

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I ELEKTRONIKI
KATEDRA ELEKTRONIKI

**AUTOREFERAT
ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

MGR INŻ. SŁAWOMIR MIKUŁA

**ASYNCHRONICZNE STEROWANIE
AKTYWNOŚCIĄ BLOKÓW FUNKCJONALNYCH
SYSTEMÓW SCALONYCH**

Promotor:
Prof. dr hab. inż. Andrzej Kos

Kraków, 2010

1 WSTĘP

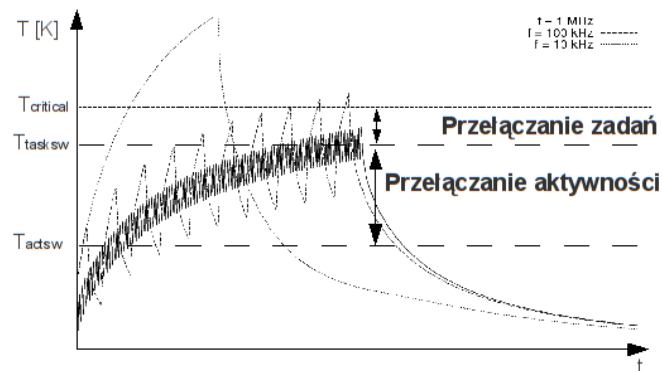
Rozprawa doktorska powstała w ramach prac doktoranta na wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Badania zostały wykonane pod kierunkiem naukowym prof. Andrzeja Kosa w zespole Mikro i Nano-Systemów a także podczas pobytu w ramach programu Socrates/Erasmus na Uniwersytecie w Gandawie pod kierunkiem naukowym prof. Gilberta De Mey. Na podstawie aktualnej wiedzy dotyczącej zagadnień termicznych w systemach wielordzeniowych autor wykazał słuszność następującej tezy:

Istnieje możliwość sterowania asynchronicznego modułami funkcjonalnymi w systemach wielordzeniowych prowadzącego do lepszego wykorzystania własności termodynamicznych struktur półprzewodnikowych, w taki sposób aby zminimalizować maksymalną temperaturę chwilową układu bez obniżania mocy obliczeniowej.

2 ASYNCHRONICZNE STEROWANIE BLOKAMI FUNKCJONALNYMI

Asynchroniczne przełączanie aktywności możemy zdefiniować jako zmianę stanu danego rdzenia/modułu z aktywnej na pasywną asynchronicznie do głównego zegara układu scalonego. Stan aktywny zdefiniowany jest jako praca rdzenia tj. realizacja zadań obliczeniowych. W tym stanie następuje rozpraszanie mocy strat dynamicznych. Stan pasywny oznacza brak aktywności obliczeniowej rdzenia. Wszystkie działania funkcjonalne rdzenia zostają wstrzymane. Występuje tylko statyczny pobór mocy. Częstotliwość przełączania rdzenia pomiędzy stanem aktywnym a pasywnym nie jest stała i zależy od decyzji głównego algorytmu zarządzającego sterowaniem asynchronicznym. Należy zaznaczyć, iż częstotliwość przełączania jest kilka rzędów mniejsza od częstotliwości głównego zegara pracy układu scalonego. Dodatkowo podkreślenia wymaga fakt podjęcia przez algorytm decyzji o zmianie stanu rdzenia z aktywnego na pasywny niezależnie od głównego zegara. Zdarzenie to występuje asynchronicznie – stąd też nazwa tego mechanizmu. Zaproponowana metoda polega na zmianie stanu aktywności danego rdzenia na podstawie informacji termicznej dostępnej dla każdego rdzenia w całej architekturze systemu scalonego. Zmiana stanu z aktywnego na pasywny następuje dla każdego rdzenia niezależnie od stanu

pozostałych rdzeni. Schematycznie zmianę temperatury układu scalonego podczas sterowania aktywnością przedstawia rysunek 1.

