

Oponentní posudek

disertační práce na téma Využití SiC polovodičových součástek ve výkonové elektronice

autora Ing. Jana Štěpánka, ZČU Plzeň 2019

Téma práce je zvoleno zcela v souladu s aktuálním trendem v oblasti výkonové elektroniky, kdy se z důvodu nutnosti zvyšovat účinnost a snižovat rozměry zařízení začínají používat polovodičové materiály SiC nebo GaN jako alternativa k již zavedenému Si.

V úvodu disertační práce jsou vhodným způsobem představeny perspektivní širokopásmové polovodičové materiály, nejen tedy SiC ale i GaN s tím, že se práce z pochopitelných důvodů bude zabývat zařízeními na základě SiC polovodičů. V úvodu jsou zmíněny i tzv. hybridní SiC součástky, samotná práce se jimi dále nezabývá. To je z mého pohledu možná škoda, neboť hybridní součástky nalézají uplatnění u střídačů pro napájení motorů s vyšším napětím. Autor naznačuje také správně důvody, jež dosud brání masivnímu rozšíření SiC prvků ve výkonové elektronice a tou jsou uspokojivé životnostní modely.

Samotná disertační práce je pak souborem tří samostatných projektů, které spojuje problematika tepelného návrhu zařízení a jeho účinnosti a buďto hlavního nebo alternativního použití SiC prvků.

První část disertační práce věnovaná návrhu trakčního střídače na základě plných SiC spínacích součástek pro použití v elektromobilu. Návrh je zpracován přehledně, jsou uvedeny kritéria výběru prvků včetně několika alternativ a motivy pro vybrání zvolené alternativy. V části popisující tepelný návrh je postupováno podle zavedených metod lineárních tepelných modelů, jak je uvedeno např. na obrázku 5 na straně 18. V dalším návrhu je tento model zjednodušen ignorováním tepelných kapacit na model statický. Toto zjednodušení považuji, zvláště při návrhu trakčního automobilového měniče, za poněkud nešťastné, neboť takový měnič bude pracovat naopak velice dynamicky. Tady by bylo vhodné, kdyby autor při obhajobě zdůvodnil, proč se rozhodl dynamiku oteplování ignorovat. Dále mám mírnou výhradu k odvození a stanovení tepelného odporu kapalinového chladiče. Na straně 21 je uvedena soustava rovnic (35, 36 a 37), kde je kombinován pojem $R_{th}(s-a)$ a oteplení chladicího média. V další části je podobná soustava rovnic (40,41) použita pro výpočet potřebného průtoku chladicí kapaliny. Dimenzování chladicí soustavy je prováděno pro ztrátový výkon $10,5kW = 12 \times 875W$, viz například rovnice (41), a cíl byl měnič s výkonem okolo 200kW. Vzhledem k očekávané účinnosti se tedy jedná zhruba o čtyřnásobné předdimenzování. Zde bych také rád požádal autora, aby při obhajobě tento rozpor objasnil.

Následná volba chladiče a jeho konstrukce je plně v souladu se současným stavem techniky. Konstrukce elektrické části měniče, především jeho meziobvodu s plošným spojem a keramickými blokovacími kondenzátory představuje na první pohled velice kvalitní řešení. Je možná škoda, že práce nejde v tomto bodě více do hloubky a nejsou blíže zkoumány spínací děje, možná i tam by byl prostor pro další optimalizaci.

Druhá část disertační práce se zabývá stavbou jednofázového střídačového modulu pro kompenzační účely v energetice. Konstrukce modulu odpovídá stavu techniky pro konstrukci podobných modulů, včetně dobře zvládnutého paralelního spojení výkonových polovodičových půlmůstkových modulů. Projekt je zakončen oteplovací zkouškou výkonové části. S tématem disertační práce souvisí porovnání polovodičů Si a SiC v této aplikaci. Ztrátová bilance pro SiC ve srovnání s Si nevychází bez komplementárního spínání MOSFETu u SiC vůbec dobře. Přibližně trojnásobný nárůst ztrát vedením při ponechání vedení záporného proudu pouze na antiparalelní diodě tak, jak je uvedené v tabulce 20, neodpovídá charakteristikám třetího kvadrantu v datovém listu CAS300M12BM2, Rev. A obr. 13-14. Z datového listu by se dal při proudu 200A odhadnout nárůst ztrát o přibližně 50%, pokud v třetím kvadrantu nebudeme tranzistor zapínat. Zde bych také rád požádal autora o vysvětlení.

