

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Výzkumný úkol

Využívání dvou reciprokých sond tokamaku Compass

Bc. Petr Vondráček

Vedoucí práce: Mgr. Jan Horáček, docteur és sciences

Konzultant: RNDr. Jan Stöckel, CSc.

Studijní program: Fyzikální inženýrství

Studijní obor: Fyzika a technika termojaderné fúze

Praha 2011



Katedra: fyziky

Akademický rok: 2010/11

VÝZKUMNÝ ÚKOL

Posluchač: Bc. Petr Vondráček

Zaměření: FTTF

Vedoucí úkolu: Mgr. Jan Horáček, docteur és sciences

Konzultant: RNDr. Jan Stöckel, CSc.

Název úkolu (česky/anglicky):

Využívání dvou reciprokých sond tokamaku Compass
Exploitation of two reciprocating probes on COMPASS tokamak

Pokyny pro vypracování:

S pomocí P. Vondráčka byly v rámci jeho Bakalářské práce instalovány na tokamak COMPASS dvě reciproké sondy. Výzkumný úkol bude spočívat v

- dokončení instalace horní sondy (mechanické upevnění, vakuové čerpání)
- postupném uvedení těchto diagnostik do rutinního provozu
- v návaznosti na [1] proměřit radiální profil toku energie na stěnu nádoby - téma s významem pro konstrukci stěny tokamaku ITER

Součástí zadání výzkumného úkolu je jeho uložení na webové stránky katedry fyziky.

Literatura:

[1] J.P. Gunn, *oral presentation at EFDA TTG + EU-US TTF Meeting*. Cordoba, Spain, 2010.

[2] Nuclear Fusion 39, 2391 (1999)

Datum zadání: 12.10.2010

Datum odevzdání: 30.06.2011

.....

Vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svůj výzkumný úkol vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 31.8.2011

Petr Vondráček

Abstrakt

Výzkumný úkol „Využívání dvou reciprokých sond tokamaku Compass“ navazuje na bakalářskou práci „Zprovoznění návratové sondy na tokamaku Compass“. Obsahuje stručný úvod k řízení termojaderné fúze, seznámení se zařízením typu tokamak a uvedení do fyziky okrajového plazmatu – především do problematiky tepelného toku na stěnu tokamaku.

V dalších kapitolách text shrnuje práce na rozšíření systému ovládání 2 reciprokých sond tokamaku Compass, detailně popisuje strukturu ovládacího systému (elektronika, software) a přináší návod k jeho používání.

V závěru práce představuje plán dalších vylepšení sond, především za účelem dosažení hlubších partií plazmatu.

Obsah

Úvod	6
1 Termojaderná fúze	7
1.1 Fúzní reakce	7
1.2 Plazma	9
1.3 Základní stavba dnešních tokamaků	11
1.4 Tokamak Compass	13
2 Okrajové plazma	16
2.1 Stěnová vrstva	16
2.2 Maxwelllovske plazma, tepelný tok	19
3 Sondová měření	21
3.1 Langmuirova sonda	21
3.2 Reciproká sonda	22
4 Reciproké sondy tokamaku Compass	24
4.1 Konstrukce a parametry sond	24
4.2 Elektronika	26
4.3 Ovládací software dsPIC	27
4.4 Grafické uživatelské rozhraní	29
4.5 Komunikační protokol	34
4.6 První data	37
5 Plány do budoucna	39
5.1 Zjednodušení ovládání reciprokého pohybu	39
5.2 Zefektivnění reciprokého pohybu	39
5.3 Hlavice pro hluboký zásun	40
6 Závěr	42
Seznam literatury	43

Úvod

Ve výzkumném úkolu s názvem Využívání dvou reciprokých sond tokamaku Compass navazuji na svou bakalářskou práci [3]. Některé části následujícího textu jsou z bakalářské práce převzaty, velká část však tvoří popis mé činnosti v uplynulém akademickém roce. Mým úkolem bylo především pokračovat v instalaci reciprokých sond tokamaku Compass a to zejména v oblasti jejich ovládání. Bylo třeba poupravit část již hotového softwaru (např. doplnit komunikační protokol pro sériový port) a vytvořit další komponentu – program s grafickým uživatelským rozhraním tak, aby ovládání sond bylo intuitivní např. i pro studenty letních škol apod. Krom softwaru pro obě sondy bylo třeba dokončit kabeláž, zadat výrobu potřebných elektronických komponent apod.

V závěru akademického roku proběhla v rámci letní školy SUMTRAIC jedna z prvních měření (s horizontální sondou), která poskytla první užitečná data pro určení radiálního profilu toku energie na stěnu tokamaku.

1 Termojaderná fúze

Vysoké teploty způsobené gravitačním tlakem látky umožňují probíhání termojaderných fúzních reakcí v nitru hvězd. Jen díky těmto reakcím a energii jimi uvolňované mohly v průběhu vývoje vesmíru vzniknout těžší prvky a následně i život.

V době blížící se energetické krize světa se možnost využití fúzní energie, tak běžné a přirozené v okolním vesmíru, jen nabízí. Zvláště díky téměř nevyčerpatelným zásobám fúzního paliva na Zemi, vysoké bezpečnosti, absenci radioaktivních odpadů i škodlivých zplodin. Extrémnost podmínek nutných pro zažehnutí jaderné fúze, které na Zemi nelze zajistit ohromnou gravitací jako ve hvězdách, činí tento energetický zdroj velice těžko dostupným. Lidstvo však za poslední půl století udělalo ve výzkumu řízené termonukleární fúze ohromný pokrok, který poskytuje slibné vyhlídky do budoucna.