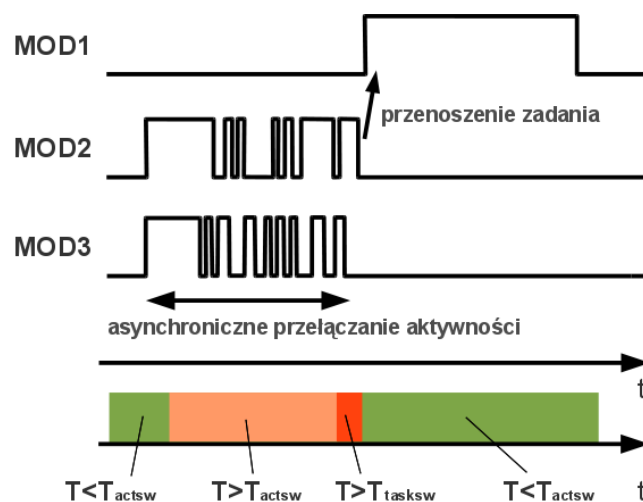


Rys. 1: Schemat profilu termicznego dowolnego rdzenia w trakcie aktywności. Zaznaczono przedziały w których następuje realizacja proponowanych metod algorytmu

Zostały na nim zaznaczone trzy przedziały zakresu temperatur:

- T_{actsw} – temperatura, powyżej której następuje realizacja mechanizmu asynchronicznego przełączania aktywności danego rdzenia
- T_{tasksw} – temperatura, powyżej której algorytm podejmuje decyzję o przeniesieniu wykonywania zadania do innego rdzenia.
- $T_{critical}$ – temperatura powyżej której aktywność rdzenia jest wstrzymywana.

Mechanizm asynchronicznego przełączania aktywności dla przykładowych 3 rdzeni (oznaczonych jako moduły: MOD1-3) oraz mechanizmu przeniesienia wykonywania zadania do innego rdzenia schematycznie przedstawiono na rysunku 2 obrazującym asynchroniczne



Rys. 2: Mechanizm asynchronicznego przełączania aktywności oraz przenoszenia zadań

sterowanie oraz przenoszenie zadania pomiędzy rdzeniami na osi czasu.

Trzecim elementem na bazie którego powstaje proponowany przez autora algorytm jest maksymalizacja liczby rdzeni, które uczestniczą w danej operacji.

2.1 OBLICZANIE TEMPERATURY ZA POMOCĄ FUNKCJI GREENA WRAZ Z WERYFIKACJĄ ASYNCHRONICZNEGO PRZEŁĄCZANIA

Dla potrzeb pracy doktorskiej opracowano algorytm obliczeń temperatury w dowolnym punkcie układu scalonego. Praca wykonana została w czasie pobytu autora na Uniwersytecie Gent (Belgia) w ramach programu Socrates Erasmus przy współpracy z prof. Gilbertem De Mey. Dla analizy czasowej dystrybucji ciepła w przestrzeni wykorzystujemy funkcję Greena. Używając funkcji Greena, która określa temperaturę układu dla pojedynczego punktu, można wyprowadzić równanie określające temperaturę w dowolnym punkcie przestrzeni generowaną przez prostokątne źródło ciepła:

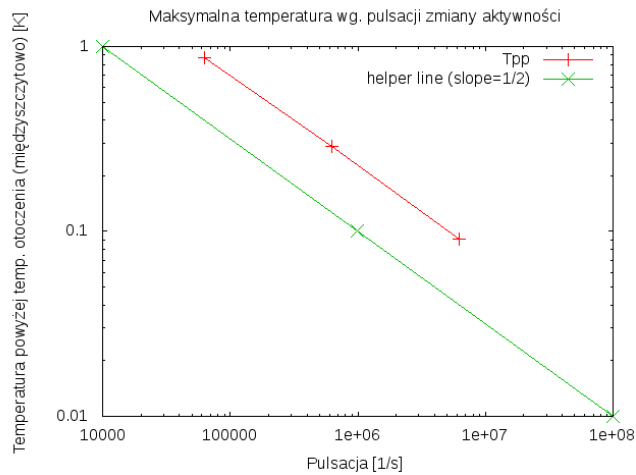
$$T(x, y, z, t) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{c_v P(t') dt'}{8\sqrt{\pi\kappa(t-t')^3}} e^{-\frac{z^2}{4\frac{\kappa}{c_v}(t-t')}} e^{-\frac{(x-x')^2}{4\frac{\kappa}{c_v}(t-t')}} e^{-\frac{(y-y')^2}{4\frac{\kappa}{c_v}(t-t')}} dx' \int_{y_1}^{y_2} dy' \quad (1)$$

Gdzie:

- x, y, z – położenie punktu badanego,
- t – czas dla którego obliczamy temperaturę układu
- $P(t')$ – moc rozpraszana przez aktywny moduł
- t_1, t_2 – okres aktywności modułu
- κ – przewodność cieplna
- c_v – pojemność cieplna przy stałej objętości