Třetí část disertační práce se zabývá měniči pomocných pohonů, konkrétně částí vysokofrekvenčního střídače pro galvanické oddělení. Je také navrhována celá výkonová část včetně zvážení několika variant, jak tomu bylo i u předcházejících částí disertační práce. Výkonová část je provedena na plošném spoji a tak, aby bylo možné provést srovnání křemíkových IGBT s SiC MOSFETy, které je uvedeno v závěru třetí části, kde jsou uvedeny výsledky oteplovacích zkoušek. Zde by stálo za zmínku, nakolik byl měnič naladěn na použití SiC-MOS oproti Si-IGBT, zda se jedná pouze o záměnu výkonových modulů nebo je měnič uzpůsoben SiC součástkám celý.

Jazyková úroveň práce je vysoká, několik málo drobných chyb ji příliš neruší. Ing. Štěpánek používá velké množství anglických výrazů, pro než máme i česká slova. Srozumitelnost práce to nijak nesnižuje, možná by stálo za zvážení pro cizojazyčné výrazy používat jiný styl písma, například kurzívu. Celkově disertační práce působí poněkud nekompaktním dojmem, neboť popisuje tři projekty, které spolu mimo fakt, že se jedná o výkonovou elektroniku a použití SiC, nijak nesouvisí. Zřejmě se jedná o výsledky prací větších týmů, kde autor zde předkládané disertační práce řešil nějakou specifickou oblast. Zda, případně které výsledky prezentované v práci jsou skutečně výsledkem práce autora by bylo vhodné zdůraznit při obhajobě, případně uvést, jaký podíl měl autor na získání těchto výsledků a co bylo vytvořeno v rámci týmu.

Ze seznamu publikací autora je zřejmé, že práce byla průběžně publikována jednak na konferencích, tak i ve vědeckých časopisech, jak je dnes vyžadováno. Publikační činnosti autora nelze tedy nic vytknout.

Vzhledem k množství kvalitních výsledků, uvedených v disertační práci Ing. Štěpánka, tuto práci jednoznačně doporučuji k obhajobě a žádám v průběhu obhajoby o zodpovězení otázek uvedených v tomto posudku.

V Ostravě / Vídni dne 6.1.2020
Ing. Vladislav Damec, Ph.D.

Damec
Vladislav

Digital signiert von Damec Vladislav
DN: cn=Damec Vladislav, o=Siemens,
email=vladislav.damec@siemens.com
Datum: 2020.01.14 10:49:23 +01'00'

Siemens Mobility GmbH
Components, Traction Drives, R&D Austria, Power Electronics and Mechanical Design
Siemensstrasse 90
A-1210 Austria

VŠB-TU Ostrava
FEI, Katedra aplikované elektroniky
17. listopadu 15
CZ-70800 Ostrava



POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Jan Štěpánek

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektronika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Využití SiC polovodičových součástek ve výkonové elektronice

Školitel:

Supervisor

doc.Ing.Pavel Drábek, PhD

Oponent:

Opponent

prof.Ing.Petr Chlebiš, CSc.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

V oblasti výkonové elektroniky a měničové techniky v současnosti určují spínací součástky na bázi nových polovodičových materiálů zásadní směr dalšího vývoje zmíněné oblasti. Tento stav je způsoben především narůstajícími požadavky na zvyšování účinnosti a s tím souvisejícím snižováním rozměrů polovodičových měničů. Situace je částečně vynucena novými aplikacemi měničů zejména v oblasti dopravních prostředků, nebo nových trendů v oblasti elektroenergetiky, které narozdíl od jejího dřívějšího pojetí stále více využívají techniku polovodičových měničů.

