

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	Validace rekonstrukcí magnetické rovnováhy v tokamaku pomocí simulací okrajového plazmatu transportním kódem SOLPS-ITER
Jméno autora:	Bc. Daniel Švorc
Typ práce:	diplomová práce
Fakulta:	Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská (FJFI)
Katedra:	Katedra fyziky
Oponent práce:	Ing. Tomáš Markovič, Ph.D.
Pracoviště oponenta práce:	Ústav Fyziky Plazmatu AV ČR, v.v.i.

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání	náročnější
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
<p>Zadání předpokládá že student provede simulace plazmatu dvěma odlišnými metodami – v jednotekutinovém stacionárním MHD přiblížení k popisu silové rovnováhy celého objemu plazmatu v magnetickém udržení, a v dvoutekutinovém kinetickém přiblížení k popisu transportních jevů v okrajovém plazmatu za účelem výpočtu profilů kinetických veličin v této oblasti. Jedním ze vstupů těchto transportních simulací je tvar a poloha okraje plazmatu – separatrix – pocházející ze simulací silové rovnováhy dříve zmíněného jednotekutinového MHD přiblížení. Poloha separatrix je ale na tokamaku COMPASS typicky zatížená systematickou chybou a v zadání se tudíž očekává že srovnáním měřených profilů kinetických veličin s jejich transportními simulacemi bude možno určit optimální variantu rekonstrukce rovnováhy plazmatu. Zadání předpokládá že student provede sekvenci obou typů simulací pro různé vstupní parametry a pak srovná finální simulační výstupy s experimentálními pozorováními a rozhodne o kvalitě rekonstrukce separatrix. V závislosti na tom v jakém rozsahu se provedou zmíněné simulace a srovnání s databází experimentů má zadání potenciál být mírně až významně náročné.</p>	

Splnění zadání	splněno s výhradami
<i>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.</i>	
<p>Diplomová práce je sepsána ve výrazně krátkém rozsahu stran z nichž 19 stran je věnováno úvodu a řešerši, a 12 stran reprezentuje výsledky a jejich diskuzi. Tato strohost se pak, očekávaně, projevila na míře splnění úkolů zadání:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Úkol 1: V řešerši chybí vysvětlení volt-ampérové charakteristiky Langmuirovy sondy a zapojení obvodů pro měření plovoucího napětí a pro biasing. V obecném úvodu pak ještě schází vysvětlení stěnové vrstvy – téma důležité jak pro sondovou diagnostiku, tak pro SOL simulace. A to přesto že v práci se opakovaně používá terminologie předpokládající znalost těchto témat. Rešerše o rekonstrukci magnetické rovnováhy a iterační metodě programu EFIT++ jsou také příliš strohé a neúplné. Na druhou stranu, popis transportu v okrajovém plazmatu a v SOL, a kódu SOLPS je uspokojivý. - Úkol 2: V práci je prezentováno 5 variant rekonstrukce magnetické rovnováhy. Standardní varianta je běžnou součástí experimentální databáze a není jasné zda se v práci použily tyto výsledky, nebo zda byla přepočítaná. U 2-bodové varianty (2 PM) se v práci přímo zmiňuje že ji spočetl někdo jiný. U zbývajících 3 variant které jsou unikátní ale nedostatečný popis postupu rekonstrukce magnetické rovnováhy v práci neumožňuje ohodnotit v jakém rozsahu byly tyto simulace provedeny. Lišili se třeba parametry EFITu u těchto variant? V jaké formě byly vloženy nebo upraveny vstupní data – signály z IPR cívek, profil tlaku a pod. Skončili hodnoty χ^2 pro různé varianty rekonstrukce na podobné hodnotě? Potřebovaly některé varianty víc iterací ke konvergenci? A pokud rozdíl zpočátku byl, došlo pak k úpravě vstupních dat nebo parametru rekonstrukce, anebo se použil 	

první dosažený výsledek? Ostatně, jaké parametry pro EFIT se použili – stejné jako pro tzv. standardní běh? Lišili se výsledky rozdílných variant rekonstrukce i v jiných veličinách než jenom v geometrii separatrix – třeba v energii plazmatu nebo veličině beta? Práce se totiž zmiňuje jenom v jednom místě že rozdíl variant byl především v separatrix, ale bez indikace příkladu veličin které by si byli napříč podobné. Data z měření Thomsonova rozptylu třeba výrazně fluktuují – jak konkrétně byl obdržen profil tlaku jako vstup pro variantu „ $p=2p_e$ “ a jak se konkrétně tento profil lišil od profilů tlaků ostatních variant rekonstrukce?