Przedstawiony aparat matematyczny został zaimplementowany z wykorzystaniem biblioteki GNU Scientific Library (GSL). Za pomocą wypracowanego modelu matematycznego poddano analizie termicznej układ scalony, w którym działanie poszczególnych rdzeni było aktywowane naprzemiennie. Częstotliwość przełączania była zmieniana w szerokim zakresie. Aby poprawnie wyliczyć wartość temperatury, której źródłem był tylko i wyłącznie składnik aktywny rozpraszania mocy skorzystano z metody rozdzielania mocy wydzielanej w układzie na składową stałą oraz zmienną. Dla składowej zmiennej po ustaleniu się zmian temperatury dla określonej częstotliwości zmierzono

wartości temperatury między-szczytowo. Wartości te wykreślone względem pulsacji przełączania zostały przedstawione na rysunku 3 (rysunek w skali podwójnie logarytmicznej).



Rys. 3: Zależność między-szczytowej wartości temperatury od pulsacji $[\omega]$ zmiany aktywności modułów, gdzie $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

Na wykresie umieszczono dla porównania linię pomocniczą o nachyleniu $\frac{1}{2}$. Jak widać zależność temperatury między-szczytowej od pulsacji częstotliwości przełączania można wyrazić wzorem

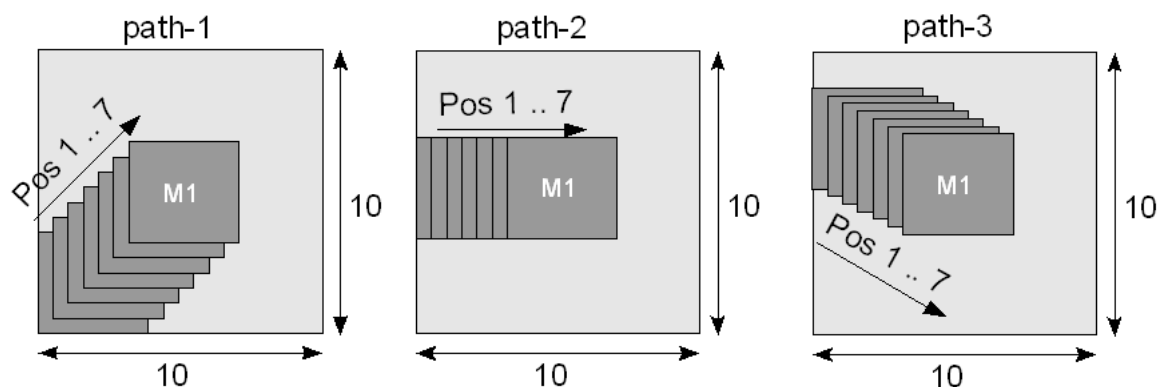
$$T \propto \frac{1}{\sqrt{\omega}} \quad (2)$$

gdzie ω jest pulsacją przełączania aktywności rdzeni. Temperatura chwilowa jest zależna od częstotliwości przełączania aktywności układu scalonego. Ten wniosek jest kluczowym elementem, na którym został zbudowany zaprezentowany mechanizm asynchronicznego przełączania aktywności modułów funkcjonalnych układu scalonego. Wzór (2) potwierdza użyteczność sterowania aktywnością rdzeni w sposób kontrolowany oraz ze zmiennym (asynchronicznym) czasem aktywności. Zastosowany aparat matematyczny został zweryfikowany w ośrodku krakowskim oraz ośrodku Gent za pomocą m.in. metod termograficznych.

3 DYNAMIKA TERMICZNA UKŁADÓW VLSI Z ALGORYTMICZNĄ METODĄ WYBORU RDZENI

Aby opisać przyczynowo-skutkowe zmiany temperatury modułu scalonego w funkcji pobudzeń wprowadzono wielkość, która określa dynamikę układu scalonego – czas punktowej reakcji termicznej (Point Heating Time – PHT). Wartość czasu punktowej reakcji termicznej jest wartością czasu wzrostu temperatury w dowolnym punkcie pomiarowym zlokalizowanym w badanym układzie scalonym (x,y,z) . Wzrost temperatury jest spowodowany przez źródło(a) ciepła zlokalizowane na powierzchni układu scalonego (np. aktywny rdzeń). Wartość czasu punktowej reakcji termicznej została użyta do estymacji czasu potrzebnego do osiągnięcia maksymalnej temperatury dla określonych warunków badanej struktury scalonej.

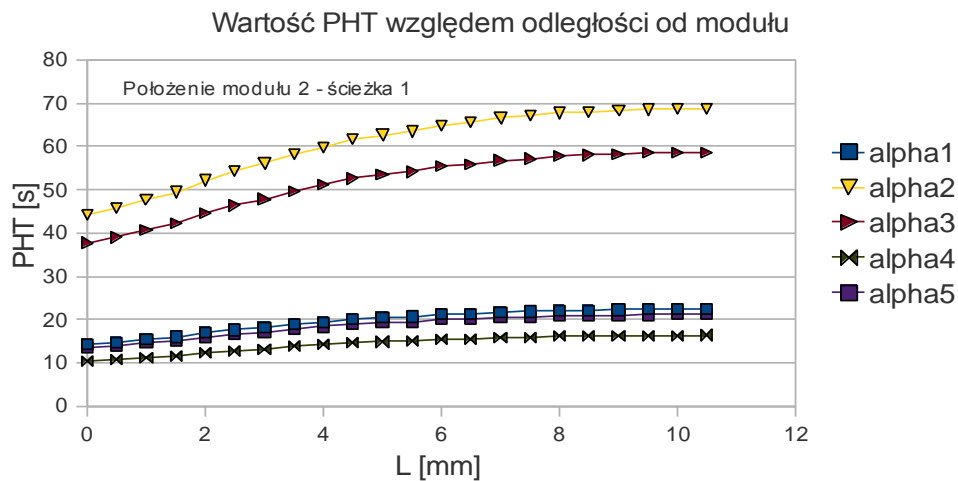
Analizie poddana zostanie wartość czasu punktowej reakcji termicznej (PHT) dla całej powierzchni układu w zależności od położenia geometrycznego modułu na powierzchni układu scalonego oraz zmiennych fizycznych definiujących punkt pracy układu. W celu ustalenia wartości czasu punktowej reakcji termicznej (PHT) w zależności od położenia modułu funkcjonalnego autor modelował ścieżki przesunięcia modułu, tak aby dostarczyć informacji dla wszystkich charakterystycznych położzeń aktywnego modułu. Ścieżki przejść dla modułów oraz wymiary analizowanego układu scalonego zostały przedstawione na rysunku 4.



Rys. 4: Ścieżki przejść aktywnego rdzenia dla układu

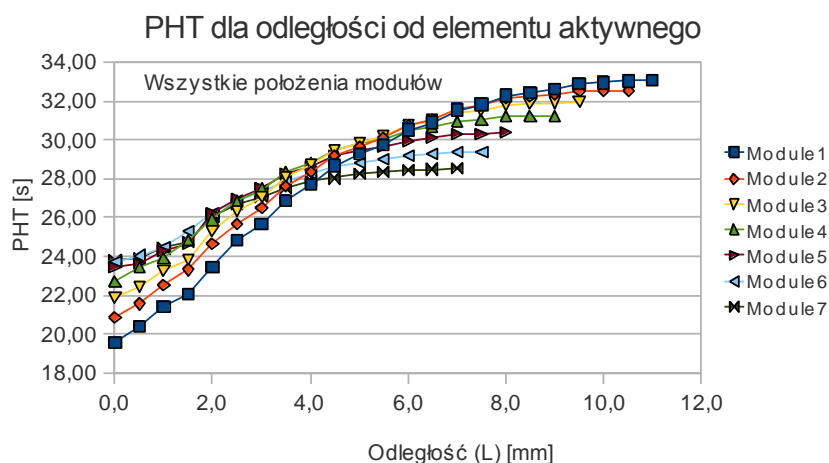
Ze względu na konieczność ustalenia zależności czasu punktowej reakcji termicznej w zależności od zmiany warunków fizycznych określających działający układ scalony autor przedstawił analizę wartości PHT względem zmiany współczynników konwekcji. Dla

badanych przypadków autor zdecydował się na wprowadzenie pięciu par współczynników konwekcji dla górnej i dolnej powierzchni układu scalonego. Wybrany charakterystyczny przypadek został przedstawiony na rysunku 5 dla którego α_1 oznacza pary współczynników konwekcji dla górnej/dolnej powierzchni układu scalonego równe 40/20 [W/m²K]. Analogicznie wartości α_2 wynoszą 20/0, α_3 0/20, α_4 40/40, α_5 20/40.



Rys. 5: Wartość PHT względem odległości od modułu dla współczynników konwekcji, układ CHIP1 - ścieżka 1 – położenie modułu 2

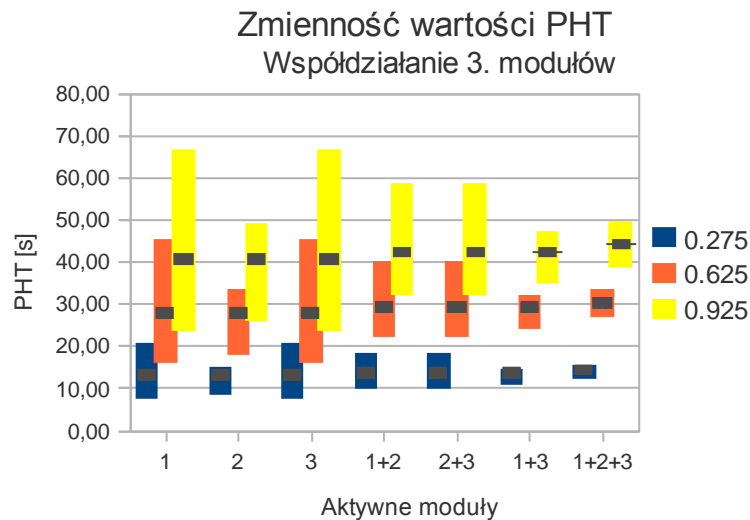
Obserwacje wyników prowadzą do wniosków, iż wartości PHT są mniejsze dla większych wartości współczynników konwekcji – oznacza to, iż układ scalony będzie potrzebował mniej czasu do osiągnięcia większych wartości temperatury. Autor przeprowadził analizę zmiany wartości współczynnika PHT dla zmiany położenia elementu grzejnego zgodnie ze ścieżkami przesunięć przedstawionymi na rysunku 4. Wykresy wartości PHT względem odległości od środka elementu aktywnego zostały przedstawione na rysunku 6, na którym wartościami module1-7 oznaczono kolejne położenia modułu na



Rys. 6: Wartości PHT względem odległości od elementu aktywnego – ścieżka przesunięć nr 1

powierzchni układu scalonego.

Dla kompletności informacji autor przeprowadza dodatkową analizę wpływu wielu aktywnych rdzeni na wartość czasu punktowej reakcji termicznej (PHT). Analizie poddano układ scalony z trzema aktywnymi modułami rozmieszczonymi na powierzchni układu. Badano zmienność wartości PHT względem aktywności określonej kombinacji modułów dla kilku grubości podłoża. Wyniki zostały przedstawione na rysunku 7.



Rys. 7. Zmienność wartości PHT dla trzech aktywnych modułów

Jak można zauważyć na rysunku 7 zmienność PHT w porównaniu z wartością PHT dla średniej arytmetycznej temperatury jest znaczna. Największa zmienność występuje dla przypadków, w których powierzchnia aktywnych modułów jest najmniejsza. W przypadku zwiększania się liczby aktywnych modułów gradient wartości PHT staje się mniejszy. W konsekwencji w przypadku pełnej aktywności całej powierzchni układu scalonego wartość PHT jest stała i identyczna z wartością PHT wyliczaną dla średniej arytmetycznej temperatury układu.

4 ALGORYTMY STEROWANIA RDZENIAMI

Na podstawie zebranych wniosków analitycznych został przygotowany algorytm łączący przedstawione elementy w jeden spójny mechanizm obliczeniowy. Jednym z podstawowych założeń algorytmu jest możliwość jego implementacji w szerokiej gamie

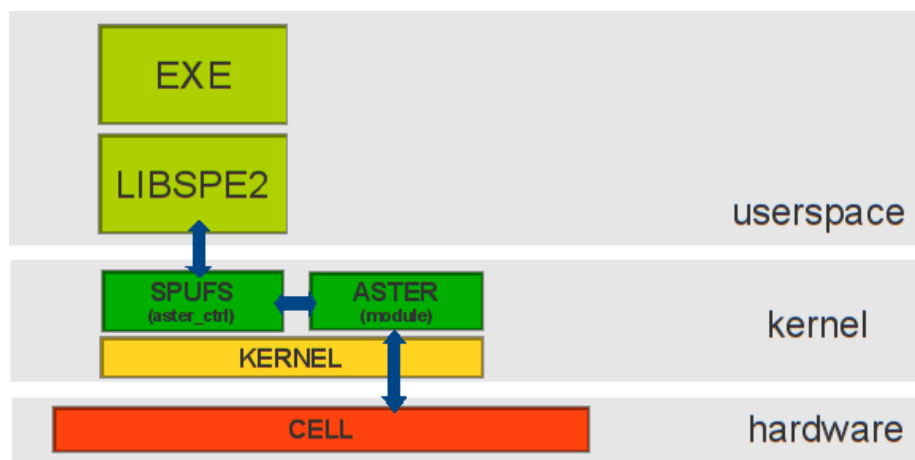
układów charakteryzujących się dowolną liczbą rdzeni. Głównymi elementami, które znalazły się w proponowanym finalnym algorytmie są:

- metoda sterowania asynchronicznego aktywnością rdzeni – tzw. activity switching
- metoda przenoszenia zadań do innych rdzeni – tzw. task switching
- metoda doboru optymalnego rdzenia do istniejących warunków termicznych – wykorzystanie wartości czasu punktowej reakcji termicznej

Analizie poddano strukturę fizyczną procesora CELL oraz implementację jego obsługi w jądrze GNU/Linux wersji 2.6.x. Na podstawie przedstawionych założeń wstępnych algorytm został podzielony na dwa elementy (moduły jądra Linux):

- **SPUFS - ASTER_CTRL** – pierwszy moduł, który realizuje przydział nowych zadań dla określonych rdzeni mając na uwadze uwarunkowania termiczne
- **ASTER - MODULE** – moduł stworzony całkowicie przez autora, który zajmuje się nadzorowaniem zachowania termicznego wszystkich rdzeni układu scalonego oraz realizujący mechanizm przełączania asynchronicznego aktywności poszczególnych rdzeni

Moduły te oraz ich współdziałanie zostało przedstawione schematycznie na rysunku 8.



Rys. 8: Schemat działania modułów: sterującego przydziałem zadań SPUFS (aster_ctrl) oraz realizującego asynchroniczne przełączenie aktywności ASTER (module)

Przedstawione algorytmy zostały zaimplementowane w rdzeniu systemu operacyjnego GNU/Linux wersji 2.6.28. System operacyjny uruchomiono w symulatorze procesora CELL systemsim. Dane aktywności poszczególnych rdzeni podczas wykonywania testowych zadań zostały przeniesione do oprogramowania analizy termicznej Fluent. W zdefiniowanym tam modelu termicznym procesora CELL następowała weryfikacja poprawności działania

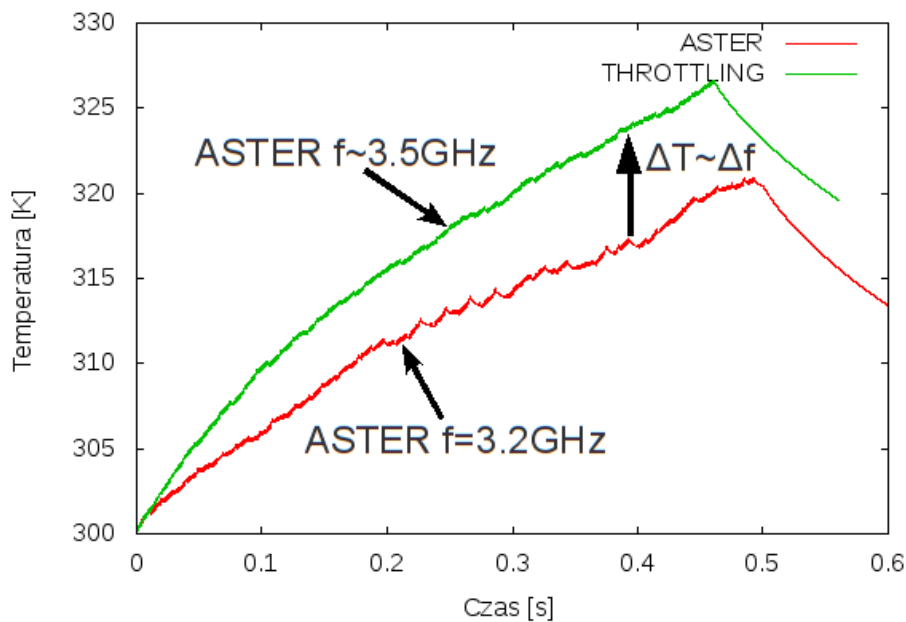
algorytmu oraz wykreślenie zmian temperatury poszczególnych rdzeni układu scalonego. Porównywano trzy mechanizmy sterowania rdzeniami: pierwszy – standardowy (STD KERNEL); drugi – rozszerzony o mechanizm przełączania pracy rdzenia stosowany w procesorze CELL (THROTTLING) oraz algorytm ASTER. Porównanie termiczne czasu wykonania określonego zadania dla algorytmu ASTER oraz standardowego oprogramowania zostało zbiorczo przedstawione w tabeli 1.