Využití relativně nových polovodičových materiálů, ke kterým již v současnosti SiC a GaN nade vší pochybnost patří, přináší mnohé, a lze říci zásadní pozitivní vlastnosti spojené zejména s vysokou rychlostí spínání a větší odolností na tepelné zatěžování. Výrazně lepší parametry si však vynucují nové přístupy jak při elektrickém, tak při konstrukčním návrhu měničů z těchto prvků. Vzhledem k tomu, že disertační práce je zaměřena právě do těchto dvou technicky velmi aktuálních problémových oblastí, je její význam pro obor návrhu nových generací polovodičových měničů nezpochybnitelný.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Disertační práce je zaměřena do oblasti návrhu polovodičových měničů s využitím nových typů polovodičových spínacích součástek. Proto již samotný tento záměr v zadaném tématu disertační práce předurčuje její metodologickou strukturu. Zcela správně se v úvodních pasážích zabývá analýzou dosud známých poznatků jak v oblasti samotných vlastností moderních polovodičových součástek, tak jejich aplikací do měničů. Vzhledem k tomu, že práce má silně realizační charakter, jsou i následující kroky podřízeny tvorbě fyzikálních vzorků měničů. V práci jsou proto v přiměřeném rozsahu využívány informace a postupy poskytovány výrobcí součástek, obecně platné teoretické a výpočtářské poznatky a postupy, poznatky a postupy spojené s numerickým modelováním nezbytným pro konstrukční návrh a v konečném důsledku i postupy při samotném konstruování měničů. Pozitivní je, že realizované konstrukce byly rovněž v nezbytném rozsahu proměřeny a vyhodnoceny jejich vlastnosti. Použité metody a postup řešení je tedy zcela v souladu jak s obecně zaužívanými pravidly, ale odpovídají také užívaným postupům pro výzkum a vývoj. Rovněž cíle práce stanovené na str. 12 disertační práce byly v plném rozsahu splněny.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Jak již bylo zmíněno, jsou konkrétními výsledky disertační práce tři realizované vzorky měničů s využitím spínacích součástek na bázi SiC a GaN. U každého z těchto měničů jsou požadovány jiné vlastnosti. U prvního typu měniče, střídače pro automobilní aplikace s vodním chlazením, je návrh prováděn s cílem dosažení vysoké hustoty výkonu 100 kW/l. U druhé aplikace jde o modelové řešení bloku modulárního měniče pro kompenzaci zemních poruch s výkonem s topologií jednofázového střídačového můstku se součtovým výkonem až do 1 MVA. Třetí řešení se zabývá uplatněním moderních spínacích prvků v pomocných měničích vozidel zejména lehké trakce (trolejbusy, tramvaje). Z hlediska přínosu disertační práce oceňuji zejména přístup k měniči pro automobilní aplikace s vodním chlazením, který by byl při použití klasických Si součástek pro zadané parametry neřešitelný. V tomto smyslu považuji návrh a realizaci prototypu měniče s vysokou hustotou výkonu za konkrétní a původní přínos doktoranda oboru. Systematické zpracování této části disertační práce může být použito jako návod pro následné řešitele podobných konstrukcí měničů. Podle mého názoru tvoří právě návrh tohoto měniče odborný vrchol disertační práce, který, pokud by byl důkladněji rozpracován co do detailnějšího a průkazného ověření vlastností realizované konstrukce, mohl tvořit samostatné téma disertace.

Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Tak, jako vysoce hodnotím obsahovou stránku disertační práce, mám několik výhrad k jejímu formálnímu zpracování. Jak již bylo zmíněno, práce se zabývá třemi typy měničů, přičemž těžiště řešení problému je zpracováno v souvislosti s prvním typem měniče. Odborné postupy u druhé a třetí konstrukce jsou již jen jakousi myšlenkovou kopií postupů prvního řešení a dle mého názoru nepřinášejí zásadní nové poznatky. To do určité míry snižuje přehlednost a zajímavost disertační práce v závěrečných pasážích. Osobně bych uvítal hlubší rozpracování např. tematiky EMC a podrobnější proměření vlastností u prvního měniče. Řadu výtek mám rovněž k formálnímu zpracování. Srozumitelnost práce např. snižuje označení významové stejného parametru v různých kapitolách různě. Národním příkladem je např. uvádění teploty – v Tab.7, str. 11 je uváděna „Teplota max - T_{max} “ – lze se domnívat, že jde o maximální střední teplotu čipu polovodiče v součástce, na jiných místech, např. v souvislosti s dimenzováním (str. 20, kap. 4.2.2 nahoře) je využíváno označení T_{j-max} pro „maximální teplotu polovodičového čipu“. V jakém vztahu jsou tyto dvě veličiny? Podobných příkladů lze nalézt více, navíc tabulka „Seznam zkratk a symbolů“ v tomto smyslu není úplná a neposkytuje dostatečné zpřehlednění. Nepochopil jsem rovněž systém uspořádání dat v tabulkách – např. od Tab. 12 na str. 32 až po Tab. 15 na str. 34. Při důkladném studiu činí rovněž problém grafické zpracování řady grafů a obrázků, jejichž popisy jsou téměř nečitelné. Jako příklad lze uvést Obr.8 a Obr.9 na str. 25, a většinu obrázků průběhů z osciloskopu. V práci se rovněž vyskytuje řada pravopisných a gramatických chyb. Je např. zcela opomíjen rozdílný význam slov „měřicí / měřící“, „řídící / řídicí“ a stylisticky jim podobných. Jen velice nerad uvádím tyto „vady na kráse“ jinak velice zdařilé disertační práce, ve které doktorand odvedl obrovské množství práce.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Seznam publikační činnosti doktoranda uvedený na nečíslovaných téměř šesti stránkách v příloze obsahuje celkem 67 položek. Ze struktury autorských týmů je zřejmé, že student velice dobře uchopil principy týmové práce (pouze u pěti položek z tohoto seznamu vystupuje jako jediný autor). Je na škodu věci, že seznam publikačních výstupů není strukturován podle

vědeckého významu jednotlivých položek ve smyslu Článku 2, bod (3) Směrnice děkana č.2D
O uskutečňování doktorského studijního programu.

Je však naprosto zřejmé, že publikační činnost doktoranda svým rozsahem několikanásobně
překračuje obvyklý průměr, přičemž problematika tématu disertační práce je publikována v
dostatečném rozsahu.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

V rámci obhajoby si dovoluji požádat disertanta o vyjádření následujícím dotazům.

1. V kap. 4.2.1 je provedeno zjednodušení ve smyslu náhrady tepelných impedancí jednotlivých částí chladicí soustavy včetně polovodičového prvku pouze tepelnými odpory. (str.19) V další části je prováděno dimenzování pro široký rozsah spínacích kmitočtů 10 až 100 kHz. Je možné toto zjednodušení u SiC součástek pro nízké kmitočty okolo 10 kHz provést? U Si unipolárních součástek je obvyklé provádět pro kmitočty nižší než cca. 2,5-3 kHz kontrolu oteplení na max. teplotu, kdy se začíná projevovat vzhledem oteplovací časové konstantě čipu zvlnění teploty čipu a možnost krátkodobého, ale periodického překračování dovolené maximální teploty polovodičového čipu.
2. Pro výpočet tepelných parametrů na str. 23 byla využita destilovaná voda, což je pro praktické využití v automobilní technice zřejmě nepřijatelné. (Jsem si vědom využití měniče pro projekt NeoFELis). Jak by se změnila poměry při použití glykolové směsi běžné pro automobilní techniku, nebo jiného chladiva?
3. Základním požadavkem pro konstrukční návrh prvního měniče je požadavek výkonové hustoty. Jak vyplývá z údajů na str. 41, jsou zde vypočteny výkonové hustoty tři. Která hodnota je ta „správná“, resp. jak je parametr výkonové hustoty závazně definován?
4. Které výstupy publikační činnosti považujete za vědecky nejvýznamnější?

Vzhledem k vysoké odborné úrovni tematicky velmi cenné disertační práce, přínosu práce pro obor, prokázání vysoké úrovně zvládnutí výzkumných a vývojových metod a vynikající publikační činnosti disertační práci Ing. Jana Štěpánka s názvem „Využití SiC polovodičových součástek ve výkonové elektronice“ doporučuji k obhajobě a v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a ustanoveními Studijního a zkušebního řádu ZČU a po úspěšné obhajobě doporučuji udělit titul PhD.