- Úkoly 3 a 4 jsou formálně splněny.

Zvolený postup řešení

vhodný s výhradami

Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.

Transportní simulace v SOLPS-ITER pro různé varianty rekonstrukce rovnováhy plazmatu byly provedeny úspěšně, co je přes mé ostatní výhrady k postupu významné plus nakolik to považuji za nejsložitější technickou část zadání práce.

Ústřední tezí práce studenta je, že jako vstup do SOLPS simulací se vloží vybraná varianta rekonstrukce rovnováhy plazmatu, předdefinované transportní koeficienty a korekční posunutí separatrix čím se obdrží profily elektronové teploty a hustoty na okraji plazmatu a v SOL, a profily veličin měřených na divertoru. Tyto veličiny ze simulace se pak srovnají s jejich měřeními a pokud nenastala uspokojivá shoda tak se upraví parametry transportu v SOLPS a posunutí separatrix, a simulace se pak iterativně opakuje. Poté co na zvolené referenční variantě rovnováhy („ $p=2p_e$ “) byla dosažena uspokojivá shoda mezi simulacemi a experimentem, byli použité parametry transportu deklarovány jako finální a použili se následně v SOLPS simulacích ostatních variant rekonstrukce rovnováhy. Tam se již iterativně mění pouze posunutí separatrix. Na základě toho o kolik se pak separatrix musel posunout pro tyto různé varianty je rozhodnuto o jejich spolehlivosti. Tím se adresuje úkol 4 zadání, kde se také identifikuje varianta „ $p=2p_e$ “ jako nejspolehlivější.

Má hlavní výhrada vůči tomuto postupu je použití stejných iterativně-získaných parametrů transportu pro všechny varianty rekonstrukce rovnováhy. Krom toho že v sekci 1.5 se zmiňuje že koeficient transportu D se získává ze škálování nebo měřeními a tudíž ne iterativně (ledaže by se měřením myslel právě tento iterační postup – v práci to nebylo blíž vysvětleno), pokud jsou transportní veličiny jako volný parametr pouze pro jednu variantu magnetické rovnováhy a ostatní si musí vystačit jenom s posunem separatrix, nedá se pak přirozeně očekávat že tyto budou potřebovat větší posun aby dosáhli shody s měřením v absenci jiných volných optimalizačních parametrů? Není pak závěr že varianta „ $p=2p_e$ “ potřebuje nejmenší posun separatrix očekávaný? Není také triviální že profily sledovaných veličin v obrázku 3.7 a pozice kam je nutné posunout separatrix (jak je zmíněno v posledním odstavci sekce 3.4) jsou si natolik podobné, vzhledem k tomu že jejich transportní parametry jsou stejné? Nebylo by místo toho lepší přistupovat ke všem variantám stejně jako k „ $p=2p_e$ “ a provést plnou iterační sérii simulací kterých výsledkem by byly odlišné varianty profilů a které by se pravděpodobně také vešly do (místy značného) rozptylu měření? Je možné že pak by závěry byli také méně jednoznačné, ale fyzikálně relevantnější.

Tudíž, pokud byl třeba proces výběru a nastavení simulačních parametrů ve složitější než je naznačeno v práci, nebo větší přesnost „ $p=2p_e$ “ varianty rekonstrukce rovnováhy byla patrná i na jiných indikátorech, bylo by dobré kdyby to student blíže objasnil při obhajobě.

Další výhrada k postupu je výběr varianty rekonstrukce rovnováhy „corrected IPR“ jako důkazu že posun separatrix je nutný. Jak ukazuje obr. 3.2, tvar separatrix této varianty se výrazně odlišuje od ostatních variant – zvláště pak v horní oblasti plazmatu a na divertoru – co ostatně sám autor o sekci dřív hodnotí jako „clearly

incorrect“. Rozdíl mezi simulací a měřením je tudíž triviálně očekávaný a nutnost posunu separatrix by správně měla být demonstrována na simulacích relevantnější varianty – třeba „ $p=2pe$ “.

Odborná úroveň

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

průměrná

Popis použitého modelu scrape-off layer a Braginského rovnic je na uspokojivé odborné úrovni. Stejně tak popis většiny použitých diagnostik tokamaku COMPASS.

Nicméně, v textu práce je i řada nesrovnalostí a nedostatků.

- V sekci 1.1 se popisuje podmínka zapálení fúze slovně – bylo by lepší v tom případě rovnou uvést rovnici Lawsonova kritéria.
- Popis magnetické rovnováhy plazmatu v sekci 1.3 je zmatený a neúplný. Hlavní rovnice ze které plyne podmínka rovnováhy - $jxB = \text{grad}(p)$ - je zcela opomenuta, přesto že důsledky co z ní plynou jsou v sekci zmíněny (např. existence magnetických ostrovů, GS rovnice). Gradova-Šafranovova rovnice se musí řešit iterativně proto že je to nelineární parciálně-diferenciální rovnice, důvod iterace jak je uvedený v práci je zavádějící. Popis řešení GS rovnice metodou EFIT je také nepostačující – jak už bylo ostatně zmíněno.
- Střední graf v obrázku 3.1 je neúplný – v popisu výkonové bilance tokamaku chybí ještě křivka dW/dt – změny energie plazmatu. Veličina P_{SOL} která byla použita jako vstup pro SOLPS simulace navíc v měření značně osciluje. Dle jakých kritérií byla zvolena její hodnota jako 150 kW?
- V sekci 3.2 se zmiňují metody z literatury na korekci signálu IPR jako vstupu pro EFIT a také možnost obohatit tyto měření o další relevantní signály. To vede k očekávání že rekonstrukce rovnováhy s těmito vstupy bude přesnější. Ukázalo se však že opak byl pravdou a obě varianty rekonstrukce dávají tvar last closed flux surface který, jak je zmíněno v práci, neodpovídá experimentální realitě. Přes tento paradox ale v práci v práci chybí vysvětlení nebo diskuze proč vstupní data údajně lepší kvality dávají méně přesné výsledky rekonstrukce. Dále, v obrázku 3.3 se zmiňuje že i pro limitovanou konfiguraci byl „vytvořen X-bod“. Existence X-bodu prvního řádu je ale triviální a zaručena nulovým poloidálním polem – tudíž v elongovaném plazmatu se oba X-body (jak je ostatně vidět v samotném obr. 3.3) vytvoří v místech tohoto minima pole i pro plazma v limiter konfiguraci. Plazma pak přechází do horní nebo spodní divertorové konfigurace když se odpovídající X-bod přesune (třeba zvednutím proudu v divertorové cívce) k okraji plazmatu.
- Obrázky 3.4, 3.6 a 3.7 ukazují profil elektronové teploty a tlaku z měření Thomsonova rozptylu, ale bez vysvětlení proč je na každé hodnotě R víc měřených hodnot a co reprezentuje tmavá křivka (předpokládám aritmetický průměr bez chybového intervalu?).
- Pojmenování varianty „ $p=2pe$ “ mylně implikuje že její hlavní definující vlastnost je shoda tlaku elektronů a iontů. Tato varianta rekonstrukce rovnováhy se ale od ostatních liší především tím že profil tlaku plazmatu nebyl definován obecným polynomem s arbitrárně zvoleným stupněm, nýbrž experimentálním měřením. To by se mělo také projevit v pojmenování této varianty.
- Hlavní výsledková sekce 3.4 je značně strohá na detaily postupu kterým byly tyto výsledky dosaženy. Práce se zmiňuje že „shoda simulací s experimentem byla dosažena iterativním procesem změnou vstupních parametrů“. Jak ale probíhal tento proces? Kolik iterací bylo provedeno a s jak velkými inkrementálními změnami vstupních parametrů? Jak konkrétně došlo k rozhodnutí že výsledek dokonvergoval? Jako důležitý vstupní parametr se také zmiňuje tzv. „separatrix shift“ jakožto běžná metodika v oboru k dosažení shody mezi měřením a simulacemi. Toto silné tvrzení o které se opírají závěry samotné práce ale v textu není podloženo referencemi z literatury.
- Ne že bych nesouhlasil s obecným závěrem sekce 3.5, ale použitý argument o absenci viditelného záření z HFS top v obr. 3.9 není přesvědčivý. Je vidět že záření z LFS limiteru které je použito jako argument interakce plazmatu se stěnou v této oblasti je toroidálně lokalizované. V zorném poli kamery je přítom jenom malý zlomek celého rozsahu HFS top. Jak můžeme zaručit že záření z této oblasti není prostě jenom mimo zorní pole?

