POSUDEK OPONENTA ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	**Budící obvody pro SiC tranzistory s nadproudovou ochranou**
Jméno autora:	**Roman Mrzena**
Typ práce:	diplomová
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra/ústav:	Katedra elektroenergetiky (K13115)
Oponent práce:	Ing. Michal Richter
Pracoviště oponenta práce:	POLL, s.r.o.

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání **náročnější**

Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.

Zadání reaguje na aktuální potřeby aplikačních inženýrů. Dosažení kvalitního výsledku si žádá studenta znalého výkonové elektroniky a fyziky, zkušeného v oblasti návrhu elektroniky, DPS a měření. Autor si musel osvojit práci se simulačním nástrojem LTspice a s prostředím pro návrh DPS.
Vyšší náročnost spatřuji zejména v aplikační části, která klade určité požadavky na zkušenosti získané odbornou praxí.

Splnění zadání **splněno**

Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.

Jednotlivé body zadání jsou adekvátně zpracovány. Úvod čtenáře seznamuje s výkonovými polovodiči na bázi karbidu křemíku a pojmenovává specifika SiC tranzistorů. Základní požadavky na budící obvody a jejich funkce jsou popsány poměrně podrobně. Na budiče SiC tranzistorů jsou však kladeny vyšší nároky nejen z pohledu zkratové ochrany. V tomto kontextu postrádám výčet oblastí se zvýšenými nároky, nebo porovnání požadavků na budiče Si a SiC tranzistorů. Takové porovnání ovšem zadání nevyžadovalo, absenci zmíněného tedy nepovažuji za jeho nesplnění. Návrh Rogowského cívky vychází z příslušných fyzikálních zákonů, které jsou vhodným způsobem aplikovány na zadanou situaci. Bylo navrženo větší množství cívek s využitím matematického modelu i odborných studií. Poslední část zadání „Návrh a realizace budícího obvodu“ je řešena s využitím vývojového kitu UCC21750QDWEVM-025, ten obsahuje budič, který byl v době jeho testování diplomantem ještě v předprodukční fázi. Využití tohoto kitu bylo z pohledu firmy POLL žádoucí, zadání považuji za splněné i v tomto bodě.

Zvolený postup řešení **vynikající**

Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.

Autor ubírá svoji pozornost zejména na rychlou zkratovou a nadproudovou ochranu SiC tranzistorů. Předchozí je do značné míry dáno požadavky firmy POLL, kde zadání vzniklo. Pokud bychom pro řízení SiC tranzistorů použili budič primárně určený pro spínání IGBT, kterých je na trhu v současnosti velké množství, mohli bychom narazit právě na nedostatečné kvality zkratové ochrany pracující na principu desaturace. Pro firmu POLL je přínosné porovnání zkratové ochrany budiče UCC21750 s navrženou ochranou využívající Rogowského cívku, analýza a verifikace parametrů budiče UCC21750, rešerše na téma zkratové ochrany SiC tranzistorů i samotný návrh Rogowského cívky.
Postup ve smyslu posloupnosti jednotlivých kroků řešení považuji za správný. Autor nejprve zkoumá specifika SiC tranzistorů, dále se zabývá požadavky na budící obvody a následně se zaměří na zkratovou ochranu tranzistoru. Postup návrhu samotné Rogowského cívky je též vhodný. Autor při návrhu a výpočtu parametrů vycházel z fyzikálních zákonů. Před realizací na DPS diplomant provedl rešerši, aby zvolil vhodnou technologii, geometrický tvar a zajistil dostatečnou odolnost vůči rušení (stínění, kompenzace vinutí). Navrhl velké množství cívek (7) a podrobil je analýze, přičemž použil vhodné náhradní schéma. Výsledky správně komentoval. Pro dané účely navrhl a vybral vhodnou cívku. Zkratovou ochranu implementoval vhodným způsobem, čímž zajistil velmi krátký reakční čas. V této části bylo nutné zabránit opětovnému sepnutí do zkratu, což autor zajistil pomocí D-klopného obvodu.
Student použil patřičné nástroje a provedl potřebná měření, ta probíhala na Fakultě elektrotechnické ČVUT i ve firmě POLL.

Odborná úroveň **A - výborně**

Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.

Klíčová témata pro návrh budiče s nadproudovou a zkratovou ochranou jsou vypracována dostatečně podrobně. Kvalitu návrhu dokládají výsledky měření. Diplomant prokázal schopnost využít znalosti získané předchozím studiem. Je patrné, že využívá také zkušenosti získané odbornou praxí.
Práce respektuje zvyklosti z praxe a celkově je na výborné úrovni.

