

Vážený pán
prof. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.
předseda Vedecké rady FEI STU
Středisko pro projekty a spolupráci s praxou,
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Slovenská Technická Univerzita v Bratislavě,
Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava
Slovenská republika

Věc: Oponentní posudek habilitační práce pana Dr. Lukáše Nagya

Vážený pane profesore,

na základě Vaší žádosti ze dne 7.1.2025, předložené habilitační práce a dalších souvisejících dokumentů jsem vypracoval posudek k habilitačnímu řízení Ing. Lukáše Nagya, PhD. Pro vypracování posudku byla k dispozici řada podkladů. Kromě samotné habilitační práce se jednalo o profesní životopis uchazeče, kritéria habilitačního řízení, soupis pedagogické praxe, obsáhlý seznam výstupů tvůrčí činnosti a soupis publikačního ohlasu včetně dokladu o uznání vědeckou komunitou.

1. Téma a aktuálnost práce k oboru habilitačního řízení a současnému stavu vědy

Dr. Lukáš Nagy předložil habilitační práci s názvem „Příspěvek k ultra nízkonapětovým a nízkopříkonovým systémům na čipe“. Tématem práce o rozsahu 92 stran je jeho dosavadní přínos k návrhu nízkopříkonových systémů na čipu do kmitočtů jednotek MHz. Téma práce jednoznačně spadá do oblasti oboru Elektronika. Práce představuje příklady řešení nízkopříkonových obvodů s extrémně nízkým napájením za využití několika moderních technik (např. řízení tranzistorů bulkem namísto gatem), ukazuje optimalizovaná řešení ESD opatření a předvádí i ukázky provozu analogových bloků pracujících v podmínkách extrémně nízkého napájení. Cílové je zajistit velice nízkou spotřebu řádu nW až uW, která je nutná pro aplikace v bateriově napájených systémech. Text habilitační práce je členěn do tří kapitol.

První kapitola rozebírá fyzikální jevy a principy v unipolárních tranzistorech. Jako proces použitý pro vývoj a demonstraci diskutovaných řešení byl vybrán CMOS 130 nm (a 65 nm). Nepovedlo se mi nalézt odkaz na konkrétní proces (firma – TSMC/IHP/AMS....) specifického označení, což je pro reprodukovatelnost uváděných výsledků užitečné. Diskutovány jsou modely MOSFET používané pro průmyslový vývoj (BSIM, EKV), jejich principy a složitost. Autor ukazuje prakticky použitelné vztahy, které lze při znalosti mnohem omezenějšího počtu parametrů zjednodušených modelů využít pro snadnější praktický návrh nejen bulk-driven struktur. K tomu je nutná extrakce hodnot ze získaných (simulací, měření) závislostí pro různé geometrie tranzistorů (úzký/dlouhý, široký/krátký, atd.). Věřím, že pokud by byly tyto údaje běžně prezentovány výrobcem procesu v design manuálu, tak značně zjednoduší návrh aplikací. Porovnání ukázaná v práci dokazují, že EKV model umožňuje mnohem vyšší přesnost pro většinu praktických případů „bulk-driven“ návrhu, než standardní BSIM modely. V současné chvíli je pravděpodobně nutné tyto parametry získat pro každý specifický proces na straně návrháře. Nicméně tuto problematiku považuji za velmi přínosnou a určitě užitečnou pro další vývoj v oblasti nízkopříkonové integrované elektroniky a to především v oblasti zjednodušení popisu a modelování základních elementů.

Druhá kapitola se zaměřuje na řešení ESD ochran potřebných pro fyzickou implementaci integrovaných buněk v praxi (zejména automotive aplikace kladou vysoké nároky na spolehlivost a odolnost

čipů). Cílem je optimalizace různých způsobů známých principů ESD ochran vzhledem k možnému zvýšení spotřeby obvodu při jejich přítomnosti. Proto tato oblast zasluhuje pozornost při návrhu nízko-příkonových integrovaných systémů. Modelování ESD diod pro oblast kladného a záporného napájení (popsaným modelem) vykazuje perfektní shodu s extrahovanými daty z měření ve srovnání se standardním modelem v procesu. Při takto velké shodě by se hodilo ukázat chybovou funkci (bylo by se čím pochlubit). V textu je řešena především DC oblast, ale vyvstává i otázka co se s charakteristikami a parametry děje při rychlých změnách. Na obr. 2.31 asi není odkazováno v textu. Jinak je v práci minimum formálních problémů. Kvalita a profesionalita formální stránky je vynikající.

Poslední kapitola práce se zabývá návrhem komparátoru s velmi nízkým napájením (tak jako v předešlých případech 0,4 V). Tento komparátor je složitější konstrukce umožňující nespojitě digitální nastavování komparačních hladin (šířky hysterezního okna). Simulovaný systematický i náhodný offset vykazuje velmi příznivé hodnoty (jednotky mV). Velice důležitý je poznatek, že při tomto napájení lze udržet v saturaci pouze 3 „patra“ tranzistorů (např. zrcadel) nad sebou. Popsané závěry výsledné rovnice (3.20) jsou užitečné pro získání co největšího zesílení, které je v principu komparátorů velmi důležité. Kapitola obsahuje experimentální výsledky měření na vyrobeném čipu. Převodní charakteristika komparátoru poukazuje na prakticky nerozlišitelné výsledky simulace a laboratorního měření. Příkon se pohybuje v nízkých jednotkách μW , což je velice příznivé. Obecně bych v textu ocenil častěji uváděné informace a údaje o kmitočtové použitelnosti a limitech navrhovaných obvodů. Dynamické charakteristiky (např. zpoždění hran) vykazují jisté rozdíly měřeného experimentu a simulace, ale přirozeně nelze zaručit naprosto stejné podmínky testů (kontaktování, velikosti parazitních parametrů a jevy se kterými se v simulaci nedá dopředu moc počítat).