| Wartość | Wyniki | | |
|----------------------------|------------|------------|-------|
| | STD KERNEL | THROTTLING | ASTER |
| Temperatura maksymalna [K] | 340,05 | 325,6 | 320,9 |
| Czas wykonania [s] | 0.363 | 0.462 | 0.493 |

Tabela 1: Wyniki symulacji termicznej działania algorytmu

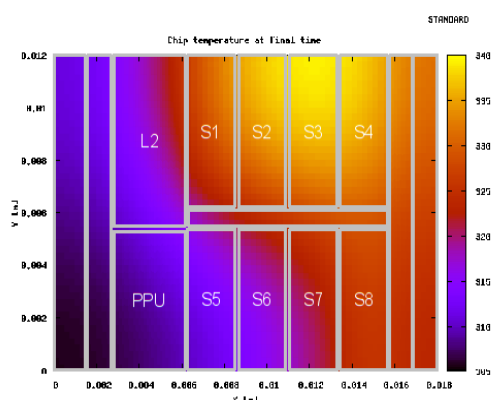
Jak przedstawiono powyżej algorytm ASTER charakteryzuje się znaczącym zyskiem temperatury w stosunku do pozostałych opracowań. Jednoznacznie wskazuje to na zaletę algorytmu ASTER w stosunku do domyślnego algorytmu THROTTLING. Zaletą zaproponowanego algorytmu jest oprócz zmniejszenia maksymalnej temperatury pracy układu scalonego również zmniejszenie gradientu temperatury na powierzchni układu scalonego. W konsekwencji prowadzi to do pracy układu scalonego blisko swojej granicy termicznej. Należy w tym przypadku zaznaczyć, iż w każdym z tych przypadków nie jest realizowany żaden z algorytmów skalowania częstotliwości/napięcia pracy. Jak widać maksymalna temperatura pracy układu CELL jest niższa niż dla pozostałych analizowanych przypadków. Pozwala to na zwiększenie maksymalnej częstotliwości pracy układu. Przyjmując zwiększenie częstotliwości pracy układu procesora CELL z 3,2 GHz do 3,5GHz na podstawie ogólnie znanych zależności możemy wnioskować, iż zwiększy się w tym przypadku moc strat oraz temperatura generowana przez układ scalony. Zmiana temperatury będzie proporcjonalna do częstotliwości pracy - zakładając niezmienność pozostałych parametrów pracy układu scalonego. W tym przypadku wykres temperatury dla algorytmu ASTER zostanie przesunięty w kierunku wyższych wartości osiągając przy pewnej częstotliwości wartości prezentowane przez algorytm THROTTLING. Osiągamy w ten sposób potwierdzenie zwiększenia wydajności obliczeniowych systemu scalonego przy

zastosowaniu algorytmu ASTER do sterowania aktywnością bloków funkcjonalnych danego układu scalonego. Obrazowo mechanizm ten przedstawiono na rysunku 9.

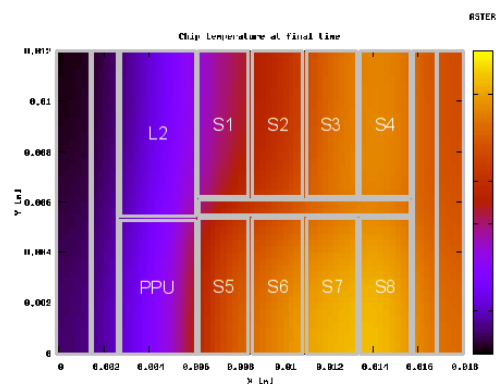


Rys. 9: ASTER - zwiększenie możliwości obliczeniowych, przy takich samych warunkach termicznych jak algorytm throttling (rysunek poglądowy)

Gradient temperatury podczas obliczeń dla algorytmów znajduje się w okolicach rdzeni obliczeniowych. Dla standardowego algorytmu następuje zwiększenie gradientu temperatury w okolicach pięciu pierwszych rdzeni, które realizują obliczenia. Dla algorytmu ASTER aktywność przejawiają wszystkie rdzenie. Wykres zmian temperatury z zaznaczeniem modułów funkcjonalnych procesora CELL został przedstawiony na rysunkach 10 i 11.