Bádání se odvíjí dvěma hlavními směry, kterými jsou *magneticky držená* a *inerciální fúze*. Oba způsoby jsou zkoumány na řadě složitých zařízení pomocí mnoha diagnostických metod. V současnosti nejúspěšnějším zařízením pro řízenou termonukleární fúzi je z pohledu tzv. „*Lawsonových kritérií*“, resp. parametru označovaného jako „*doba udržení*“, systém *tokamak* využívající k držení plazmatu (v němž dochází k fúzním reakcím) silná magnetická pole.

1.1 Fúzní reakce

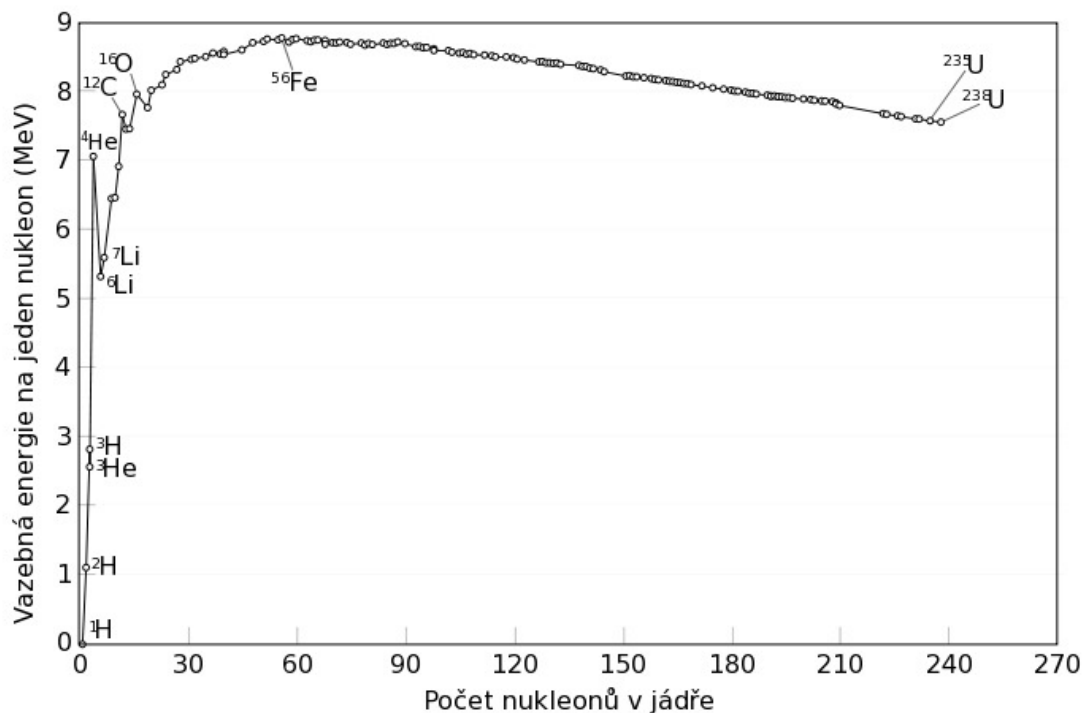
Každému atomovému jádru je možné přisoudit jistou *vazebnou energii* B odpovídající podle Einsteinova vztahu mezi hmotou a energií rozdílu součtu hmotností jednotlivých nesloučených nukleonů oproti hmotnosti jádra. Tuto vazebnou energii lze tedy vyjádřit jako

$$B = \Delta mc^2, \quad (1.1)$$

kde c je rychlost světla a Δm je rovno

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m \quad (1.2)$$

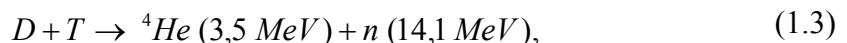
(Z – protonové číslo, A - nukleonové číslo, m_p – hmotnost protonu, m_n – hmotnost neutronu, m – hmotnost daného jádra) [15].



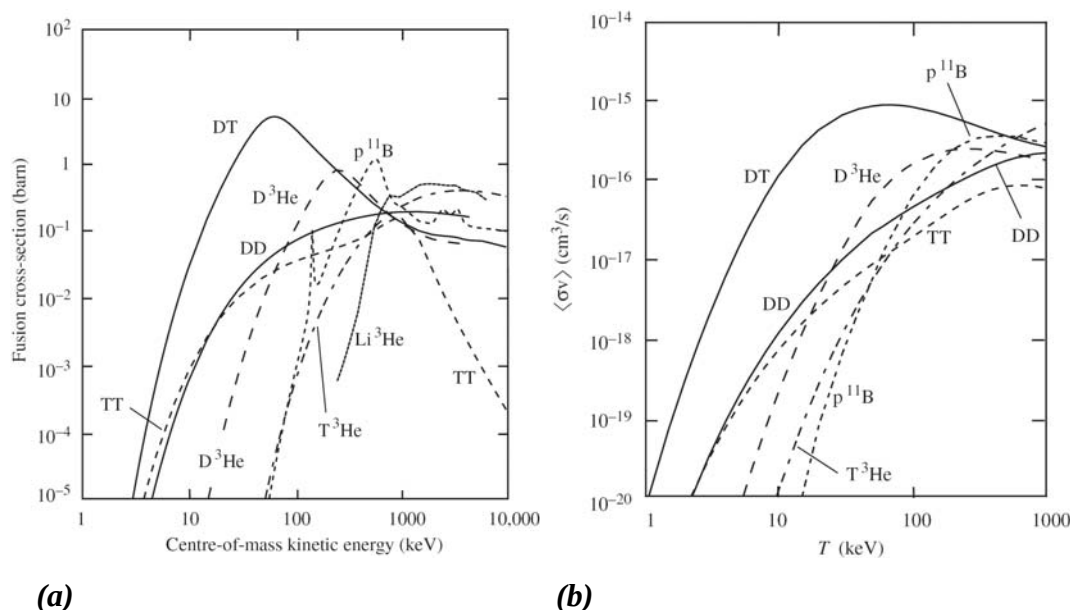
Obrázek 1.1: Závislost vazebné energie (na jeden nukleon) na počtu nukleonů v jádře. [16]

Jak je patrné z obrázku 1.1, vazebná energie připadající na 1 nukleon je u různých prvků odlišná, čehož lze využít k získávání energie. A to buďto štěpením těžkých jader (napravo od ^{56}Fe , princip štěpných jaderných elektráren) nebo slučováním jader lehkých, tzn. termojadernou fúzí.