Formální a jazyková úroveň, rozsah práce **B - velmi dobře**

Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.

Text je odborného charakteru, je přehledný, převážně stručný a dobře srozumitelný. Členění je logické, v tomto ohledu mám minimum připomínek – např. obsah podkapitoly 3.4 souvisí primárně se ztrátovým výkonem a mohl být zahrnut do podkapitoly 3.5. Obrázky jsou převážně dobře čitelné, rovnice užívají vhodných symbolů, celkově práce působí úhledně. Oceňuji gramatickou správnost, nalezl jsem pouze několik málo chyb, většinou v interpunkci. Množství překlepů je přiměřené rozsahu práce. Vytknout lze autorovi častější výskyt hovorových výrazů.
K formátování mám pouze drobné výhrady – např. rozdílný font čísla a textu nadpisů nebo absence hypertextových odkazů (obsah, seznam obrázků a jiné). Některé obrázky jsou v rastrovém formátu, obecně lze u technických textů doporučit použití vektorové grafiky. Jak jsem již uvedl, čitelnost obrázků není špatná a předchozí tak zůstává na úrovni doporučení.
Rozsah odpovídá požadavkům.

Výběr zdrojů, korektnost citací **B - velmi dobře**

Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.

Autor čerpal z přiměřeného množství zdrojů. Uvedené prameny mají vhodnou strukturu. Citace obsahují knižní zdroje, podklady k vysokoškolským přednáškám, odborné články a časopisy, hojně jsou zastoupeny katalogové listy, příručky a jiné dokumenty výrobců elektroniky. Oceňuji také využití cizojazyčných materiálů. Rozmanitost použitých pramenů společně se stručným seznamem doporučené literatury vypovídá o vysoké aktivitě studenta, jejich relevance potom svědčí o schopnosti efektivně využít dostupné informační kanály. Velmi užitečné bylo např. studium zdroje č. 24.
Seznam citované literatury však obsahuje položky s chybějícími atributy – např. zdroj č. 15 (chybí název). Odkazy u některých online zdrojů nejsou funkční, nebo nevedou k uvedenému zdroji – např. položka č. 8 (chybný odkaz) a 18 (nefunkční odkaz), ve většině případů není uvedeno datum citování.
Autor v textu rozlišuje převzaté prvky od vlastních.

Další komentáře a hodnocení

Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.

Oceňuji výstup v podobě funkčního vzorku, který je schopen detekovat zkrat s minimálním zpožděním, bezpečně vypnout tranzistor a setrvat v chybovém stavu, čímž dojde k zamezení opětovného sepnutí do zkratu. Reakční čas cca 300 ns, který je z části tvořen zpožděním budiče, je skutečně velmi pěkným výsledkem.
Diplomant velmi dobře zvládl všechny etapy návrhu budiče – rešerše, výpočty, simulace, příprava výrobních podkladů a otestování. Proto se domnívám, že je dobře připraven na budoucí praxi.

III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE

Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uveďte případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.

V rámci diplomové práce autor sestavil postup návrhu Rogowského cívky, realizoval 7 různých vzorků, analyzoval jejich vlastnosti měřením a na základě výsledků těchto měření vybral vhodnou cívku pro nadproudovou a zkratovou ochranu. Dále diplomant navrhl integrátor a obvody zajišťující rychlé vypnutí poruchového stavu. Oceňuji výsledek v podobě funkčního vzorku a velmi krátký reakční čas ochrany (cca 300 ns). Výsledky předložené práce jsou pro firmu POLL přínosné.
Student využil množství pokročilých nástrojů – např. PADS, LTspice nebo Wolfram Mathematica.
Kladně hodnotím také studium a prezentaci závěrů několika relevantních odborných článků.

K obhajobě pokládám následující otázky:

1. V jakém směru jsou kladeny na budiče SiC tranzistorů vyšší požadavky oproti budičům IGBT obdobných parametrů? Pokud je to možné, doplňte úvahu o přibližné číselné hodnoty. Můžete vycházet z porovnání Si IGBT a SiC MOSFETu shodného blokujícího napětí a srovnatelného nominálního proudu.
2. Jak lze interpretovat frekvenční charakteristiky uvedené v příloze číslo 4? Jsou indukčnost a odpor cívky frekvenčně závislé? Lze za pomoci výsledků z impedančního analyzátoru dopočítat parametry náhradního modelu Rogowského cívky prezentovaného na obrázku č. 32? Uveďte alespoň jeden způsob popisu frekvenčních vlastností tohoto dynamického systému.

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **A - výborně.**

Datum: 19.1.2020 Podpis: