica temperatur pomiędzy procesorem a radiatorem (wykres $T_{IC} - T_{HS}$), w wyniku polepszonych chłodzenia następuje zwiększenie różnicy temperatur dla dwóch przypadków (około 45 sekunda pomiaru). Dla proponowanego sterowania różnica ta przyjmuje wartość początkową szybciej w porównaniu ze sterowaniem standardowym, wynika to z faktu, że szybciej następuje wyrównanie temperatury radiatora do wartości początkowej.

Rysunek 5 przedstawia porównanie zmiany temperatury procesora w wyniku zmiany chłodzenia. Podczas pomiarów dopuszczone zostało maksymalne odchylenie temperatury procesora o $0,5^{\circ}C$. W wyniku spóźnionej reakcji na zmianę chłodzenia, dla sterowania standardowego można zaobserwować spadek temperatury procesora (około 50 – 80 sekunda pomiaru), efekt ten nie występuje dla proponowanego sterowania. Stosując regulator ΔT temperatura procesora posiada mniejsze fluktuacje wartości w wyniku zmiany chłodzenia.

Podsumowanie

Opisany w artykule system sterowania umożliwia weryfikację działania algorytmu sterowania procesorem opartego na regulatorze ΔT . W wyniku zastosowania zaproponowanego algorytmu (uwzględniającego temperaturę procesora oraz radiatora) jest możliwe zwiększenie wydajności procesora numerycznego o około

5–6% w porównaniu z innymi algorytmami opartymi tylko na informacji o temperaturze procesora. Stosując proponowane rozwiązanie możliwe jest przyśpieszenie obliczeń bez konieczności zmiany konfiguracji sprzętowej.

Autorzy dziękują Narodowemu Centrum Nauki za wsparcie finansowe, projekt FALCON 2014/13/B/ST7/01634.

Autorzy: mgr inż. Paweł Marzec, prof. dr hab. inż. Andrzej Kos, mgr inż. Paweł Fluder, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji, Al. Mickiewicza 30, 30-069 Kraków, E-mail: pmarzec@agh.edu.pl, kos@agh.edu.pl, fluder@agh.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Kocanda P., Samake A. and Kos A., Optymalizacja mocy obliczeniowej szybkich procesorów z użyciem informacji o otwartym układzie termicznym składającym się z układu scalonego i środowiska, *Krajowa Konferencja Elektroniki, Dąbrowka Wschodnie*, (2016), 571-577
- [2] Rotem E., Ginosar R., Mendelson A. and Weiser U.C., Power and thermal constraints of modern system-on-a-chip computer, *19th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*, Berlin, (2013), 141-146
- [3] Mo Kim Cheng A., Wang Y., A Dynamic Voltage Scaling Algorithm for Dynamic Workloads, *Journal of Signal Processing Systems*, Volume 52 (2008), Number 1, Page 45
- [4] Rountree B., Lowenthal D.K., Schulz M. and de Supinski B.R., Practical performance prediction under Dynamic Voltage Frequency Scaling, *2011 International Green Computing Conference and Workshops*, Orlando, FL, (2011), 1-8
- [5] Charr J.C., Couturier R., Fanfakh A. and Giersch A., Dynamic Frequency Scaling for Energy Consumption Reduction in Synchronous Distributed Applications, *2014 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications*, Milan, (2014), 225-230
- [6] Samake A., Kocanda P. and Kos A., Quiet passive cooling of high performance microsystems with additional temperature sensor, *2016 MIXDES - 23rd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, Lodz, (2016), 288-292
- [7] Kocanda P., Samake A. and Kos A., Environment aware temperature control in processors, *2016 MIXDES - 23rd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, Lodz, (2016), 262-265