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

| | | |
|------------|---|----------|
| ANO yes | x | ne no |
|------------|---|----------|

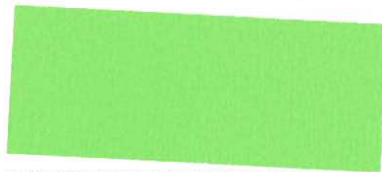
Datum

Date

29.1.2020

Podpis oponenta:

Signature of opponent



Oponentní posudek disertační práce

Autor posudku: Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

Název práce: *Využití SiC polovodičových součástek ve výkonové elektronice*

Autor práce: *Ing. Jan Štěpánek*

Disertační práce je věnována výzkumu a vývoji v oblasti měničové techniky s použitím moderních spínacích polovodičových součástek. Logickým cílem bylo dosažení velké účinnosti a také minimalizace rozměrů měničů. V práci jsou popisovány výsledky vývoje ve třech aplikačních oblastech – trojfázové trakční střídače s vysokou objemovou hustotou výkonu, střídače pro energetiku (kompenzace zemních poruchových proudů) a měniče s galvanickým oddělením pro pomocné pohony.

1) Význam disertační práce pro obor, konkrétní přínos autora

Téma práce je velice aktuální. Ve všech třech popisovaných oblastech byly realizovány prototypy, které dosahují vesměs špičkových parametrů. Význam takového výzkumu pro obor je tedy nesporný.

Problémem ovšem je, že z práce nelze poznat, jakou měrou se autor na tomto vývoji podílel. Autor se totiž omezuje ve všech případech na zevrubný technický popis – nenajdeme zde podrobnější a detailní popis jevů, stěžejních faktů a souvislostí, v nichž tkví umění návrhu takovýchto měničů. Když se myšlenka práce stočí ne nějaký zajímavější relevantní technický detail, je to odbyto pouze náznakem. Nenajdeme zde např. nic konkrétního a detailního o řešení problematiky ringingu, omezování strmosti du/dt , odolnosti řídicích obvodů proti rušení, které produkuje silový obvod. Nejsou zde žádné detailní oscilogramy dokladující překmity na tranzistorech a diodách, rozbor problematiky vlivu rozptylu impulzního transformátoru u měniče s galvanickým oddělením atd. Místo toho se práce soustavně podrobně věnuje návrhům a testování chlazení, měření účinnosti a podobně. Chápu ovšem, že know-how vývoje s komerčním potenciálem, jako je tento, nelze vyzrazovat. **Chtěl bych proto požádat autora, aby u obhajoby vysvětlil, do jaké míry se skutečně podílel na vývoji zmiňovaných měničů a aby tam také prezentoval alespoň nějaké z výše citovaných chybějících detailů a doložil tím, že se problematikou zabývá na té nejvyšší úrovni.**

2) Postup řešení, metody, splnění cílů, výsledky práce

Vzhledem k dosažení výborných parametrů několika výsledných realizovaných měničů je zřejmé, že postup řešení a použité metody byly efektivní. **Cíle práce byly jasně formulovány a výsledky jasně dokumentují, že byly také splněny.**

Některé části práce bych si dovolil označit za poněkud samoúčelné – např. 3D obrázky Obr. 8 a 9 budí dojem, že byly vyhotoveny spíše pro zvýšení dojmu vědeckosti, ale jejich přínos, myslím, není moc velký. Podobně Obr. 29 až 32. Naopak oceňuji zmínku o postupu při odstraňování problémů s rušením (str. 29) – i když opět bohužel jen velmi stručnou.

V textu práce jsem našel některé technické nesrovnalosti, někdy bohužel i závažnějšího charakteru.

- Obr. 4 na str. 14 je zřejmě chybný – při tvrdém vypínání tranzistoru nemůže kolektorový proud začít klesat dříve, než napětí kolektor-emitor dosáhne napětí meziobvodu.
- Rovnice (19) a (20) jsou problematické.

