

Dr hab. inż. Piotr Kmon
Katedra Metrologii i Elektroniki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki
i Inżynierii Biomedycznej
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Kraków, dn. 17.04.2023

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMATYCZNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy: „Układ zintegrowanego generatora o architekturze hybrydowej i niskim poborze mocy oraz metoda jego projektowania w nanometrowych technologiach CMOS”

Autor rozprawy: **mgr inż. Igor Butryn**

Promotor: **prof. nzw. dr hab. inż. Witold Pleskacz**

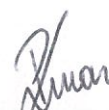
- 1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora?**

Autor pracy doktorskiej podjął się opracowania architektury oraz metodologii projektowania zintegrowanego generatora na potrzeby układów syntezy częstotliwości. Teza rozprawy „*W nanometrowych technologiach CMOS można zrealizować scalony oscylator charakteryzujący się małym poborem mocy i niskim poziomem szumów fazowych, który integruje różne rozwiązania wykorzystywane w generatorach drgań elektrycznych*” zdecydowanie oddaje późniejszą zawartość pracy a mianowicie podjęte prace badawcze dotyczące osiągnięcia konkurencyjnych głównych parametrów projektowanego bloku generatora, tj. niskiego poziomu szumów własnych tegoż bloku przy równoczesnej minimalizacji poboru mocy oraz możliwie szerokim zakresie przestrajania uzyskiwanej częstotliwości drgań generatora.

W tym miejscu zdecydowanie trzeba podkreślić, iż jest to temat istotny w układach radiowych ze szczególnym uwzględnieniem systemów mobilnych czy też sensorów bezprzewodowych a sama praca ma charakter zarówno modelowy jak i doświadczalny - Autor pracy doktorskiej prowadzi liczne analizy symulacyjne, na podstawie których implementuje później rozwiązanie końcowe, które to finalnie jest przez Doktoranta zweryfikowane na drodze pomiarów.

- 2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?**

Doktorant w swej rozprawie ujął 22 prace, do których odnosił się w tekście rozprawy we właściwy i uporządkowany sposób. Większość z tych prac (91%) to prace wydane po 2000 r. w uznanych czasopismach czy też prezentowanych na międzynarodowych konferencjach, jedynie 27% z tych prac to te wydane po 2010 r. co może stanowić pewien niedosyt szczególnie uwzględniając dużą dynamikę obszaru, w którym porusza się Autor pracy. Trzeba jednak zdecydowanie oddać, że Autor pracy doktorskiej uzyskane na drodze pomiarowej wyniki odnosi już w większości do prac nie tylko aktualnych (3 prace wydane po 2017 r., 3 prace pochodzące z



lat 2005-2008 r.) ale i pochodzących z renomowanych czasopism (jak chociażby Journal of Solid State Circuits czy Transactions on Circuits and Systems IEEE). Dwie spośród cytowanych prac to prace autorskie bądź współautorskie Doktoranta.

Praca Pana Igora Butryna zawiera właściwą analizę źródeł oraz stanu wiedzy co też potwierdzają rozdziały II oraz III pracy doktorskiej, gdzie Autor formułuje właściwe wnioski i przeprowadza poprawne analizy dokumentując tym samym swoją dobrą wiedzę w zakresie realizowanej tematyki.

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

Praca Doktoranta dowodzi postawionej tezie a podjęte przez Autora kroki badawcze i użyte metody są poprawne i uzasadnione. Pozyskane wyniki są bardzo cenne i jak najbardziej stanowią wartość dodaną w obszarze nauk technicznych.

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

Autor rozprawy w sposób oryginalny rozwiązał wskazany przez siebie problem a mianowicie budowę generatora o niskich szumach własnych oraz małym poborze mocy. Rozwiązanie zaproponowane przez Doktoranta w głównej mierze polega na wykorzystaniu architektury hybrydowej generatora składającej się z dwóch działających równocześnie generatorów drgań, tj. generatora Colpittsa w wersji z usprawnioną transkonduktancją oraz generatora z krzyżową parą tranzystorów (z ang. Cross-Coupled). O ile architektury użytych bloków generatorów są znane to zdecydowanie sposób ich wspólnego zestawienia przez Autora pracy jak i zaproponowany przez Doktoranta algorytm projektowania generatora są samodzielnym i oryginalnym dorobkiem Autora. Dodatkowo, Doktorant zaproponował architekturę pojedynczego generatora produkującego sygnały różnicowe oraz kwadraturowe poprzez zastosowanie połączonego w szereg z stopniem Colpittsa dzielnikiem częstotliwości – dzięki temu możliwe było zaoszczędzenie dodatkowej mocy oraz wyeliminowanie efektu degradacji amplitudy sygnału jak miało by to miejsce w przypadku rozwiązania z krzyżowym połączeniem tranzystorów. W tym miejscu należy również podkreślić, że działania modelowe, potwierdzające podjęte przez Autora kroki badawcze, nie miałyby tak istotnej wartości gdyby nie późniejsza skuteczna implementacja tychże bloków w postaci działającego układu zintegrowanego. Ma to szczególne znaczenie w technice radiowej oraz wykorzystywaniu nowoczesnych technologii produkcji układów scalonych, gdzie liczne subtelności występujące przy projekcie masek układu scalonego, symulacjach postekstrakcyjnych, strategii odpornościowej PVT, czy zestawianiu toru pomiarowego mogą znacząco pogorszyć oczekiwane wyniki. Autor bardzo dobrze wszystkie te czynniki uwzględnił czego wyrazem jest tabela porównawcza 6.3 oraz 9 patentów współautorskich (w 6 patentach Autor ma większościowe udziały wykonawcze).