Jako nejvýhodnější se pro energetické využití (řízenou termojadernou fúzí) jeví reakce

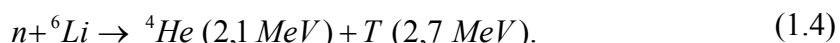


která má vyšší účinný průřez i energetický zisk než ostatní reakce. Porovnání účinných průřezů různých fúzních reakcí je znázorněno na obrázku 1.2. Lze ukázat, že ideální teplota pro udržování této reakce ve fúzních zařízeních je 10-20keV [21].



Obrázek 1.2: (a) Závislost účinných průřezů vybraných fúzních reakcí na energii slučovaných částic. (b) Závislost reaktivity vybraných fúzních reakcí na teplotě. [15]

Deuterium pro tuto reakci lze na Zemi získávat z mořské vody, kde tvoří cca 0,015% z celkového obsahu vodíku [14]. Tritium se v přírodě běžně nevyskytuje, počítá se však s jeho produkcí přímo v plášti fúzního reaktoru z lithia, kterého jsou na Zemi vydatné zásoby, reakcí



4/5 energie produkované DT reakcí odnáší neutrony (na které díky jejich elektrické neutralitě v zařízeních magneticky držené fúze magnetické pole nepůsobí) mimo plazma na stěny reaktoru. Od nich je třeba energii předat do klasického tepelného cyklu. Značnou komplikací je však poškozování stěn a jejich aktivace (vyvolání radioaktivity). Zbylou 1/5 energie získávají alfa částice, které je třeba ponechat v plazmatu dokud se netermalizují (nepředají přebytečnou energii iontům příp. elektronům paliva) a potom též odvést mimo komoru reaktoru.

1.2 Plazma

Jako plazma se označuje kvazineutrální soubor částic vykazující kolektivní chování. Kvazineutralitou se myslí malá velikost celkového elektrického náboje

souboru ve srovnání s celkovým nábojem kladných částic (resp. absolutní hodnotou celkového náboje záporně nabitých částic) souboru. Kolektivnost chování plazma odlišuje např. od běžného plynu, kde vzájemnou interakci částic (neutrálních) zprostředkovávají především binární srážky. Oproti tomu v plazmatu se díky působení dalekodosahových coulombických sil ovlivňují i poměrně vzdálené oblasti. Pro stanovení podmínky kolektivního chování tedy můžeme použít vztah mezi frekvencí typických oscilací plazmatu ω (*plazmovou frekvencí*) a frekvencí srážek ν (*srážkovou frekvencí*)

$$\frac{\nu}{\omega} \ll 1. \quad (1.5)$$

Krom toho požadujeme, aby míra vzdálenosti, na kterou je plazma schopné odstínit vložený elektrický náboj, byla malá ve srovnání s rozměry celého souboru. Tuto vzdálenost charakterizuje tzv. „*Debyova délka*“

$$\lambda_D \equiv \left(\frac{\epsilon_0 K T_e}{n e^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.6)$$

na kterou plazma odstíní potenciál vloženého statického náboje na $1/e$ jeho velikosti. Aby mělo smysl mluvit o kolektivním chování, musí též být počet částic v „*Debyově sféře*“ (kouli o poloměru λ_D) $N_D \gg 1$ [14].

Zmíněné podmínky splňuje např. plyn zahřátý na vysoké teploty, při kterých jsou jeho jednotlivé atomy ionizovány. Rozsah těchto teplot je obrovský, proto i podob plazmatu je veliké množství. Na plazma tak narazíme v různých výbojích, ve slunečním větru, uvnitř i na povrchu hvězd, v podobě mezihvězdného plynu nebo laserového plazmatu atd. Za plazma je však možné považovat třeba i elektronový plyn v kovech (degenerované plazma) či elektrolyty.

Plazma má řadu zajímavých vlastností a lze v něm pozorovat mnohé specifické jevy - např. pohyb jednotlivých částic v elektrických a magnetických polích, s tím související drifts, šíření vln v plazmatu, difúzi a odpor atd. V následující části se však zaměřím pouze na základní popis okrajového plazmatu v tokamacích, neboť to je oblast působnosti reciproké sondy. Nejdříve ale malý úvod do problematiky tokamaků.

