

Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki

Politechnika Łódzka

miejsce pracy

***RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU
INFORMATYKI, ELEKTRONIKI
I TELEKOMUNIKACJI AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ
W KRAKOWIE***

Tytuł rozprawy: „Generator taktujący TCO sterowany temperaturą jako nowy element systemu zwiększania mocy obliczeniowej i redukcji energii zasilania”.

Autor rozprawy: mgr inż. Maciej Frankiewicz

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Frankiewicza poświęcona jest bardzo ważnej i aktualnej tematyce dotyczącej dynamicznego zarządzania termicznego, ang. Dynamic Thermal Modelling (DTM), pracą układów scalonych. Biorąc pod uwagę, że podwyższenie temperatury pracy układów zaledwie o kilkanaście stopni skraca o połowę ich żywotność, nadmierna temperatura jest obecnie przyczyną zdecydowanej większości awarii układów mikroelektronicznych. Z powyższego powodu tematyka ta jest aktualnie przedmiotem badań naukowych w wiodących ośrodkach badawczych na świecie.

Rozprawa ma charakter zdecydowanie praktyczny, a zaprezentowane w niej wyniki symulacji numerycznych zostały zweryfikowane eksperymentalnie. Na wstępie Doktorant uzasadnił podjęcie zaproponowanej tematyki badawczej oraz wyraźnie nakreślił stawiane przed nim cele formułując następującą tezę Rozprawy:

Możliwe jest zaprojektowanie scalonego generatora przestrajanego w sposób ciągły i natychmiastowy temperaturą układu scalonego, gwarantującego bezpieczeństwo termiczne pracy cyfrowego układu scalonego (np. procesora) przy jednoczesnym zapewnieniu możliwie wysokiej wydajności pracy tego układu.

Zatem głównym zadaniem badawczym zrealizowanym przez Doktoranta było zapewnienie termicznego bezpieczeństwa pracy cyfrowego układu scalonego poprzez wykorzystanie generatora częstotliwości przestrajanego temperaturą (TCO), a osiągnięcie tego zamierzonego celu wymagało pogodzenia dwóch niejako przeciwstawnych celów; minimalizacji mocy rozpraszanej w układzie przy jednoczesnej maksymalizacji jego mocy obliczeniowej.

Rozprawa zawiera siedem rozdziałów oraz obszerny wykaz literatury. Pierwsze dwa rozdziały wprowadzają czytelnika w tematykę Rozprawy. Rozdział 3 definiuje podstawowe pojęcia, w tym koncepcję bezwładności termicznej układów, oraz uzasadnia konieczność podjęcia zaproponowanej tematyki badawczej. Właściwy trzon Rozprawy tworzą Rozdziały 4-6 prezentujące uzyskane przez Autora wyniki symulacji komputerowych i pomiarów eksperymentalnych oraz wnioski końcowe. Rozdział 7 stanowi podsumowanie całej Rozprawy.

Rozdział 1 jak wspomniano stanowi wprowadzenie w tematykę Rozprawy i określa stawiane przed Doktorantem cele i zadania przewidziane do realizacji. Rozważania teoretyczne ograniczają się w zasadzie jedynie do Rozdziału 2, w którym Doktorant omówił podstawowe metody kontroli temperatury i wydajności pracy układów scalonych, w tym metody programowe i sprzętowe, przy czym wyraźnie wyodrębnił metody predykcyjne stanowiące właściwy temat Rozprawy. Rozdział 3 ilustruje metodykę konstruowania modeli termicznych układów scalonych oraz definiuje pojęcie bezwładności termicznej układów wykorzystywane przez Doktoranta w dalszej części Rozprawy. Na zakończenie rozdziału przeanalizowane zostały różne rozwiązania konstrukcyjne generatorów przestrajanych napięciem; oscylatory rezonansowe i pierścieniowe. W wyniku przeprowadzonych analiz Autor dokonał wyboru rozwiązania w postaci oscylatora pierścieniowego z uwagi na łatwość jego realizacji praktycznej w układach scalonych.

W Rozdziale 4 Doktorant dokonał analizy stabilności systemu regulacji temperatury układu scalonego z generatorem TCO w pętli sprzężenia zwrotnego formułując matematyczny model w postaci układu równań opisującego temperaturę układu w stanie ustalonym oraz częstotliwość generowaną przez oscylator. W wyniku przeprowadzonych analiz możliwe stało się określenie przestrzeni dopuszczalnych charakterystyk toru sprzężenia zwrotnego zapewniających stabilizację temperatury pracy układu. Wnioski te zostały wykorzystane w Rozdziale 5, w którym Doktorant przeprowadził w środowisku Matlab dla tego samego wejściowego wektora testowego wielokrotne symulacje czasowe mające na celu określenie optymalnej charakterystyki częstotliwościowo-temperaturowej toru sprzężenia zwrotnego. Najpierw Autor rozważył model o skokowo zmiennej częstotliwości generatora w funkcji temperatury pracy układu, model o monotonicznie malejącej częstotliwości wraz z temperaturą układu oraz model mieszany. Następnie Autor rozważył też wykorzystanie dodatkowego różniczkującego członu predykcyjnego reagującego na chwilowe trendy zmian temperatury. W konkluzji Doktorant stwierdził, że dla osiągnięcia zamierzonego celu najlepsze są modele predykcyjne, a w szczególności ten o skokowo zmiennej częstotliwości.

Rozdział 6 Rozprawy prezentuje właściwe realizacje praktyczne układów generatora TCO zaprojektowane i wykonane przez Autora. Wersja uproszczona układu przedstawiona na wstępie, zawierająca jedynie pojedynczy czujnik temperatury PTAT, realizuje koncepcję mieszanej kontroli częstotliwości generowanej przez oscylator z opcjonalnym torem predykcyjnym, w którym ciągłą zmianę częstotliwości umożliwia układ kształtowania charakterystyki oparty na jednostopniowym wzmacniaczu odwracającym z przesunięciem poziomu sygnału, a skokowa zmiana częstotliwości dokonywana jest poprzez dyskryminator poziomu sygnału analogowego z czujnika temperatury działający na zasadzie podobnej do przetwornika typu „flash”. Poprawność działania tego układu została zweryfikowana przez Doktoranta eksperymentalnie.

Wzbogacona wersja układu prototypowego umożliwia nie tylko sprzętową, lecz i programową kontrolę generacji częstotliwości, a także wykorzystuje sygnały pomiarowe z czterech czujników PTAT. Również i ta wersja układu pomyślnie przeszła etap weryfikacji praktycznej jego działania. Ostatnią z prezentowanych przez Doktoranta realizacji praktycznych jest układ procesora RISC OctaLynx dedykowany do pracy z przestrajającym generatorem częstotliwości TCO, co daje jego potencjalnemu użytkownikowi dużą swobodę kontroli temperatury i mocy obliczeniowej układu metodami sprzętowymi i programowymi. Większość prac badawczych omawianych w Rozprawie została sfinansowana w ramach grantu NCN N N515 5003 40 oraz środków własnych AGH.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle / świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Lista bibliograficzna jest dosyć obszerna. Doktorant odwołuje się w Rozprawie do 103 pozycji literaturowych, przy czym ponad 40% stanowią prace opublikowane w ciągu ostatnich pięciu lat, co dowodzi, że Autor ma bardzo dobre rozeznanie w aktualnym stanie wiedzy na świecie. Pośród cytowanych prac znajduje się 27 pozycji współautorskich Doktoranta, z czego 6 publikacji znajduje się w bazie Web of Science - Core Collection, w tym 4 artykuły z listy A MNiSW oraz 9 pozycji z listy B.

Wnioski wynikające z cytowanej przez Doktoranta literatury zostały sformułowane w sposób przejrzysty i przekonujący. Pośród pozycji literaturowych odczuwalny jest co prawda brak pewnych klasycznych publikacji z tej dziedziny dokumentujących wyniki prac prowadzonych przez wiodące ośrodki badawcze w USA i Europie, np.:

K. Skadron, M. Stan, K. Sankaranarayanan, W. Huang, S. Velusamy, and D. Tarjan, "Temperature-aware micro-architecture: modelling and implementation", ACM Transactions on Architecture and Code Optimization, Vol. 1, pp. 94-125, 2004,

P. Chaparro, J. Gonzalez, G. Magklis, Q. Cai, A. Gonzalez, "Understanding thermal implications of multi-core architectures", IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 18, pp. 1055-1065, 2007,

lecz jest to kwestia dyskusyjna.