Odnosząc uzyskane przez Autora wyniki do stanu wiedzy reprezentowanej przez literaturę światową należy podkreślić, że w relacji do rozwiązań zaczerpniętych z renomowanych

periodyków (Journal of Solid State Circuits, Transactions on Circuits and Systems czy Microwave and Wireless Components Letters) praca Doktoranta charakteryzuje się najmniejszą zajmowaną powierzchnią przy jednym z najmniejszych poborów mocy i co ważne przy porównywalnym poziomie szumów fazowych. Dodatkowo, należy tutaj podkreślić, że zrealizowany układ wyprodukowany był w technologii z aluminiowymi łączeniami (w przeciwieństwie do miedzianych połączeń występujących w porównywanych przez Autora rozwiązaniach) co działało na niekorzyść parametrów szumowych zaprezentowanego prototypu. Jednakże, dzięki poczynionym przez Doktoranta pracom Autor zdołał osiągnąć wyniki tak parametru FoM jak i szumów fazowych porównywalne z przywoływanymi pracami. Jest to zdecydowanie bardzo dobrym osiągnięciem.

5. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Z punktu widzenia części merytorycznej pracy Autor w sposób przekonujący dowiódł zasadności stosowanych metod aczkolwiek są w pracy miejsca, które w mojej opinii wymagają dodatkowego komentarza bądź też wyjaśnienia, a mianowicie:

- 5.1 O ile zastosowanie architektury hybrydowej, jej analizy symulacyjne i późniejsze pomiary bezwzględnie dowodzą zasadności podjętych kroków to w pracy nie doszukałem się wyjaśnienia (czy to w postaci wzorów symbolicznych czy opisu słownego) z jakiego powodu sprzęgnięcie tych dwóch stopni niesie ze sobą artykułowane przez Doktoranta korzyści dotyczące głównie szumów i poboru mocy.
- 5.2 Na str. 42 pracy Autor wspomina o przyjętym przez Niego uproszczeniu w modelowaniu. Nie ma jednak komentarza dotyczącego głównej motywacji tego zabiegu oraz jak to uproszczenie wpływa na pozyskiwane wyniki.
- 5.3 Str. 43 zawiera warunek powstawania drgań – czy jest to wg Autora jedyny warunek powstawania drgań? W dalszej części pracy można znaleźć stwierdzenie, że w projektowanym układzie dobrano dwukrotnie większą transkonduktancję aniżeli przytoczony na str. 43 warunek – proszę o wyjaśnienie. Czy Autor rozważył dynamiczną zmianę wartości tej transkonduktancji tak aby móc efektywniej gospodarować poborem mocy, np. w postaci dodatkowego bloku AAC?
- 5.4 Na str. 39 można znaleźć dość niefortunny opis zależności częstotliwości drgań oscylatora pierścieniowego od liczby stopni elementów opóźniających – tamże ta zależność jest wprost proporcjonalna.
- 5.5 Wzór 3.7 – brak „-„
- 5.6 Na str. 46 Autor przywołuje wzór konduktancji generatora Colpittsa i stwierdza, że w porównaniu do wersji z krzyżowym połączeniem tranzystorów jest ona zależna od częstotliwości. Brak jest jednak komentarza czy taka cecha jest pożądana czy też nie.
- 5.7 Na str. 52 wzór 4.2 wynika z wzoru 3.7 oraz wzoru 3.8 a nie jak to jest przedstawione w tekście. W jaki sposób były realizowane symulacje z Rys. 4.6 – czy w oparciu o wzór 4.2 czy pełen model generatora? Z czego wynika przyjęty przez Autora podział prądu zasilającego poszczególne generatory, czy kryterium to dotyczy szumów?
- 5.8 Co ograniczało uzyskiwanie maksymalnej indukcyjności cewki w zrealizowanym prototypie? Do modelowania układu cewki użyto oprogramowania Momentum – w oparciu o jakie dane z procesu CMOS funkcjonowało to narzędzie?