Formální a jazyková úroveň	průměrná
<i>Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.</i>	
Formálně je slovní zásoba a gramatická úroveň práce na dobré úrovni, přesto že byla psána v Angličtině. Bohužel, z důvodu chybějících vysvětlení užití terminologie je práce ztěžila pochopitelná pro lidi co nejsou úzce specializovaní v tomto oboru. V práci se také opakovaně vyskytují obecné tvrzení bez zdůvodnění nebo bližšího vysvětlení. Specificky:	
<ul style="list-style-type: none"> - V sekci 1.5 se opakovaně zmiňuje že výpočet radialního transportu plazmatu napříč silokřivkami se v experimentu neřídí dle „first principles“, ale co tyto principy jsou není vysvětleno. Také se v ní objevují nedefinované termíny jako „attached divertor“ a „potenciál plazmatu“. - V sekci 1.5.1 jsou nevysvětlené termíny „strike point“ a „vstupní rychlost stěnové vrstvy“. Zvláště strike point je pak navíc opakovaně zmiňován v práci bez toho že by byl později definován. - Věta „Odlišné metody magnetické rekonstrukce mohou dát odlišné výsledky.“ v sekci 1.8 není optimální volba slov. - V legendě obrázku 2.2 chybí vysvětlení některých symbolů. - V sekci 2.2 již zmíněná absence obvodu sondových měření a I-V charakteristiky vede k tomu že se objevují nedefinované termíny jako plovoucí potenciál a iontově-nasycený proud. - V sekci 3.1 ve výběru výboje se uvádí že jako kritérium byla použita obecná podmínka „reasonably stationary profile of plasma parameters“ bez dalšího upřesnění o jaké parametry se jedná a jak je přesně definováno „reasonably stationary“. - V sekci 3.3 je napsáno že „...za předpokladu že SOL je sheath-limited, co se očekává že na COMPASSu nastává po většinu času...“ bez vysvětlení nebo reference co přesně znamená že SOL je sheath limited a proč by to měla být dominantní varianta SOL na COMPASSu. V této sekci je obecně řada matoucích vět s opakováním slov nebo nejasným významem a prospěla by jí revize. 	

Výběr zdrojů, korektnost citací	podprůměrné
<i>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.</i>	
Vlastní práce studenta je jedinečná a vlastní výsledky jsou dostatečně odlišeny od prvků převzatých z literatury. Student je navíc velmi svědomitý v uznávání práce ostatních a přiznání spolupráce které se mu dostalo. Nenašel jsem nic co by naznačovalo porušení citační etiky.	
Nicméně, 27 referencí na celou diplomovou práci je relativně nízký počet. V textu je vícero míst kde chybí odkaz na literaturu protože student mylně předpokládá že se jedná o všeobecně známé informace. Mé konkrétní komentáře:	
<ul style="list-style-type: none"> - V prvním odstavci obecného úvodu je hned několik tvrzení které by nebylo problém ozdrojovat. Ostatně, celkový počet referencí v obecném úvodu od začátku až k silové rovnováze tokamaku je 2, z nichž jedna slouží pouze jako zdroj schématu tokamaku. Pro lepší pochopení principu tokamaku a rovnováhy magneticky udrženího plazmatu by bylo vhodné si o tématu přečíst z víc zdrojů. - Oceňuji ale že jako zdroj Gradovy-Šafranovy rovnice byl použit jeden z původních článků. - Nicméně, není správné že jako první reference pro EFIT se použil internetový odkaz na framework simulačních kódů OMFIT – který navíc metodu EFIT ani dostatečně nepopisuje. Druhá reference, [5], se sice odkazuje na detailní článek o této metodě, nicméně ani tato není původní publikací původního autora – t.j. L. Lao et al., Nucl. Fus. 25, 1611-1622, 1985 – kterou dokonce samotná reference [5] i uvádí v tomto kontextu a měla by být také uvedena. - O velocity shear layer v sekci 1.5 se píše že byla pozorována v „mnoha tokamakových experimentech a 	

simulacích“, přesto se ale toto tvrzení opírá jenom o reference na dvě práce z právě jednoho tokamaku – COMPASS.

- 2 reference ke kódu SOLPS, z nichž jedna referuje uživatelský manuál, jsou také nepostačující. Třeba samotná reference [14] zmiňuje separátní publikace ke kódům B2.5 a EIRENE, které by měli být tudíž v práci také zmíněny.

- V sekci 1.8, resp. 3.2 bohužel nebyla diskutována předešlá studie o přesnosti rekonstrukce magnetické rovnováhy na COMPASS metodou EFIT: J. Urban et al., Fus. Eng. And Des. 96-97, 998-1001, 2015. V této práci se argumentuje že pozice separatrix se spřesní zvednutím stupně polynomu pro iterace profilu p' z prvního na druhý, přičemž spřesněním se míní lepší shoda s rekonstrukcí jiným kódem která brala v potaz profil tlaku plazmatu z měření Thomsonova rozptylu – t.j. v analogii k variantě rekonstrukce „ $p=2pe$ “. Bývalo by tedy dobré závěry této studie vzít v potaz při výběru nastavení parametrů EFIT (pokud k tomu nedošlo), nebo v diplomové práci diskutovat.

