

Posudek školitele disertační práce Mgr. Filipa Jankyho

Student se prvních několik let učil programovat digitální procesory dsPIC a real-time framework MARTE od našich Portugalských kolegů (IST Lisabon). V mezičase se teprve vyrábělo postupně několik verzí rychlého proudového zdroje, který napájí poloidální cívky COMPASSu a je řízen tímto dsPIC procesorem přes systém MARTE, naprogramovaný studentem. Technický popis těchto systémů je v první kapitole práce. Obecná problematika proporcionálně-integračních-derivačních (PID) kontrolních systémů je na konci této kapitoly. Tato práce je jedinečným a uceleným popisem systému kontroly tokamaku COMPASS, s úzkou spoluprací s Mgr. Josefem Havlíčkem, PhD a velké části týmu COMPASSu.

Na začátku výboje kdy dochází k tzv. *průrazu*, tj. k prudké ionizaci neutrálního plynu, nelze proud kontrolovat - je dán RLC parametry obvodu. Po nárůstu na maximální hodnotu je pro experimenty většinou požadován proud konstantní. Přestože je ovlivňován různými mikro-nestabilitami i globálními parametry (hlavně čistotou plazmatu ovlivněnou nežádoucím dotykem stěny), je proud plazmatem nejnáze kontrolovatelnou veličinou, jelikož se mění relativně pomalu díky obrovské vlastní indukčnosti plazmatu. Algoritmus kontroly elektrického napětí v cívkách centrálního solenoidu vychází z Ohmova zákona a známých parametrů obvodu.

3. kapitola se zabývá kontrolou polohy plazmatu $[R_0, Z_0]$. Nejprve je nutné přesně vypočítat horizontální i vertikální polohu plazmatu, což se dělá pomocí interních částečných Rogowského cívek a externích magnetických smyček umístěných nad-pod a vně-uvnitř komory. Biot-Savartův zákon pak student využil k velmi přesné kalibraci této polohy, vedoucí k detailní matici (Figure 3.10) $R_0=f(B_{hor}, B_{ver})$ a $Z_0=g(B_{hor}, B_{ver})$.

Kontrola horizontální polohy plazmatu je komplikovaná těsně po průrazu, ale v hlavní části výboje je relativně jednoduchá, jelikož plazma horizontálně expanduje pouze v důsledku změn proudu plazmatem a tlaku plazmatu, tudíž relativně předvídatelně a pomalu.

Pro vertikálně protažené plazma je nicméně vertikální poloha nestabilní, tlumená pouze vířivými proudy ve vodivé komoře s časovou konstantou 0.5 ms. Je tudíž nutné extrémně kvalitně vyladit *PI* regulátor proudového zdroje poloidálních cívek, aby zůstala poloha stabilní. Největší problém je tzv. *dopravní zpoždění*, který každý digitální systém z principu obsahuje – digitalizace signálů, výpočet polohy a výstupního signálu z *PI* algoritmu vytváří řádově desítky mikrosekund zpoždění, během kterého se plazma exponenciálně vzdaluje od rovnovážné polohy. Student se hodně zasadil o zrychlení těchto algoritmů, optimalizací práce s pamětí procesoru, digitální komunikace se silnoproudými zdroji, odstraněním frekvenčních filtrů apod, což vedlo k výraznému vylepšení vertikální stabilizace.

Z důvodu ušetření množství nezávislých proudových zdrojů je tvar plazmatu COMPASSu hardwarově svázan s jeho vertikálním protažením. Lze tudíž kontrolovat pouze jeden tvarovací parametr – vertikální protažení, případně změnit propojení silových měděných kabelů k dosažení jiné trojúhelníkovitosti plazmatu. Od hodnoty 4 kA vertikálního protažení přechází plazma do tvaru s tzv. X-bodem, kdy se vytvoří divertorová konfigurace a plazma se tak oddělí od stěny nádoby. To je základ k tzv. H-modu s vyšším udržením a taky čistějším plazmatu díky absenci přímého kontaktu s uhlíkovým limiterem.

Pátá kapitola se týká řízení hustoty plazmatu. Měření této veličiny interferometrem v reálném čase naráží obzvláště na problém přeskočení fáze, tzv. *fringe jump*, který byl ale dramaticky vylepšen použitím dvojice interferometrů s blízkou frekvencí. Jelikož je ale plazmová frekvence blízká použité frekvenci, dochází při vyšších hustotách k nelinearitě měření, kdy je měřený celkový integrál změny fáze ovlivněn více hustšími oblastmi. Student tento problém koriguje rozumným předpokladem hustotního profilu. Aktuátor hustoty je ale největší problém – jedná se o piezo-elektrický ventil, který je

extrémně nelineární, zasékává se a mění své vlastnosti v průběhu dne (jen trochu deterministicky) a s tlakem přívodního plynu. Dále je kontrola problematická hlavně z toho důvodu, že délka výbojů plazmatu COMPASSu je kratší nežli čas odplynování stěny - ta tudíž funguje jako nežádoucí a nekontrolovatelný obrovský zásobník plynu. Proto se pravidelně provádí tzv. Boronizace, kdy se stěny vyčistí a umožní tak reprodukovatelné přechody do H-modu.

Závěrem student přináší mnoho dalších návrhů na vylepšení kontrolního systému.

Shrnutí

Tato disertační práce popisuje výsledky studenta během osmi let vědecko-inženýrské práce na tokamaku COMPASS. Přestože české know-how trochu navazuje na kontrolu plazmatu v malém tokamaku CASTOR, vertikálně nestabilní plazma COMPASSu (dané požadavkem lepšího udržení, tzv. H-modu), řádově vyšší proudy a delší plazma vyžadovalo zcela nový přístup, dramaticky odlišný i od analogového systému z tištěné dokumentace původního COMPASSu-D v Anglii. Student se naučil programovat digitální procesory GPU a vytvořil tak plně programovatelný rychlý kontrolní systém, který v reálném čase (v cyklu desítek mikrosekund) měří magnetická pole, proudy a signál hustoty z interferometru. V rámci tohoto cyklu pak počítá polohu, proud a hustotu plazmatu, na základě které řídí silno-proudé zdroje cívek, které tímto stabilizují polohu, hustotu a proud plazmatem, a to vzájemně nezávislým způsobem. Tento komplexní řídicí zpětno-vazební systém je jedinečným inženýrsko-fyzikálním výsledkem této disertační práce, nezbytným pro základní fungování tokamaku COMPASS. Je evidentní, že student se naučil tzv. od píky až po komplexní řešení tomuto "umění řízení tokamaků", které zajisté nadále využije ve své kariéře.

Student spolupracoval na 28 vědeckých člancích a sám sepsal tyto výsledky do 3 článků v mezinárodním inženýrsko-vědeckém časopise *Fusion Engineering and Design*.

Z těchto důvodů navrhuji tuto práci uznat jako Disertační s hodnocením A – Vynikající.

V Praze, 8.4.2016,

školitel Mgr. Jan Horáček, dr. és sc.