



Kraków, 6 maja 2015

RECENZJA rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominika Przyborowskiego:

Zastosowanie submikronowych technologii VLSI w rozwoju wielokanałowych układów scalonych do odczytu detektorów cząstek jonizujących

Uwagi wstępne

Rozprawa mgr inż. Dominika Przyborowskiego pokrywa szeroki zakres tematyczny. Może przypisanie jej określenia „interdyscyplinarna” byłoby przesadą, ale nie wielką. Mamy tu do czynienia z perfekcyjną znajomością planarnych technologii CMOS, świetnym przygotowaniem teoretycznym do tworzenia i analizy transmitancji operatorowych złożonych układów elektroniki analogowej, za którym stoi imponująca już praktyka wiązania tych finezyjnych opisów teoretycznych z konkretnymi rozwiązaniami układowymi. Dzięki takiej wiedzy Doktorant może sobie czasem pozwolić na swobodny dystans do formalnego opisu, jak na przykład w dyskusji (o biegunach) pewnego wzoru, pisząc: „rozwiązanie pierwiastków równania mianownika jest zazwyczaj zadaniem nie trywialnym i nakład pracy zużyty do osiągnięcia wyrażenia na bieguny jest niewspółmierny z dokładnością obliczeń, obarczonych od początku analizy tolerancją wynikającą z uproszczeń zastosowanych w modelu małosygnałowym”. Może sobie pozwolić, bo wie jak i jakimi elementami można „pomaniplulować”, by osiągnąć rozwiązanie praktyczne, przesunąć biegun, czy zero odpowiednio „modelując” transmitancję.

Zacząłem od pochwał ogólnych i chcę to jeszcze tutaj kontynuować zwracając uwagę na powiązania procesów projektowania, prototypowania i testów chipów odczytu detektorów z wymaganiami, a raczej należałoby powiedzieć: z wyzwaniem pochodzącymi od strony eksperymentów fizycznych, którym służą. Są to wielorakie powiązania, które nie dają się sprowadzić do kilku założeń projektowych, ani do znajomości paru parametrów sensorów. Fizyka eksperymentu wnika w głąb większości etapów procesu projektowania począwszy od wyboru technologii do końcowych testów prototypu, a projektant elektroniki odczytu detektorów jest jednym z kluczowych fizyków eksperymentatorów bez których eksperymentu by nie było.

Teza i cel pracy

Autor stawia sobie wyraźne zadanie: zamierza zaprojektować i zbudować dwa obwody scalone w technologii CMOS, układy elektroniki odczytu. Jeden dla

diamentowych detektorów monitorujących wiązki protonów w eksperymencie CMS przy LHC. Drugi do odczytu sygnałów ze słomkowych gazowych komór dla budowanego eksperymentu PANDA w GSI Darmstadt.

Nie pierwszy raz zdarza mi się recenzować pracę, w której teza nie jest jawnie sformułowana. Przyjmuję domyślnie, że tezą Doktoranta było, że mu się te zadania udadzą. To nie była teza trywialna w świetle wspomnianych wymagań i wyzwań, które elektronice odczytu detektorów stawiają współczesne eksperymenty fizyki cząstek, dotyczących, między innymi, wyboru technologii, szybkości działania, poziomu szumów, czy odporności na uszkodzenia radiacyjne.

Układ i treści rozdziałów

Przedstawiona do recenzji ok. 150-stronicowa rozprawa składa się z trzech rozdziałów i krótkiego podsumowania. Zawiera też spis bibliografii ze 133-ema pozycjami, spis 101 rysunków oraz użyteczny i dosyć kompletny wykaz symboli i skrótów.

Rozdział pierwszy to 32 strony zwięzłego wprowadzenia do zagadnień modelowania i projektowania tranzystorów i biernych elementów obwodów scalonych w technice CMOS. Wysoko oceniam głęboką znajomość teorii, z wieloma relacjami Doktoranta do aktualnych prac tej rozwijającej się przecież intensywnie i, z pewnością, nie „podręcznikowej” dziedziny. Opis prowadzony jest ponadto tak, iż jasne jest, że za niewątpliwą wiedzą teoretyczną Doktoranta stoi jego solidna już praktyka projektanta zaawansowanych układów. Pod wizytówką „efekty krótkiego kanału” - synonimem drogiego nam postępu w miniaturyzacji obwodów jesteśmy prowadzeni przez Dominika Przyborowskiego fascynującą, pełną przygód, drogą postępu technologii, na której imperatyw miniaturyzacji coraz to spotyka się z degradacją osiągniętych poprzednio jakości. Poznajemy, jak kolejne inwencje czy to dotyczące procesów technologicznych w obróbce kryształów kwarcu, czy układowe przywracają lub wręcz poprawiają jakość i wydajność obwodów, stale zwiększając ich przestrzenne upakowanie.