- Obr. 2.4 je značně zastaralý a datuje se do doby před zprovozněním tokamaku COMPASS. Bezpochyby jsou k dispozici aktuálnější zdroje které lépe popisují experimentální realitu na tomto zařízení.

- Styl bibliografie není jednotný. Reference 3 má uvedené plné jména obou autorů, u ostatních se uvádí jenom první autor a navíc s iniciálami křestního jména. Měsíc publikace je u některých referencí ve zkratce, jinde značen číselně, a jinde chybí. Některé reference knih mají uvedené nakladatelství, jiné ne. V referenci 27 chybí informace o kterou konferenci a proceedings se jedná. Mnoho prvků bibliografie nemá správnou kapitalizaci.

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.

Všechny mé komentáře jsou obsaženy v předchozích bodech hodnocení.

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.

Přes všechny mé výhrady bych zdůraznil že ke splnění hlavní části zadání – t.j. SOLPS-ITER simulací tokamaku COMPASS a rozhodnutí o optimální variantě rekonstrukce magnetické rovnováhy – došlo. Práci nechybí žádná její formální část a výsledky práce studenta jsou jeho vlastní.

Nicméně, kvalita práce je značně poznamenána jejím krátkým rozsahem. Také s ohledem na přítomnost nejednoznačně formulovaných a místy i nepochopitelných vět v některých odstavcích, nedostatečný popis a diskuzi metody rekonstrukce magnetické rovnováhy, nejednotnost bibliografie a neúplné vysvětlení použité terminologie se domnívám že práce byla psána ve spěchu. Kromě absence bližšího vysvětlení procesu jak byly výsledky dosaženy – simulace jednotlivých variant magnetické rovnováhy a iterace transportních parametrů SOLPS-ITER, mám také výhrady k části metodologie – alespoň ve formě jak je popsána v práci. Mé otázky k obhajobě jsou tudíž adresované k těmto tématům:

1. Popište bliž metodologii simulací magnetické rovnováhy: Které stupně polynomů profilu p' a ff' byly použity? Lišili se jednotlivé studované varianty v konvergenci EFITu? Jak se konkrétně liší vstupní data pro IPR a pro korigované IPR? Můžete diskutovat proč varianta rekonstrukce s korigovanými IPR daty vede k nepřesné rekonstrukci tvaru separatrix přesto že by se očekával opak? V jaké formě byl použit profil tlaku z Thomsona jako vstup do rekonstrukce? Můžete ukázat srovnání některých globálních veličin plazmatu (jako třeba energie

plazmatu) napříč variantami a diskutovat nakolik je pravda že varianty se liší především v geometrii separatrix?

2. Popište váš proces iterace transportních parametrů SOLPS a posunů separatrix víc do detailu: Kolik iterací celkově proběhlo než se našli vhodné SOLPS parametry pro variantu magnetické rovnováhy „ $p=2p_e$ “? A kolik iterací posunu separatrix bylo nutno provést ke konvergenci ostatních variant? Jak velké kroky byly v iteracích použity? Co konkrétně bylo použito jako kritérium konvergence?

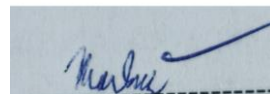
3. Veličina P_{SOL} byla na hodnotě 150 kW použita jako okrajová podmínka SOLPS simulace, ale v grafu 3.1 výrazně osciluje. Soudíte že tyto oscilace odpovídají realitě? Co myslíte že je jejich příčinou? Jak konkrétně byla zvolena právě hodnota $P_{SOL} = 150$ kW? Jak moc soudíte že byli vaše SOLPS simulace citlivé na nejistoty v této veličině?

4. Dotaz k metodologii postupu kdy se použili stejné vstupní parametry SOLPS simulace pro všechny testované varianty magnetické rovnováhy, čím se dosáhla stejná optimální pozice kam se musí posunout separatrix pro shodu s experimentem. Není triviální že profily sledovaných veličin simulace pro tyto varianty budou za stejných parametrů transportu výrazně podobné a s tím tedy i optimální pozice separatrix? Nebo byl naopak očekáván dominantní efekt rozdílů v simulační mřížce magnetické konfigurace na výsledky SOLPS simulace, resp. jiný efekt? Za jakých okolností by jste čekali že se tvar profilů a optimální pozice separatrix v obr. 3.7 budou lišit?

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **D - uspokojivě**.

Datum: 27.5.2024

Podpis:



Ing. Tomáš Markovič, Ph.D.
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.
U Slovanky 2525/1a
182 00 Praha 8