1.3 Základní stavba dnešních tokamaků

Extrémní teploty v rozsahu 10-20keV, ideální pro pozemské energetické využití termojaderné fúze, vylučují použití jakýchkoli konvenčních materiálů na zhotovení nádoby, ve které by bylo uloženo plazma a probíhaly fúzní reakce. Již v polovině 20. století započal výzkum založený na poměrně jednoduché myšlence. Tou je využití Lorentzovy síly, která omezuje pohyb nabitých částic ve směru kolmém na magnetické pole. Snahou tedy bylo vytvořit takové uspořádání magnetického pole, které by navíc zamezilo unikání částic plazmatu v podélném směru. Takové magnetické pole by bylo uzavřeno do vakuové komory se stěnami dostatečně vzdálenými od samotného plazmatu. Řešení se objevilo několik – některá jsou založená na principu *magnetického zrcadla*, využívajícího platnost 1. adiabatického invariantu

$$\mu = \frac{mv_K^2}{2B} \quad (1.7)$$

(v_K označuje velikost složky rychlosti kolmé k magnetickému poli, m hmotnost částice, B velikost magnetické indukce), který v kombinaci se zákonem zachování energie zapříčiňuje nárůst kolmé složky rychlosti na úkor té rovnoběžné při pohybu nabitě částici z oblasti slabšího do oblastí silnějšího magnetického pole [14]. Jiné řešení počítalo s uzavřením magnetického pole „sama do sebe“, v nejjednodušším případě vytvořením prstencovitého (toroidního) tvaru siločar. A právě takové uspořádání magnetického pole je základem zařízení označovaného jako *tokamak* vynalezeného v 50. letech 20. století Igorem Jevgeněvičem Tammem a Andrejem Sacharovem v bývalém Sovětském svazu.

Vzhledem k zakřivené geometrii siločar magnetického pole se v tokamacích projevují mnohé nežádoucí jevy, především různé driftы gyračních středů částic plazmatu. Je tedy nutné kompenzovat drift zakřivení magnetického pole, grad B drift, polarizační drift, ExB drift a mnohé další. Jako nejvhodnější se jeví vytvoření poloidálního magnetického pole, které v kombinaci s toroidálním vytvoří stáječící se (helicitní) magnetické pole – viz obrázek 1.3. Částice pohybující se podél siločar se tak část času vyskytují jak na vnější tak na vnitřní, resp. horní a dolní straně toroidu

a působení řady driftů se tak anuluje. Míru stáčení siločar vyjadřuje tzv. „bezpečnostní faktor“ („*safety factor*“), který lze pro kruhový průřez plazmatu zapsat jako

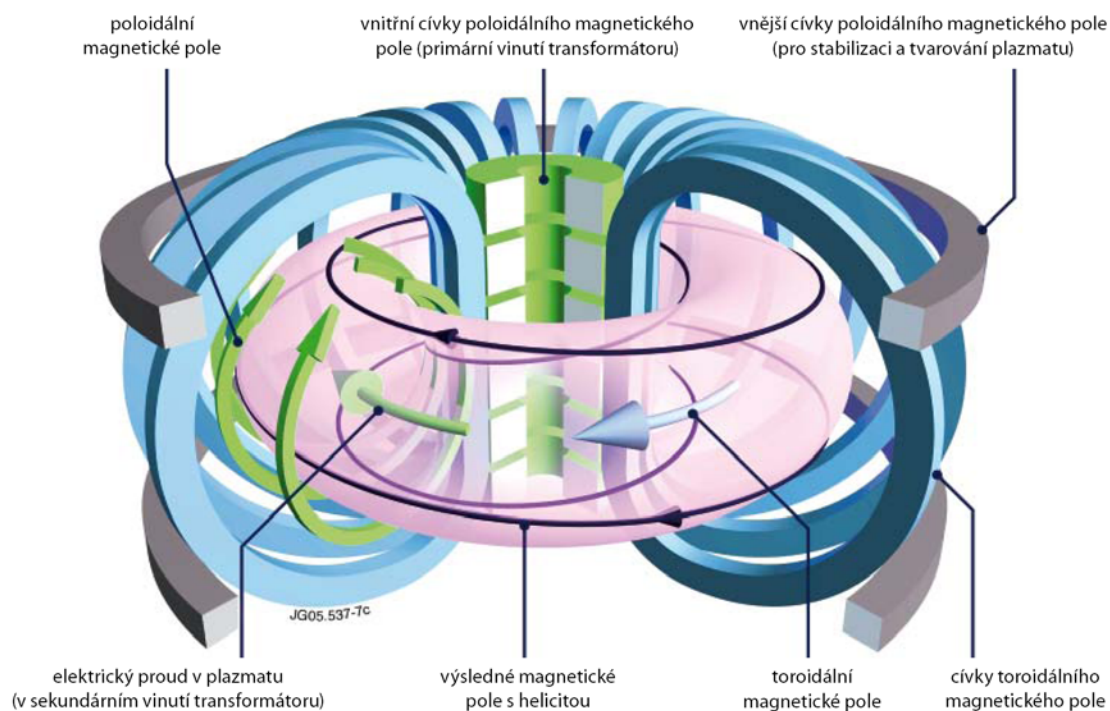
$$q = \frac{B_T}{R} \frac{r}{B_p}, \quad (1.8)$$

kde B_T resp. B_p označuje velikost magnetické indukce toroidálního resp. poloidálního magnetického pole, R velký poloměr (poloměr torusu) a r malý poloměr (poloměr řezu torusu) tokamaku. Poloidální pole se v tokamacích vytváří generací elektrického proudu v plazmatu. A to pomocí transformátorového efektu, kdy je centrálním solenoidem, umístěným na ose tokamaku (primární vynutí transformátoru), vytvářeno časově proměnné magnetické pole, které indukuje proud prstencem plazmatu (sekundární vynutí). U starších tokamaků byl navíc centrální solenoid doplněn mohutným kovovým jádrem. Vytvářet proměnné magnetické pole postupným zvyšováním nebo snižováním proudu protékajícího centrálním solenoidem lze však pochopitelně pouze omezenou dobu, proto se transformátorový efekt používá převážně pouze v prvních okamžicích výboje na průraz plazmatu (ionizaci pracovního plynu) a počáteční ohmický ohřev. Dále je již proud vlečen pomocí mikrovlnného elektromagnetického záření vysílaného do plazmatu.