Warto zwrócić uwagę na sekcję dotyczącą dyskusji „efektów niedopasowania”, która jest dosyć uniwersalna, nie ma wiele wspólnego ze skracaniem kanału, ale świetnie odzwierciedla, jak sądzę, „sztukę” projektowania, którą posiadał nasz Doktorant, której nie da się wziąć z teorii, ale, nie mniej, trzeba ją umieć opisać i zamodelować.

Przy lekturze kolejnych rozdziałów okaże się też, jak celowy jest dobór zagadnień tego wprowadzającego opisu z rozdziału pierwszego, jak cała grupa analizowanych tam „efektów krótkiego kanału” przygotowuje zrozumienie rozwiązań przyjętych dla układów BCM1F (CMS), czy chipów odczytu dla gazowych komór słomkowych dla eksperymentu PANDA, a opisanych w rozdziałach 2 i 3. Chociaż długości kanałów w przypadku eksperymentów CMS i PANDA nie sięgają technologicznego „ostrza noża”, ze względu na wyważone decyzje dotyczące wyboru technologii, to rozważania z rozdziału pierwszego znakomicie pomagają śledzić procesy projektowania dla tworzonych układów.

W rozdziale 2 towarzyszymy Doktorantowi w tworzeniu projektu, symulacji i testach układu elektroniki odczytu dla szybkiego monitorowania wiązki

protonów w eksperymencie CMS. Właśnie zakończone przygotowania LHC do prawie dwukrotnego zwiększenia energii protonów (6.5 TeV) i zwiększenia częstości zderzeń pakietów do nominalnych 40 MHz narzuciły konieczność wymiany monitora wiązki z nową elektroniką front-end przed którą postawiono długą listę wymagań opisanych w sekcji 2.2.

Na ok. 40 stronach rozdziału 2 poznajemy projekt elementów układu: transimpedancyjnego kaskodowego przedwzmacniacza, kolejnych stopni wzmacniania i kształtowania sygnału, z końcowym wyjściem różnicowym. Dzięki wspomnianemu już celowemu przygotowaniu z rozdziału pierwszego możemy dobrze śledzić powstawanie projektu. Widzimy składanie elementów w pełny schemat toru odczytu, ale także tworzenie modelowej reprezentacji zespołów ilustrujących ich analizę małosygnałową. Przyznam, że trochę gubię się miejscami w rozgraniczeniu modelowania, symulacji, parametryzacji i pomiarów. Myślę, że klarowność dodała by wartości tej i tak znakomitej rozprawie. Może też poparta na przykład odniesieniami do narzędzi programistycznych stosowanych na tych etapach projektowania i testów. Sytuacji nie poprawia też brak opisów przy rysunkach takich, jak np. 2.26, 2.27, 2.33 co oznaczają punkty, a co linie ciągłe.

Nie ma potrzeby przepisywania tekstów tego fascynującego rozdziału. Wystarczy powtórzyć za Autorem, że kluczowe wymagania projektowe po zbudowaniu układów prototypowych okazały się spełnione ponad oczekiwania. Dotyczy to zwłaszcza parametrów czasowych, liniowości, a także wyników analizy szumowej. Spodziewałbym się, że te ostatnie sprawiają najwięcej satysfakcji projektantom, bo chyba sumują wiele rozmaitych efektów sztuki projektowania.

Rozdział trzeci opisuje projekt obwodu scalonego do odczytu słomkowych komór gazowych wykonanego w technologii AMS 350 nm. Poza inną technologią układ ten różni się znacznie od poprzedniego ponieważ odczyt sygnału z detektora gazowego - słomek o średnicy 10 mm - wymaga specyficznego kształtowania impulsu wejściowego (o szybkiej składowej elektronicznej i długim ogonie jonowym). Układ ma też spełniać dodatkowe „zamówienie” eksperymentu: mierzyć amplitudę impulsu, co postanowiono zrealizować techniką TOT (time over threshold), zastępując tym zbyt kosztowne, wielokanałowe ADC. Skoro, chcąc nie chcąc, zajmujemy się jakoś pomiarem czasu dryfu, moglibyśmy się wdać w akademicką dyskusję, czy mówimy nadal o gazowych komorach proporcjonalnych czy o komorach dryftowych.