3. Czy autor rozwiązał przedstawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Doktorant w pełni zrealizował postawione na wstępie Rozprawy cele naukowe, a zastosowane przez niego metody badawcze są właściwe, co świadczy dobitnie o jego dojrzałości naukowej. Zaproponowane w Rozprawie modele matematyczne opisujące działanie czujników temperatury PTAT oraz generatora TCO, prowadzące do układu Równań 4.10-11, pozwoliły określić wpływ temperatury otoczenia i mocy rozpraszanej w układzie na jego temperaturę oraz częstotliwość pracy oscylatora pierścieniowego. Przeprowadzone na ich podstawie dogłębne analizy stabilności systemu umożliwiły zaprojektowanie rzeczywistych generatorów TCO, które pozwalają na kontrolowanie temperatury układów scalonych w czasie rzeczywistym, a poprawność ich działania została w pełni udowodniona eksperymentalnie.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jak jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Prace naukowe zrealizowane przez Doktoranta i opisane w Rozprawie wpisują się doskonale w tematykę badań prowadzonych obecnie na świecie. Za nowe i oryginalne osiągnięcia Autora należy uznać przede wszystkim:

- zaproponowanie koncepcji wykorzystania generatora TCO do kontrolowania temperatury oraz wydajności obliczeniowej cyfrowych układów scalonych,
- zdefiniowanie i wykorzystanie pojęcia bezwładności termicznej układu,
- praktyczna realizacja układu umożliwiającego mieszaną kontrolę generowanej częstotliwości,
- wykorzystanie elementu predykcyjnego do kontroli temperatury układu,

- umożliwienie jednoczesnej sprzętowej i programowej kontroli temperatury układu,
- przeprowadzenie na rzeczywistych układach scalonych udanej weryfikacji eksperymentalnej zaproponowanych koncepcji teoretycznych.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Podział Rozprawy na rozdziały nie budzi żadnych zastrzeżeń; jest on logiczny i przemyślany. Pod względem edytorskim Rozprawa jest przygotowana dosyć starannie, choć Autor nie ustrzegł się pewnych drobnych błędów. Oto niektóre uwagi dotyczące strony edytorsko-językowej pracy:

- tekst rozprawy zawiera nieliczne uchybienia natury stylistycznej w rodzaju częstych powtórzeń tego samego wyrazu w sąsiadujących wierszach, np. wyraz „zostać” powtórzono trzykrotnie w 2 sąsiadujących wierszach na s. 78,
- zwyczajową jednostką rezystancji termicznej jest K/W, a nie °C/W jak podaje Doktorant, choć liczbowo to wartości te są identyczne,
- dyskusyjna jest kwestia umieszczania odnośników do rysunków w tekście rozprawy, zamiast bezpośrednio pod podpisami do nich,
- część wiadomości teoretycznych dotyczących teorii działania czujników PTAT oraz oscylatora pierścieniowego zamieszczonych w Rozdziale 3 została powtórzona w Rozdziale 6,
- na Rys. 1.1 w celu lepszego zobrazowania skali problemu na osi pionowej nie dokonywałbym normalizacji skali,
- liczby opisujące osie na Rys. 3.6 są niewidoczne; należało umieścić oba wykresy bezpośrednio pod sobą w znacznym powiększeniu,
- tekst na Rys. 3.8 jest nieczytelny,
- krzywe oznaczone na Rys. 4.2-7 symbolami literowymi nie zostały dostatecznie jasno opisane w tekście Rozprawy,
- słowo „fabrykacja” ma znaczenie pejoratywne (s.1 w.1 od góry),
- zwiększonym a nie zwiększanym (s.1 w.2 od góry),
- sformułowanie „generator przestrajany na punkt pracy” jest niezręczne (s.9 w.5 od góry),
- powinno być „Ostatnim ważnym wnioskiem” (s.33 w.9 od góry),
- wyrażenie „na rysunkach widoczna jest rozdzielczość przetwornika” jest niewłaściwe (s.34 w.8 od dołu),
- zwrot „chwilowy brak źródła (ciepła)” jest niezbyt precyzyjny, gdyż odnosi się nie do braku źródła jako takiego, lecz do stanu jego chwilowego wyłączenia (s.36 w.5 od dołu),
- w danym kontekście powinno być „przeważającą” (s.38 w.7 od góry),
- sformułowanie „rozdział rozważy” jest niezręczne (s.45 w.3 od dołu),
- zamiast „prowadzi ... do krótszego czasu potrzebnego ... do zaprojektowania” lepiej napisać „skraca czas potrzebny do zaprojektowania” (s.83 w.5-6 od góry),
- powinno być „zbocza sygnału” (s.106 w.4 od góry),
- poprawnie jest „układ scalony zawierający” (s.116 w.6 od góry).