Helicitní pole doplňuje řada poloidálních polí určených především k řízení tvaru a polohy plazmatu uvnitř vakuové komory.

Ke zkoumání parametrů plazmatu slouží celá škála sofistikovaných měřících metod a sond. Jejich společnou vlastností musí být schopnost vysokého časového rozlišení či alespoň možnost přesně stanovit okamžik měření z důvodu poměrně krátké doby trvání plazmového výboje ve většině tokamaků. Zároveň nesmí plazma (příliš) ovlivňovat či dokonce znečišťovat. Velká část diagnostik buďto pouze měří vyzařování plazmatu či změny magnetického pole apod. nebo k měření využívá elektromagnetické záření (např. bolometrie, spektroskopie, tomografie, Thompsonův rozptyl, interferometrie, polarimetrie, reflektometrie atd.). Do přímého styku s plazmatem se z důvodu vysokých teplot a částicových toků dostane jen několik

málo sond a to navíc pouze na úplném okraji. Patří mezi ně především Langmuirovy sondy, jejichž princip využívá i reciproká sonda.



Obrázek 1.3: Principiální schéma tokamaku. [22]

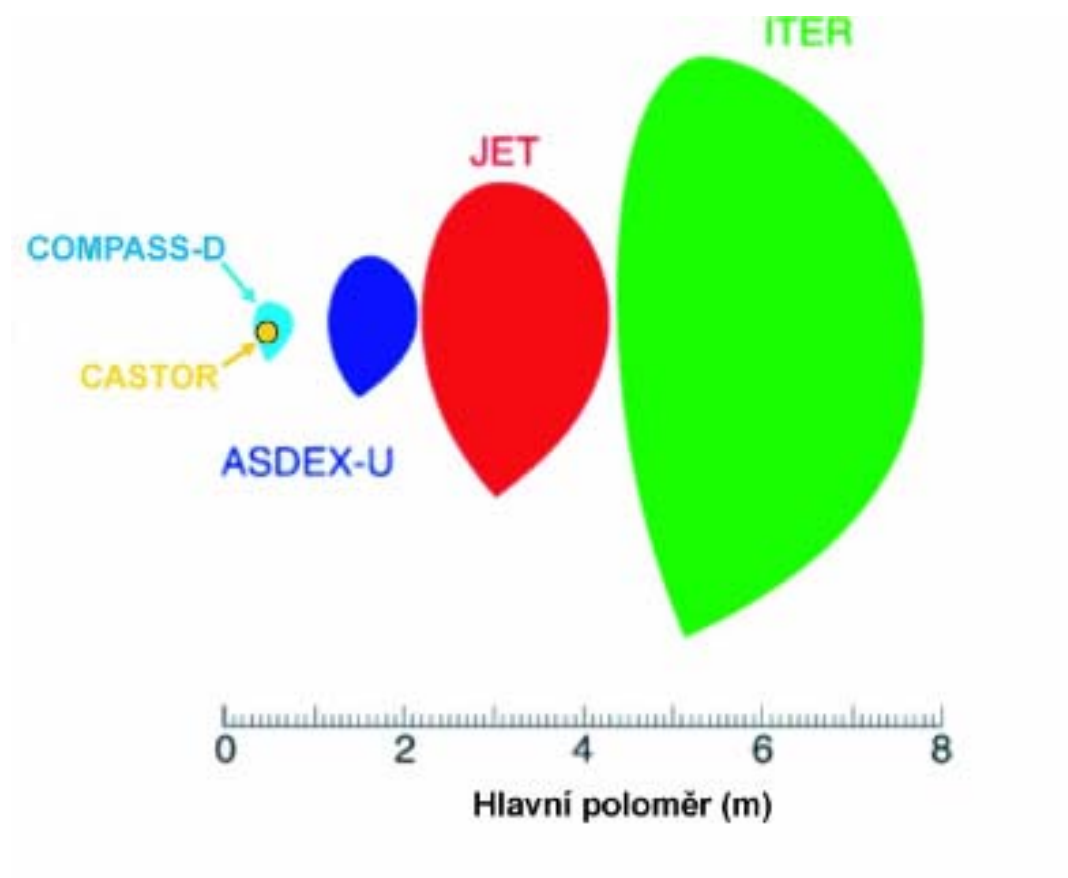
1.4 Tokamak Compass

Tokamak Compass byl zkonstruován v osmdesátých letech minulého století v *Culham Science Centre* ve Velké Británii. První průraz plazmatu zaznamenal v roce 1989, tehdy ještě s komorou kruhového průřezu, která byla v roce 1992 vyměněna za komoru s průřezem ve tvaru písmene „D“. V prvních letech bylo proto zařízení označováno jako „*Compass-C*“, později pak „*Compass-D*“. Díky změně tvaru plazmatu byl dosažen mód s vysokým udržením plazmatu – tzv. *H-mód*, který by měl být referenčním provozním režimem mezinárodního experimentálního tokamaku ITER. Vzhledem ke svým rozměrům (hlavní poloměr 0,56 m, vedlejší poloměr 0,2 m) se tak Compass zařadil mezi menší zařízení s takzvanou „ITER-like“

konfigurací schopné dosáhnout módu s vysokým udržením plazmatu. Porovnání velikosti tokamaku Compass s dalšími tokamaky je na obrázku 1.4.

Především z důvodu nedostatku finančních i personálních zdrojů po spuštění provozu většího sférického tokamaku MAST, byl Compass Evropskou komisí a UKAEA na podzim roku 2004 zdarma nabídnut Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR, který měl bohaté zkušenosti s provozem malého tokamaku Castor. Vzhledem k velkým a doposud nevyužitým možnostem Compassu a také k jeho relevanci k projektu ITER byla nabídka přijata a Česká republika se tak zařadila na špičku evropského i světového výzkumu termojaderné fúze [23].

Během instalace tokamaku v Praze byla provedena řada úprav a modernizace jednotlivých zařízení. Zcela nově je řešen např. energetický systém – napájení cívek magnetického pole během výboje zajišťují 2 více než 50-ti tunové 35 MW setrvačníky s generátory. Ty jsou roztáčeny v pauzách mezi výboji elektromotory napájenými z elektrické sítě [24]. Nově vybudovaný je též systém sběru dat, většina diagnostik atd. Hlavní parametry tokamaku Compass shrnuje tabulka 1.1.



Obrázek 1.4: Srovnání velikosti komory Compassu-D s dalšími tokamaky. [23]

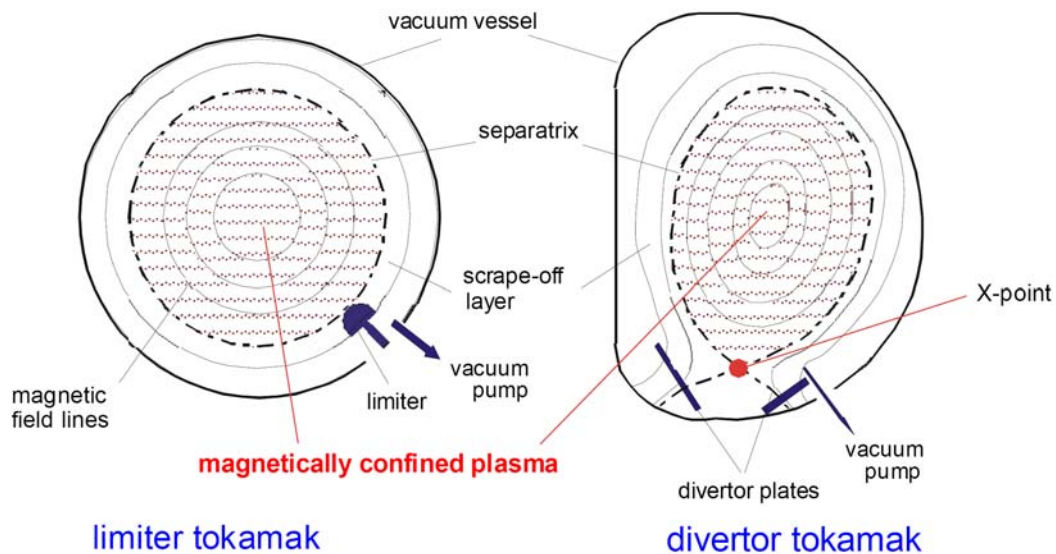
Hlavní poloměr	0.56 m
Vedlejší poloměr	0.2 m
Proud plazmatem	<350 kA
Magnetické pole	0.8-2.1 T
Vakuový tlak	$\sim 10^{-8}$ Pa
Triangularita	~ 0.5
Elongace	~ 1.6
Délka pulsu	< 1 s

Tabulka 1.1: Hlavní parametry tokamaku Compass-D. [23]

2 Okrajové plazma

2.1 Stěnová vrstva

Jako o okrajovém se u tokamaků mluví o plazmatu v okolí posledního uzavřeného magnetického povrchu - *LCFS* (*last closed flux surface*) či *separatrix*. LCFS je vytvořen omezením volného průběhu magnetického pole v komoře tokamaku a to buďto vložением pevné překážky – *limiteru*, nebo vytvořením „*X-bodu*“ pomocí přídavného magnetického pole. Oblast vně separatrix se označuje jako Scrape-Off Layer (SOL). Zde se již siločivky volně neuzavírají, ale procházejí pevným materiálem – v prvním případě limiterem, v druhém případě tzv. *divtorem* – viz obrázek 2.1. Částice, které vylétnou za separatrix, tak ve většině případů dopadnou právě na limiter či divtor, kde probíhá recyklace částic, odprašování materiálu atd. Výhodou divtoru je větší vzdálenost od LCFS, díky níž se atomy uvolněné tokem dopadajících částic nedostávají přímo do vnitřního objemu plazmatu jako v případě limiteru. Vzhledem k malému poloidálnímu poli v oblasti X-bodu musí navíc částice urazit velice dlouhou dráhu než dopadne na desky divtoru. U tokamaků s divtorovým uspořádáním je též snazší přechod do H-módu (módu s vyšším udržením poprvé pozorovaným v osmdesátých letech na tokamaku ASDEX).



Obrázek 2.1: Schématické vyobrazení poloidálního řezu komorou tokamaku se znázorněním magnetických povrchů v limiterové a divertorové konfiguraci. [27]

Vzhledem k vyšší pohyblivosti (nižší hmotnosti, vyšší rychlosti při stejné teplotě) oproti iontům unikají elektrony na stěny komory (desky divertoru, limiter, příp. na jiné předměty, které jsou ve styku s plazmatem) rychleji než ionty. Stěny tak získávají ve srovnání s plazmatem záporný potenciál a v jejich okolí vzniká tzv. *stěnová vrstva*. V ní dochází směrem z plazmatu ke stěně k pozvolnému poklesu tlaku, elektrického potenciálu i hustoty – viz obrázek 2.2. Potenciál se ustaví na takové hodnotě, aby se vyrovnal tok elektronů a iontů.

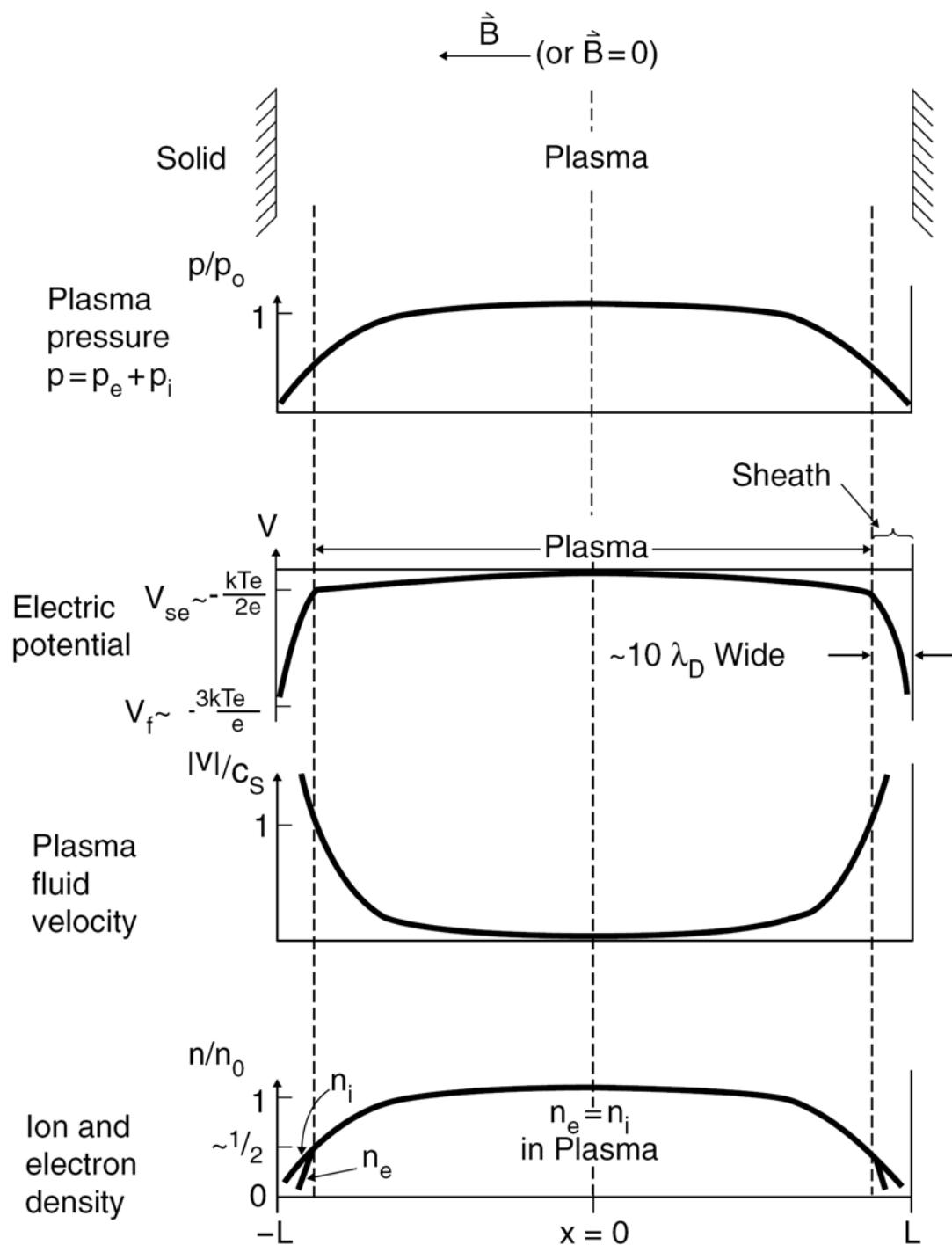
Lze ukázat, že ionty musí splňovat tzv. *Bohmovo kritérium*, které říká, že rychlost v_i iontů vstupujících do stěnové vrstvy musí být rovna alespoň akustické rychlosti c_s

$$v_i \geq c_s. \quad (2.1)$$

Pro akustickou rychlost platí

$$c_s = \sqrt{\frac{k_B(T_i + ZT_e)}{m_i}} \quad (2.2)$$

(K_B – Boltzmanova konstanta, T_i – iontová teplota, T_e – elektronová teplota, m_i – hmotnost iontů, Z – stupeň ionizace iontů). U běžného deuteriového plazmatu je vrstva tlustá přibližně $\sim 10\lambda_D$ (10 Debyových délek - viz. vztah 1.6).



Obrázek 2.2: Schématické znázornění průběhu tlaku, elektrického potenciálu, rychlosti plazmatu a iontové resp. elektronové hustoty při ohraničení plazmatu 2 pevnými povrchy. Tloušťka stěnové vrstvy (sheath) je pro názornost přehnána. [4]

2.2 Maxwellovské plazma, tepelný tok

Pro maxwellovské plazma s distribuční funkcí

$$f^{Max}(\vec{v}) = n \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(\frac{-m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2k_B T} \right) \quad (2.3)$$

můžeme vyjádřit tok částic v jednom směru podél osy x jako

$$\Gamma_x^{Max} = \int_0^{+\infty} v_x f^{Max}(\vec{v}) dv_x \int_{v_y=-\infty}^{+\infty} dv_y \int_{v_z=-\infty}^{+\infty} dv_z = \frac{1}{4} n \bar{c} \quad (2.4)$$

kde $\bar{c}$ je tepelná (průměrná) rychlost částic

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \int_0^{+\infty} v f^{Max}(v) dv = \left(\frac{8k_B T}{\pi m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