Závěrem lze konstatovat, že téma práce je velmi aktuální a přínosné. Text na mne působí velmi profesionálním dojmem a plyne z něj, že autor je skutečným odborníkem a průkopníkem v oblasti nízko-příkonových a bulk-driven obvodů a systémů. Autor se oblasti věnuje řadu let a přispěl k řešení mnoha specifických problémů (zprecizování modelů unipolárních tranzistorů, zjednodušení možností ručního návrhu bulk-driven obvodů, využití moderního přístupu gm/Id, modelování a minimalizace nežádoucí spotřeby ESD ochran, příkladu ověření návrhu speciálního komparátoru). Celkově hodnotím přínos autorových aktivit v práci a vědní oblasti jako vynikající a publikovaný na dobré úrovni (řada impaktovaných časopisů a velký počet mezinárodních konferenčních příspěvků autora a jeho kolektivu).

2. Vědecká a odborná erudice, uznání vědeckou komunitou

Uchazeč a jeho kolektiv pravidelně publikují v impaktovaných časopisech a prezentují příspěvky na prestižních konferencích. K datu 14.1.2025 obsahuje seznam autorových prací na Web of Science (od roku 2010 do současnosti) 54 záznamů, h-index = 6 a 91 citací bez autocitací. Databáze Scopus pak uvádí 145 citací bez autocitací (h-index = 7). Z uvedeného plyne, že se jedná o mezinárodně uznávanou vědeckou osobnost. Podle doložených podkladů pracoval Dr. Nagy na velké řadě projektů v oblastech popisovaných habilitační prací (mikroelektronický návrh, senzorické systémy, nízko-příkonové obvody) a podílel se na návrhu několika ASIC čipů. Jednalo se o národní projekty základního výzkumu (VEGA, APVV), ale i mezinárodní projekty (H2020).

3. Pedagogická činnost

Uchazeč vedl 17 závěrečných kvalifikačních prací studentů bakalářského a magisterského studia. V rámci výuky (pedagogická praxe od roku 2012 činí 12 let) se spolupodílel na přípravě učebních textů a výukových pomůcek. Od roku 2009 vyučoval či dosud vyučuje v řadě předmětů týkajících se analogové,

smíšené i digitální elektroniky, především v oblasti návrhu integrovaných obvodů. Získané poznatky prezentované v habilitační práci jsou významné pro praktickou výuku studentů mikroelektronického zaměření.

Závěr

Téma práce spadá do oboru habilitace a je aktuální vzhledem k současnému stavu vědy, práce obsahuje nové originální informace, výsledky byly publikovány na mezinárodní úrovni (již získaly a získávají citační ohlas a uznání vědeckou komunitou) a mají i praktický dopad. Uchazeč Dr. Nagy zcela splňuje vysoké odborné, vědecké, pedagogické i osobnostní požadavky pro docentskou akademickou pozici a jedná se o uznávaného experta. Na základě předložených dokumentů **doporučuji práci k obhajobě a podporuji jmenování Dr. Nagyho docentem v oboru Elektronika.**

Otázky k obhajobě:

1. Jsou návrhové přístupy jako „bulk-driven“ přívětivé běžným návrhářům analogových obvodů? Lze potřebné parametry pro ruční výpočty (kap. 1.1) získat v design manuálu, nebo je vždy třeba provést extrakci z dat simulovaných/měřených charakteristik? Nezanedbatelná část v práci uváděných vztahů předpokládá znalost materiálových a technologických parametrů (koncentrace nosičů, atd.), které nejsou běžně snadno dostupné. Narážím na skutečnost, že např. již stanovení prahového napětí je při nenulovém napětí bulk-source problematické (většina parametrů nutných pro dosazení do rovnice (3.16)) a zde se přímo počítá s využitím napětí bulk-source pro řízení tranzistoru. Jak se změní vstupní impedance (malosignálová) tranzistoru v případě řízení přes bulk ve srovnání s gate?
2. Text zmiňuje nutnost izolace prvků od společného substrátu (běžný PMOS v n-well problém nemá). Existuje představa, jakým způsobem ovlivní vlastnosti (především AC/kmitočtové) izolace (ring) NMOS prvků od společného substrátu? O jakých kmitočtových pásmech, kde se to začne projevovat, se zhruba bavíme?
3. Je při stanovení $L_{min} = 120 \text{ nm}$ (str. 30) bráno v úvahu standardní doporučení kvůli výstupnímu odporu (λ efekt) nebo technologické minimum procesu?
4. Kolikrát by bylo asi třeba zvýšit spotřebu, aby byl zajištěn provoz dig. bufferů i pro kmitočty nad 1 MHz (str. 42)?
5. Jaký je názor autora na vhodnost 65 nm technologie (i vzhledem k výrobnímu rozptylu a přesnosti) pro analogový návrh vzhledem k dosažitelnému výstupnímu odporu (λ efekt) a současně nemožnosti snadno kaskodováním výstupní odpor zvýšit (při nízkém napájení stovek mV)? Jaká opatření je možné zajistit?

V Brně dne 14.1.2025

S pozdravem,



doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.
Ústav radioelektroniky,
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
Vysoké učení technické v Brně,
Technická 3082/12, 616 00 Brno, Česká republika
+420541146560, sotner@vut.cz