6. *Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?*

Pomimo jednoznacznie wysokiej oceny merytorycznej Rozprawy, ma ona także pewne słabe strony. Najwięcej uwag krytycznych dotyczy Rozdziału 3, w którym zaproponowany przez Autora model termiczny jest zbyt uproszczony, aczkolwiek wystarczający do zilustrowania występowania zjawiska bezwładności termicznej. Wystarczyło wykorzystać do tego celu powszechnie używane darmowe oprogramowanie HotSpot służące do symulacji termicznych procesorów oferowane przez grupę badawczą z University of Virginia (W. Huang, S. Ghosh, S. Velusamy, K. Sankaranarayanan, K. Skadron, M. Stan, „HotSpot: a compact thermal modeling methodology for early-stage VLSI design”, IEEE Transactions on VLSI Systems, 2006, Vol. 14, pp 501-13.).

Ponadto w całej Rozprawie marginalnie traktowana jest przez Doktoranta kwestia poprawnego określenia warunków brzegowych, które determinują wartość temperatury układu. Przykładowo, jak sam Autor przyznaje na s.25 założenie o jednorodności temperatury układu jest zbyt silne, lecz może być uzasadnione w przypadku złych warunków chłodzenia układu. Tymczasem w Rozprawie nigdy nie precyzuje on jakie były rzeczywiste warunki chłodzenia podczas pomiarów, a ich ocena nie jest możliwa na podstawie zamieszczonych w Rozprawie fotografii (Rys. 3.7 i 6.9). Ponadto nie są też znane wymiary i typ obudowy badanych układów oraz użytych podczas pomiarów radiatora i wentylatora ani sposób ich zamontowania. Nie podano także ilości mocy wydzielanej w układzie, co jest bardzo istotne, ponieważ warunki brzegowe, szczególnie przy otwartej obudowie układu, silnie zależą od temperatury jego powierzchni.

Kolejna ważna kwestia dotyczy czujników PTAT. Uważam, że w przypadku prezentowania pomierzonych charakterystyk czujników powinna zostać liczbowo podana ich czułość w mV/K. Nie wiadomo też jaki był rozrzut ich parametrów. Na s. 27 Autor pisze, że do dalszych eksperymentów wykorzystano pojedynczy czujnik położony w środku. Czy chodzi o czujnik numer 8 na Rys 3.4? Dlaczego te charakterystyki tak znacznie różnią się od siebie? Jak mają się one do charakterystyki przedstawionej na Rys. 6.2?

Ostatnia, istotna uwaga krytyczna dotyczy prezentowanych w Rozprawie układów scalonych, 1 w Rozdziale 3 oraz 3 w Rozdziale 6. Na podstawie dostępnych informacji nie można stwierdzić jednoznacznie czy Doktorant był samodzielnym projektantem wszystkich badanych układów. Brak jest też pewnych istotnych danych, min. dotyczących rozmieszczenia czujników PTAT w układzie oraz położenia oscylatora TCO w omawianym procesorze OctaLynx. Dane te są niezbędne dla dokonania oceny rzetelnej opóźnień odpowiedzi czujników, a zarazem poprawności projektu pod względem możliwości dokonywania predykcji temperatury na skutek zmian wartości wydzielanej mocy.

Nie jest też do końca jasne czy analizy parametryczne zaprezentowane na s. 62-8 są wynikami symulacji komputerowych, czy też dotyczą pomiarów rzeczywistych układów. Z jednej strony należałoby przypuścić, że są to wyniki symulacji uzyskane na podstawie pewnych założonych wartości parametrów modeli, jednakże Doktorant pisze na s. 62, że czujniki zostały przetestowane z wykorzystaniem generatora szerokopasmowego przestrajanego napięciem.

Rys. 5.1 nie jest wystarczająco dobrze opisany. Nie wiadomo jakie jednostki przedstawione są na osi poziomej. Prawdopodobnie jest to przyrost temperatury, ale przecież rozpraszana moc powinna być wyrażona w watach, a amplituda sygnału zegarowego w woltach. Ponadto wyrażenie „temperatura statyczna” nie wydaje się najszcześniejsze, gdyż jest to wartość temperatury w stanie ustalonym, do którego w danej chwili dąży układ. Powyższe uwagi dotyczą też innych podobnych rysunków w Rozdziale 5.

Pozostałe szczegółowe uwagi natury merytorycznej:

- ciepło jest miarą ilość energii wewnętrznej przekazywanej w procesie wymiany ciepła, a nie jest rodzajem energii, tak jak energia kinetyczna czy też potencjalna (s.37 w.10 od dołu),
- analizując oscylator rezonansowy autor nie podał żadnych konkretnych wartości pojemności i indukcyjności, a poza tym nie wiadomo jak pojemność C występującymi we wzorze 3.10 wiąże się z pojemnościami ze schematu na Rys. 3.11,
- wielokrotnie wspomniana przez Autora komora termiczna nie została dokładnie opisana, zatem nie wiadomo jakie są jej właściwości i parametry techniczne.

W związku z powyższymi uwagami krytycznymi chciałbym Doktorantowi zadać dwa pytania:

1. Proszę o wyjaśnienie niejasności związanych z czujnikami PTAT, tzn. kwestii dotyczących ich czułości, rozrzutu parametrów oraz ich wzajemnego położenia i odległości względem źródeł ciepła.
2. Proszę o wyjaśnienie wątpliwości dotyczących kolejnych wersji układów scalonych, w tym informacji o wzajemnym położeniu czujników i źródeł ciepła oraz warunkach chłodzenia podczas pomiarów.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Wyniki badań naukowych przedstawionych w Rozprawie mogą być zastosowane praktycznie do dynamicznego zarządzania temperaturą układów scalonych w celu zapewnienia bezpieczeństwa termicznego przy jednoczesnej maksymalizacji ich mocy obliczeniowej. Przedstawione rozwiązanie sprzętowe jest oryginalne z uwagi na wykorzystanie elementu predykcyjnego oraz zaproponowaną przez Doktoranta mieszaną metodę regulacji częstotliwości. W połączeniu z zaawansowanymi metodami programistycznymi, min. przełączaniem rdzeni procesora lub migracją wątków, może ono być z powodzeniem stosowane w wielordzeniowych architekturach procesorów.

8. Ocena końcowa

Rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Frankiewicza ma charakter praktyczny. Doktorant wykazał się w Rozprawie głęboką wiedzą w zakresie mikroelektroniki, zarówno z punktu widzenia teoretycznego jak i praktycznego. Stawiane przez Autora cele zostały osiągnięte, a teza Rozprawy udowodniona i zweryfikowana eksperymentalnie. Wszystkie przedstawione uwagi krytyczne mają charakter konstruktywny i nie obniżają zdecydowanie pozytywnej oceny Rozprawy.

W konkluzji stwierdzam, że Rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Frankiewicza zatytułowana „*Generator taktujący TCO sterowany temperaturą jako nowy element systemu zwiększania mocy obliczeniowej i redukcji energii zasilania*” spełnia z nadmiarem wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie o tytule i stopniach naukowych z dnia 14 marca 2003 roku, wraz z późniejszymi zmianami, i wnioskuje o dopuszczenie Rozprawy do publicznej obrony.

Podpis