

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Horáčková** Jméno: **Lucie** Osobní číslo: **374266**  
 Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**  
 Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**  
 Studijní obor: **Přístroje a metody pro biomedicínu**  
 Název práce: **Řízení a optimalizace délky pulsu pikosekundového CPA diskového laseru s výkonem >100 W**

## II. HODNOCENÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Kritéria hodnocení práce		Počet bodů
1.	<p>Splnění cíle a vhodnost struktury obsahu diplomové práce z hlediska zadaného tématu (splnění zadání). (0 – 30)*</p> <p>Komentář: každé zadání, resp. každá část či věta ze zadání musí mít jasný odraz ve zpracované práci!, pouze zcela splněné zadání může být ohodnoceno max. 20 body. Podle rozsahu části v zadání, která není zcela vhodně či úplně zpracována, se snižuje ekvivalentně hodnota 20 bodů. Uvedení cíle v úvodu práce je povinné, a pokud není uvedeno, student přichází o 10 bodů. 30 celkových bodů může obdržet naprosto bezchybná a velmi precizně zpracovaná práce (to ale není standardní situace, spíše mimořádná).</p>	10
2.	<p>Teoretická úroveň a využití dostupné literatury v diplomové práci. (0 – 30)*</p> <p>Komentář: zde je velmi důležitá úloha oponenta a to následující: pokud je většina textu převzata, pak student získává max. 5 bodů, pokud je vše psáno slovy studenta, pak může získat max. 15 bodů, k tomu je možné připočítat max. 15 bodů za vhodně a uceleně zpracování dostupných pramenů, tj. je uveden současný stav v samostatné kapitole (5 bodů), významné relevantní zdroje jsou komentovány včetně popisu výběru (strategie výběru) těchto zdrojů (5 bodů) a použité zdroje jsou všechny a vhodně citovány, je posuzováno také složení citovaných zdrojů, tj. aktuálnost a vztah k tématu, obecné publikace jako matematické vzorce apod. se nepočítají do plnohodnotných citací, lze vypočítat poměr takovýchto citací, tj. užitečné/neužitečné a velikost tohoto poměru je třeba promítnout do bodování (5 bodů).</p>	15
3.	<p>Formální náležitosti a úprava obsahu diplomové práce (úroveň psaní, označení struktury textu, grafy, tabulky, citace v textu, seznam použité literatury apod.). (0 – 10)*</p> <p>Komentář: v současné době mají studenti k dispozici jak literaturu s popisem jak zpracovat odborný text na PC, mají znalosti a dovednosti a není tudíž třeba brát ohled na nedostatky z hlediska zpracování na PC, takže se předpokládá, že práce má obsah tvořen desetinným tříděním, zde lze hodnotit i orientaci v práci včetně odkazů mezi jednotlivými typy položek v textu včetně číslování rovnic, obrázků, tabulek a grafů (1 bod), práce obsahuje důležité položky z hlediska typu práce (2 body), kvalita obrázků (1 bod), množství překlepů (1 bod za nepatrné množství), v práci by se měla objevovat pouze standardní odborná terminologie a to zejména v českém jazyce (je třeba hodnotit schopnost vyjadřovat se technickým jazykem – 2 body), grafy jsou tvořeny podle zásad (viz tolerance a vliv statistického zpracování – 1 bod), u grafů a tabulek jsou patřičné legendy a vše je čitelné (1 bod), jsou dodržena citační pravidla podle ISO690 a ISO690-2 (1 bod).</p>	8
4.	<p>Rozsah realizačních prací (SW, HW), aplikovaných vědomostí a znalostí, úroveň metodologického zpracování a závěrů práce. (0 – 30)*</p> <p>Komentář: pokud je práce kombinací teoretických odvození (4 body – lze nahradit publikací v AJ), modelování a simulace (4 body), SW implementace (4 body) a též technické realizace (4 body – lze nahradit patentem či užitným vzorem) a 4 body ještě za komplexní funkčnost a to jak SW, tak i HW výstupu, pak může získat až 20 bodů. Pokud práce obsahuje správnou strukturu včetně diskuse výsledků (5 bodů – min. 2 strany A4) a závěrů (5 bodů – min. 1 strana A4), pak může být připočteno dalších 10 bodů. Celkem tedy 30 bodů za velmi komplexní a bezchybnou práci včetně uplatnění výsledků práce v rámci projektů, publikací, patentů či užitných vzorů.</p>	10
5.	<b>Celkový počet bodů</b>	43

\* Slovní hodnocení uveďte v komentáři.

### III. NÁVRH OTÁZEK K OBHAJOBĚ

1. Proč by nemělo docházet v zesilovači k saturaci? Jak závisí účinnost extrakce energie ze zesilovače na fluenci? 2. Co je příčinou prodloužení pulzu v prodlužovači? Jaký je rozdíl v geometrii prodlužovače a kompresoru? 3. Proč je vhodné omezit nehomogenní rozšíření spektra v zesilovači pomocí modulace spektrální amplitudy? Není spíše vhodné omezovat zúžení spektra? 4. Jak se mřížkami realizuje přechod do Fourierovy roviny? 5. Jak se liší tvarování pikosekundových impulsů od tvarování femtosekundových?

2. 6. Jak se získá spektrální intenzita pulzu pomocí autokorelátoru? 7. Jak se modifikují kraje neperiodického měřeného signálu před provedením Fourierovy transformace, aby se zvýšila její přesnost? 8. Co je to vzorkovací teorém a jak jeho splnění prakticky ověříme? 9. Co je to tepelná čočka a na čem závisí? 10. Vadí výpadek jediného pulsu z oscilátoru, kolik je času na zavření závěrky v Perle C pro její ochranu?

3. 11. Jak souvisí rozlišení v GHz a nm? 12. Proč je důležité neaplikovat celou korekci fáze v každé iteraci, ale jen její část? 13. Jak funguje procedura ITERATE popsaná v diplomové práci? 14. Jaký je rozdíl mezi open-loop a closed-loop smyčkou pro optimalizaci měřené veličiny?

### IV. CELKOVÉ HODNOCENÍ ÚROVNĚ VYPRACOVÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hodnocení**:	A (výborně)	B (velmi dobře)	C (dobře)	D (uspokojivě)	E (dostatečně)	F (nedostatečně)
Počet bodů:	100 - 90	89 - 80	79 - 70	69 - 60	59 - 50	< 50
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X

\*\* v případě hodnocení F (nedostatečně) uveďte podrobný komentář

Diplomovou práci hodnotím výše uvedeným klasifikačním stupněm a doporučuji/nedoporučuji k obhajobě.

### V. KOMENTÁŘ

Posudek oponenta diplomové práce

Autor práce: Bc. Lucie Horáčková

Název práce: Řízení a optimalizace délky pulzu pikosekundového CPA diskového laseru s výkonem >100 W

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou bezpečného řízení výkonného pikosekundového laserového systému a optimalizací délky pulzu v laserovém systému generovaného. Práce byla vypracována na pracovišti HiLASE - Fyzikálního ústavu, AVČR.

Práce obsahuje 82 stran textu včetně obrázků a je rozdělena do jedenácti kapitol. V kapitole 2 je popsán princip regenerativního zesilovače, tenkodiskový hlavy a metody pro zesílení velmi krátkých pulzů pomocí jejich roztažení v čase (CPA). V kapitole 3 se pak studentka zabývá 100 kHz laserovým systémem Perla C na pracovišti HiLASE. V kapitole 4 pak popisuje různé metody tvarování laserových pulzů. V kapitole 5 pak metody řízení laserových systémů a systémů pro tvarování pulzů. V kapitole 6 popisuje techniky měření velmi krátkých pulzů. V kapitole 7 se věnuje měření pulzů generovaných oscilátorem Perly C. V kapitole 8 se věnuje popisu návrhu řídicích a tvarovacích algoritmů. V kapitole 9 pak samotné implementaci algoritmu a jeho testování.

Z formálního hlediska splnila všechny body zadání práce. Pouze mne zarazilo, že zdrojový kód programu nebyl k práci přiložen a zůstává tak černou skříňkou jen zběžně popsanou v práci.

Teoretická část práce je napsána dobře, její členění i úroveň detailů čtenáře zavede do problematiky tvarování pulzů. Drobnější nepřesnosti v popisu laserového systému a metod lze přehlédnout vzhledem k zaměření práce spíše do programátorské oblasti.

Ve vlastní práci si studentka naběhla uváděním velkého množství informací, kterým úplně nerozumí a které mnohdy jsou špatně. K velké části z nich se dostala kvůli obsazenosti laserového systému Perla C, takže musela pracovat pouze s oscilátorem, který měl širší spektrum. Měření pulzu metodou FROG přineslo rozporuplné hodnoty, které nebyly ověřeny jinou metodou.

Studentka zprovoznila komunikaci s tvarovačem pulsu Waveshaper a napsala algoritmus pro překlad dat z FROGu do Waveshaperu. Nicméně algoritmus pro minimalizaci délky pulsu působí velmi povrchně, v podstatě aplikuje

změřenou fází s opačným znaménkem do tvarovače. Další iterace nefungují, protože aplikuje celou korekci, a ani nemá parametr, který by minimalizovala. Že by měla korekci nějak tlumit, vůbec neuvažuje. Ve světě běžně používané přístupy pro tvarování pulsů s optimalizačním algoritmem (evoluční minimalizace, simplex-downhill, Gerchberg-Saxton) ani nezmiňuje, natož aby některý použila. Toto je v práci zaměřené na vývoj minimalizačního algoritmu dle mého názoru nedostatečné.

Při návrhu zbytku řídicího systému pouze konstatovala, že je potřeba sledovat některé parametry, které budou navázány na systém vypnutí laseru, ale nijak nediskutovala, jak by měla implementace vypadat a jaké na ni budou kladeny požadavky.

Práci doporučuji k obhajobě, pokud studentka uspokojivě zodpoví otázky v závěru posudku, a následně ji doporučuji hodnotit stupněm E (dostatečně). Podrobně prosím zodpovědět otázky 7, 8, 12-14.

Podrobný seznam připomínek:

Kapitola 2.1 by se měla jmenovat tenkodisková hlava. V kapitola 2.2 není úplně srozumitelná, ale čtenář nejspíše pochopí, o co ve které fázi laserové činnosti jde.

Vztah 4.3 není v textu popsán správně,  $E(\square)$  je asi  $S(\square)$  a obojí znamená amplitudu spektra? Vztah 4.6 platí pro modulátor s polarizátorem, dvě matice krystalů jsou potřeba proto, aby bylo možno modulovat fázi a amplitudu nezávisle.

V kapitole 5.2 autorka zmiňuje, že programy pro tvarování pulsů nejsou v literatuře popsány, což je pravda jen částečně, v článcích nejsou, v dizertačních pracích jsou (např. Martin Hacker: Neue Möglichkeiten und Anwendungen der Phasenmodulation ultrakurzer Laserimpulse, Gregor Stobrawa: Aufbau und Anwendungen eines hochauflösenden Impulsformers zur Kontrolle ultrakurzer Laserimpulse). Autorka také zmiňuje, že neměla dost literatury pojednávající o tvarování pikosekundových pulsů, nicméně tvarování femtosekundových impulsů je z programátorského přístupu totožné.

Rozdělení autokorelací v kapitole 6.1.1 na interferometrické (kolineární) a intenzitní (nekolineární) je nešťastné, protože míchá pojmy z různých oblastí (interferometrie vs. intenzita elektrického pole), a nesprávná, protože kolineární autokorelace může být i intenzitní. Pomocí autokorelátoru lze získat informace o spektrální intenzitě.

Ačkoli se práce zabývá tvarováním pikosekundových pulsů (kapitola 7), spektrum tvarovaných pulsů odpovídá spíše femtosekundovým pulsům. Rozlišení deklarované pro měření pulsů se mi zdá přeceněné. Rozlišení definované počtem kroků je také poněkud nešťastné. Mnohem horší je ale skutečnost, že měřený pulz závisí svojí délkou na počtu vzorků v měřeném signále opravdu významně (2 ps vs. 9 ps), nehledě na to, že grafy 7.4 a 7.5 s počtem 200 vzorků v měřeném signále vykazují všechny známky toho, že byly změřeny špatně. Správné měření se vyznačuje tím, že vypočtené hodnoty na počtu vzorků nezávisí či závisí minimálně.

(Kapitola 8). Studentka popisuje nebezpečí pro zesilovací řetězec při výpadku pulsu z oscilátoru. Energii pulsů chce monitorovat fotodiodou a v případě výpadku laserový systém odstavit, což je principiálně správně. Očekával bych ale podrobnější návrh nebo alespoň diskuzi o potřebné rychlosti jednotlivých komponent a rozhodovacích systémů. Předpokládám, že na obrázku 8.1 je schéma front-endu nikoli celé Perly C, jinak by byla pozice clony špatná. V návrhu programu pro minimalizaci délky pulsu bych očekával nějakou diskuzi o kontrole měřených dat, případně kontrolu požadavku uživatele na tvar pulsu, aby nedošlo k nahrání profilu, který by mohl zesilovač poškodit.

(Kapitola 9) Studentka navrhuje k optimalizaci délky pulsu změřit spektrální fázi pulsu a tvarovač naprogramovat její zápornou hodnotou tak, aby se ve výsledku fáze zkompenzovaly. Vše řídí uživatel a program nevypadá, že sleduje nějakou vnější veličinu, kterou by minimalizoval. Studentka také předpokládá, že jde o lineární systém, aniž by to zmínila či ověřila. Pokud by program rozšířila o automatickou korekci (automatizace nahrávání nových dat z FROGu), tak minimalizační algoritmus nijak nebude chráněn proti rozkmitání. V 9.2.2 ukazuje transmisi filtru bez modulace s modulací až 50%. Aplikace algoritmu na pulz se spektrem upraveným Gaussovským filtrem přinesla snížení délky pulsu na polovinu, nicméně fáze při tom změnila znaménko, což ukazuje na možný problém rozkmitání způsobený aplikací celé vypočtené fáze. Není také jasné, jak daleko od transformační meze pulz je, v závěru je sice uvedena transformační mez pro Gaussovské spektrum podobné šířky, ale provedení Fourierovy transformace chybí. Puls bez Gaussovského filtru opět vypadá nereálně.

V závěru autorka odkazuje na článek, ve kterém jsou přesnosti FROGu odhadnuty, a zmiňuje velkou závislost na uživatelských parametrech. V článku se ale zmiňuje pouze závislost na kalibraci časové a spektrální osy, které lze ověřit s dostatečnou přesností před měřením. Článek závislost na šířce intervalu a počtu vzorků v měřené stopě nicméně neukazuje.

V Praze 11.6.2019 Ing. Martin Divoký, Ph.D.

Jméno a příjmení: Ing. Martin Divoký, Ph.D.  
Organizace: HiLASE centrum FzÚ AV ČR  
Kontaktní adresa: Za Radnicí 828, 252 41 Dolní Břežany

Podpis: .....

Datum: .....