Obserwowanie mistrza w jego warsztacie jest zawsze fascynującą przygodą. Tutaj, dodatkowo obserwujemy jak operuje znanymi nam już narzędziami dla innych rozwiązań układowych. Asystujemy więc przy powstawaniu projektu ładunkowo czułego przedwzmacniacza, dwóch stopni kształtujących spełniających też funkcje eliminacji ogona jonowego, stabilizacji linii bazowej, koniecznej wobec wymaganej 1 ns rozdzielczości pomiaru czasu (dla realizacji wspomnianej już techniki TOT). W dalszym ciągu rozdziału przedstawiona jest wnikliwa analiza szumowa, a następnie opis symulacji przeprowadzanych dla poszczególnych stopni oraz dla całego toru odczytowego.

Poza zasadniczą wartością którą jest zbudowanie samego urządzenia taka konstrukcja rozprawy przydaje jej znacznych wartości dydaktycznych.

Pewną „atrakcją” w treści rozdziału 3 jest dosyć niespodziewana sytuacja spowodowana testowaniem prototypu układu odczytu na wadliwie skonstruowanej płycie testowej. Autor potrafił „obrócić klęskę w sukces”

umiejętnie separując wyniki niezakłócone błędami płyty testowej od tych, które powtórzone w pomiarach poprawionego stanowiska pomiarowego. Serie pomiarów wykonywanych w latach 2011 i 2012 przy akceleratorze w Jülich posłużyły opracowaniu szeregu modyfikacji projektu i wykonaniu finalnej wersji układu spełniającej wszystkie założenia projektowe. Ten proces modyfikacji jest tu bardzo dobrze opisany i znów, poza meritum sprawy, dodaje tych wartości dydaktycznych, o których wspomniałem poprzednio.

Usterki, uwagi

Redakcja tej pracy jest tak staranna, że recenzent nie ma okazji ponarzekać na literówki i błędy składniowe. Pozostają mi dwie uwagi krytyczne: moje konwencjonalne podejście do notacji matematycznej nie pozwala zadowolić się wzorami 1.2.10 b i c na stronie 28, gdzie analiza wymiarowa czy logarytmowanie wyrażenia wymiarowego budzi wątpliwości. Druga uwaga dotyczy par rysunków 1.10, które porównują zależności znormalizowanych prądów drenu dla technologii 350 i 130 nm. Narysowanie ich w różnych skalach, (tak w x jak i w y) jest niezręczne, zwłaszcza, że towarzyszący tekst obiecuje, że „zatem łatwo można zauważyć różnicę ...”.

Zamieszczam je wypełniając obowiązki recenzenta, ale są to drobne uchybienia, nie mające istotnego znaczenia merytorycznego i nie zmieniające mojej opinii o wyjątkowo starannej redakcji rozprawy.

Podsumowanie recenzji

Rozprawa mgr inż. Dominika Przyborowskiego opisuje zaprojektowane przez niego zbudowane i przetestowane układy scalone dla dwóch diametralnie różnych źródeł sygnałów wejściowych. Powstały wartościowe, nowe i oryginalne układy działające pewnie i zaakceptowane do użycia przez wielkie międzynarodowe współprace. Stawia to recenzenta oceniającego wartość merytoryczną projektów w komfortowej sytuacji, bo trudno wyobrazić sobie surowszych sędziów. Dodaję natomiast do tej oceny urządzeń bardzo wysoką ocenę samej rozprawy. Składa się na nią jasność i zwięzłość opisu bardzo trudnej i złożonej materii projektowania wyrafinowanej elektroniki analogowej w technologii submikronowej. Nie rezygnując z trudnej, nasyconej wzorami analizy Autor potrafił poprowadzić opis tak, że można rozumieć wraz z nim relacje teorii i konkretnych rozwiązań układowych, a ponadto potrafił to opisać tak, że tekst czyta się z wyraźnym zainteresowaniem.

Oceniam rozprawę przedstawioną przez mgr inż. Dominika Przyborowskiego jako bardzo dobrą. Stwierdzam z przekonaniem, że w formie i treści spełnia wszelkie wymagania stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ponadto, wobec wyjątkowych wartości tej pracy stawiam wniosek o jej wyróżnienie, dołączając dla tego wniosku krótkie uzasadnienie.