Rys. 11: Przestrzenny rozkład temperatury dla czasu, w którym wystąpiła maksymalna temperatura chwilowa układu – domyślny algorytm jądra Linux – zaznaczenie modułów funkcjonalnych



Rys. 10: Przestrzenny rozkład temperatury dla czasu, w którym wystąpiła maksymalna temperatura chwilowa układu – algorytm ASTER – zaznaczenie modułów funkcjonalnych

5 PODSUMOWANIE

Aby osiągnąć założone cele zmierzające do udowodnienia tezy pracy zrealizowano następujące zadania:

Definicja zadania – zdefiniowano mechanizmy działania systemów wielordzeniowych. Opracowano wstępną koncepcję sposobu sterowania układem scalonym.

Algorytm sterowania asynchronicznego – opracowano na podstawie zebranych informacji analitycznych i pracy symulacyjnej algorytm asynchronicznego sterowania aktywnością systemów wielordzeniowych.

Algorytm przydzielania zadań dla systemu wielordzeniowego – opracowano algorytmu przydzielania zadań dla istniejącej puli rdzeni w systemie scalonym. Głównym zadaniem jest powiązanie własności termodynamicznych oraz fizycznych charakterystyk układu scalonego z decyzją wyboru określonego rdzenia.

Modelu termiczny – opracowano model procesora CELL. Dla danego modelu zostały określone warunki fizyczne – budowa fizyczna modelu oraz warunki brzegowe.

Analiza zmienności czasu punktowej reakcji termicznej – w celu analizy dynamiki termicznej badanych układów zdefiniowano zmienną Czas Punktowej Reakcji Termicznej oraz zbadano jego zmienność względem położenia aktywnych modułów na powierzchni układu scalonego wraz ze zmianą parametrów fizycznych opisujących dany układ scalony.

Algorytm sterowania asynchronicznego ASTER – utworzono algorytm sterowania rzeczywistego przypadku tj. procesora CELL wykazującego słuszność tezy pracy. Na podstawie dostępnego modelu matematycznego i symulacyjnego dla rzeczywistego procesora zaimplementowano w tym systemie algorytm sterowania asynchronicznego ASTER. Wyniki i poprawność przyjętego mechanizmu sterowania zweryfikowano za pomocą analizy termicznej układu scalonego wraz z porównaniem z aktualnie stosowanymi mechanizmami sterowania systemami wielordzeniowymi.

6 BIBLIOGRAFIA AUTORA ZWIĄZANA Z PRACĄ

- **Mikuła S., Kos A.**, “Thermal Dynamics of Multi-Core Integrated Systems”, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Volume 33, Issue 3, 2010, pp. 524-534

- **Mikula S.**, Kos A., “Analysis of Integrated Circuits Thermal Dynamics with Point Heating Time”, Elsevier Microelectronics Journal, Accepted for publication, Article number MEJ 3074
- **Mikula S.**, Kos. A., “Asynchronous control of Multi-Core Systems”, IEEE symposium on Low-Power and High-Speed Chips, Cool Chips XII, Yokohama, Japan, 2009, Proceedings, pp. 149
- **Mikula S.**, De Mey G., Kos A., “Asynchronous control of modules activity in integrated system for reducing peak temperatures”, Integration, the VLSI Journal, 2008, Volume 41 , Issue 3 (May 2008) pages 447-458
- **Mikula S.**, Kos A., “Analysis of point heating time in VLSI circuits”, MIXDES 2008:MIXed DESign of integrated circuits and systems : proceedings of the 15th international conference : Poznań, Poland, 19–21 June, 2008 pp. 311–316
- **Mikula S.**, Kos A., “Using GNU Scientific Library for temperature computation in VLSI systems”, Tools of information technology: proceedings of the 1st conference : Rzeszów, Poland 15 September 2006pp. 88–94