- Na str. 59 autor píše, že vodivostní ztráty na zpětné diodě jsou v případě křemíkové diody pouze 6,9 W a při použití SiC diody 209 W – při stejném průběhu proudu diodou. To by ale musela SiC dioda mít úbytek v propustném směru cca 30krát větší než křemíková.
- Na str. 69 se tvrdí, že odběr střídače z externího laboratorního zdroje (rozumím tomu tedy tak, že na ss straně - v meziobvodu) odpovídá odběru třífázového můstkového diodového usměrňovače pracujícího do kapacitní zátěže. To je nepochopitelné tvrzení. Nemyslel tím autor spíše to, že odběr ze zdroje odpovídá odběru z usměrňovače? Tedy že měnič odebírá proud téhož tvaru, jaký by odebíral, kdyby místo laboratorního zdroje použil síťový usměrňovač se sběrným kondenzátorem? To je ovšem samozřejmé.
- Na str. 83 je uvedeno, že „vlivem kapacity diod v usměrňovači a magnetizační indukčnosti v transformátoru dochází ke vzniku spínacích přepětí na výstupní indukčnosti a diodách usměrňovačů“. To je nesprávný popis toho jevu.
- V Tab. 45 na str. 101 jsou uvedeny parametry planárního transformátoru Tronic. Je uvedena hodnota primární rozptylové indukčnosti 336 mikroH a zároveň spínací kmitočet 100 kHz. Má být přitom dosaženo výkonu 20 kW při vstupním napětí 360 V. Takto velký rozptyl trafa spolu s velkým kmitočtem představuje ale takovou napěťovou měkkost měniče, že těchto výkonů by nemohlo být dosaženo ani řádově.

3) Formální hodnocení

Práce je psána dostatečně srozumitelně na to, aby byl pochopitelný její obsah. Jazyk práce je ale místy trochu těžkopádný. Popis jednotlivých měničů je občas nepřehledný, protože se současně popisuje více variant, a to bez odkazu na vysvětlující schéma.

Na mnoha místech chybí čárky v souvětích, které mají oddělovat věty. To zhoršuje srozumitelnost. V textu práce se vyskytuje poměrně dost jazykových chyb a překlepů. Zbytečné jsou některé gramatické chyby typu „výsledky vyšli“ místo „vyšly“ (str. 22), „vynutí“ místo „vinutí“ (str. 43) nebo „snížení proudu protékajícím prvkem“ místo „proudu protékajícího prvkem“ (str. 104).

Za drobnou estetickou vadu lze považovat používání symbolu hvězdičky pro násobení (v rovnicích).

4) Vyjádření k publikacím doktoranda

Doktorand je autorem nebo spoluautorem mnoha relevantních publikací a je tedy zřejmé, že jádro práce bylo dostatečně publikováno.


5) Závěr posudku

Přes uváděné nedostatky oceňuji praktické zaměření práce a úspěšnou realizaci unikátních prototypů. **Disertační práci doporučuji k obhajobě. Chtěl bych požádat autora, aby se vyjádřil ke svému podílu na celkovém vývoji popisovaným měničů (viz bod 1 tohoto posudku) a také aby zodpověděl následující otázky.**

Otázky k obhajobě:

- 1) Vysvětlíte prosím, proč se v rovnici (20) na straně 17 vyskytuje činitel $\frac{1}{4}$.
- 2) Vysvětlíte prosím princip kompenzace zemních proudů, který má být dokumentován na Obr. 34.
- 3) Popište prosím podrobněji myšlenku na str. 51, že třetina hradlového rezistoru byla vřazena do emitoru, aby se potlačily kmity mezi paralelními tranzistory. Doložte prosím konkrétním schématem.
- 4) Proč průběh na Obr. 53 nemá podobně exponenciální charakter jako na Obr. 52?
- 5) Na Obr. 93 se v tepelné simulaci vyskytuje nereálně vysoká ustálená teplota chladiče téměř 600 °C. Mohl byste objasnit, jak je to myšleno?

V Brně, dne 3.1.2020

A solid red rectangular box used to redact the signature of the author.

Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.