- 5.9 Autor na Rys. 6.9 – 6.11 demonstruje wyniki symulacyjne doboru punktu pracy generatora. Które z tych wyników były potwierdzone na drodze pomiarowej? Z kolei Rys. 6.11 pokazuje minimum gęstości widmowej szumów, którego źródło pozostało bez komentarza a może być jak najbardziej interesujące. Czy ten zysk w szumach fazowych odnotowany dla prądu ok. 200 μA jest zasadny (wydatkowanie np. 100 μA pogarsza nieznacznie szумы fazowe jak pokazuje ch-ka)?
- 5.10 Proszę o dodatkowy komentarz dotyczący strategii tworzenia masek układu scalonego a w szczególności stosowania/braku stosowania metalicznych warstw wypełniających.
- 5.11 Proszę o dodatkowy komentarz dotyczący rys. 6.7 oraz 6.8 (dodatkowe tranzystory PMOS kontrolowane napięciem *vtrim* oraz układ polaryzacji). Jakie były tutaj podjęte kroki projektowe?
- 5.12 Ile układów zmierzono oraz jak kształtowały się ich główne parametry?
- 5.13 Czy Doktorant może przybliżyć zastosowaną metodę kontroli częstotliwości generatora w oparciu o modulator delta-sigma?

Z punktu widzenia części edycyjnej praca Doktoranta przygotowana jest w sposób czytelny a analizowane problemy czy też opisywane układy są przejrzysto prezentowane. Cały obraz części edycyjnej zaburzą nieco nieprecyzyjności w postaci:

- licznych literówek i błędów interpunkcyjnych,
- niektóre ze zdań pisane są w sposób wrywkowy zaburzając nieco ciągłość,
- brak konsekwencji tak w stosowaniu opisów (naprzemiennie anglojęzyczne lub polskojęzyczne), sposobu przedstawiania rysunków (kilkukrotne powtórzenia niemalże tych samych rysunków tj. Rys. 4.5/3.10, 4.3/5.2 czy 4.4/5.3 czy też braki w węzłach schematów),
- wzory powszechnie znane są potwierdzane źródłem literaturowym, podczas gdy te znacząco bardziej skomplikowane są pozostawione bez odniesienia literaturowego,
- Rys. 3.8 oraz wzór 3.7 mają inne oznaczenia,
- opis układów syntezy jest bardzo ciekawy ale niejednorodny bo niektóre z części traktowane są bardzo szczegółowo podczas, gdy inne bardzo powierzchownie (jak np. układy z Rys. 2.7 oraz 2.8).

W tym miejscu zdecydowanie chciałbym podkreślić, że moje uwagi dotyczące natury edycyjnej mają na celu jedynie wskazanie tego obszaru pracy badawczej Doktoranta (część dotycząca prezentowania wyników wpisuje się bezwzględnie w zakres pracy badacza), w którym można by jeszcze poświęcić nieco więcej czasu tak by kompletny odbiór pracy był mniej zaburzony przez tę sferę i nie rzutował na całokształt pracy.

Poza częścią opisową pracy doktorskiej, Pan Igor Butryn jest dodatkowo głównym autorem 3 prac (z czego jedna w czasopiśmie *Electronics* z listy ministerialnej, 100 pkt., IF = 2.7) oraz współautorem 2 prac (z czego jedna w czasopiśmie *Sensors* z listy ministerialnej, 100 pkt., IF = 3.8) o zasięgu międzynarodowym co też dodatkowo dowodzi umiejętności poprawnego oraz przekonującego artykułowania uzyskanych wyników.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Praca Pana Igora Butryna wykazuje wiele cech przydatności dla nauk technicznych co przejawia się w uzyskaniu bardzo dobrych wyników zaprojektowanych struktur zintegrowanego układu scalonego rozwiązując problem wzajemnego powiązania szumów fazowych, pobieranej mocy oraz zajmowanej powierzchni przez zaproponowany prototyp.

W konkluzji stwierdzam, że praca Doktorska Pana mgr inż. Igora Butryna pt. „Układ zintegrowanego generatora o architekturze hybrydowej i niskim poborze mocy oraz metoda jego projektowania w nanometrowych technologiach CMOS” ma charakter doświadczalny z licznymi elementami teoretycznymi. Biorąc pod uwagę przeprowadzone metody badawcze, zaproponowany algorytm projektowania generatorów, publikacje Autora, czy też uzyskane parametry zaprojektowanego układu zdecydowanie stwierdzam, że niniejsza praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim z wyraźnym nadmiarem.