Tepelný tok příslušný toku částic (2.4) lze nyní vyjádřit jako [4]

$$q_x^{Max} = \int_{v_x=0}^{+\infty} \frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) v_x f^{Max}(\vec{v}) dv_x \int_{v_y=-\infty}^{+\infty} dv_y \int_{v_z=-\infty}^{+\infty} dv_z = 2k_B T \Gamma_x^{Max} \quad (2.6)$$

Proud elektronů pronikající do stěnové vrstvy lze rozdělit na 2 části – první nemá dostatečnou energii na překonání odpudivé síly záporně nabitě stěny a někde uvnitř stěnové vrstvy otočí směr svého pohybu a vrstvu opět opouští. Druhá část má energii rovnou alespoň $|eV_{sf}|$ (V_{sf} je potenciálový skok stěnové vrstvy) a dopadá na pevnou stěnu s tepelným tokem

$$q_{ss}^e = 2k_B T_e \Gamma_{ss} = 2k_B T_e \Gamma_{se} \quad (2.7)$$

(stěnovou vrstvu uvažujeme natolik tenkou, že jakýkoli zdroj částic v ní je zanedbatelný a tudíž $\Gamma_{ss} = \Gamma_{se}$) [4]. Tepelný tok okrajem stěnové vrstvy musí být vyšší o faktor příslušný potenciálovému skoku na vrstvě (energetickému úbytku při průchodu elektronu stěnovou vrstvou) a vlivu oblasti mimo stěnovou vrstvu (tzv. „pre-sheath“). Tyto vlivy můžeme souhrnně popsat faktorem γ_e

$$\gamma_e = 2 + |eV_{sf}| / k_B T_e + |eV_{pre/sheath}| / k_B T_e \quad (2.8)$$

a tepelný tok zapsat jako

$$q_{se}^e = \gamma_e k_B T_e \Gamma_{se} \quad (2.9)$$

Rozdělovací funkce iontů odpovídá díky vlivu stěnové vrstvy posunutému maxwellovu rozdělení a tepelný tok iontů na okraji stěnové vrstvy je roven [4]

$$q_{se}^i = \left(\frac{5}{2} k_B T_i + \frac{1}{2} m_i c_s^2 \right) \Gamma_{se} \quad (2.10)$$

Pro celkový tepelný tok okrajem stěnové vrstvy tak získáváme

$$q_{se} = q_{se}^e + q_{se}^i = \gamma k_B T_e \Gamma_{se} \quad (2.11)$$

kde γ je celkový koeficient přenosu tepla do stěnové vrstvy [4]. V praxi se lze setkat s vyjádřením γ jako [5]

$$\gamma = 2.5 \frac{T_i}{T_e} + \frac{2}{1 - \delta_e} - 0.5 \ln \left[\left(2\pi \frac{m_e}{m_i} \right) \left(1 + \frac{T_i}{T_e} \right) \frac{2}{(1 - \delta_e)^2} \right] \quad (2.12)$$

které navíc zahrnuje i sekundární elektronovou emisi δ_e . V případě $T_e = T_i$ platí [4]

$$\gamma \cong 7 - 8 \quad (2.13)$$

Tok částic ve vztahu (2.11) lze při měření Langmuirovou sondou vyjádřit pomocí iontového nasyceného proudu a celkový tepelný tok určit jako [5]

$$p_{LP} = \gamma k_B T_e \frac{j_{sat}}{e} \sin \nu \quad (2.14)$$

kde ν je úhel mezi magnetickým polem a povrchem sondy (resp. tělesem, pro nějž tepelný tok určujeme – stěna komory, divertorový plát apod.).

3 Sondová měření

Na experimentálních fúzních zařízeních (zejména tokamacích) se používá velká škála diagnostických metod a zařízení pro zjišťování (fyzikálních) parametrů produkovaného plazmatu. Jednou z nejzákladnějších, velice rozšířených a v principu i nejjednodušších diagnostik je Langmuirova sonda. Ve své podstatě je to malý vodivý drátek (hrot) zasunutý do plazmatu. Měřením napětí a proudů může Langmuirova sonda poskytnout informace o základních parametrech plazmatu – především o plovoucím potenciálu, potenciálu plazmatu, jeho hustotě a teplotě.

Obecně je velkou předností Langmuirovy sondy jedinečné prostorové ($\sim 3\text{mm}$) i časové ($\sim 1\mu\text{s}$) rozlišení, což z ní (v kombinaci s reciprokým manipulátorem) dělá „diagnostiku číslo 1“ na poli studia turbulentního transportu. Langmuirovy sondy se běžně používají i na řadě dalších zařízení než jen na tokamacích.

3.1 Langmuirova sonda

Langmuirova sonda je malý kus vodiče – typicky váleček o průměru několika desetin až jednotek milimetrů vyrobený z wolframu, molybdenu, grafitu či jiného materiálu schopného odolávat vysokým teplotám. V nejjednodušším případě je tento „pin“ pouze vnořen do plazmatu a sbírá elektrony a ionty na něj dopadající. V takové situaci se sonda nabije na plovoucí potenciál, který je záporný vůči potenciálu plazmatu a v okolí hrotu vznikne stěnová vrstva (viz kapitola 2).

Plovoucí potenciál V_f je obecně potenciál jakéhokoli izolovaného objektu zanořeného do plazmatu. Díky vyšší mobilitě (pohyblivosti) elektronů oproti iontům dopadá na objekt zpočátku více záporně nabitých částic a těleso se nabije na záporný potenciál oproti potenciálu plazmatu, jak je naznačeno v kapitole 1. Plovoucí potenciál se měří jako napětí mezi daným objektem a komorou tokamaku. Obvykle je pro potřeby sběru dat (DAS - data acquisition system) při měření nutné použít napěťový dělič (např. 1:100).

Ve vodíkovém plazmatu je plovoucí potenciál V_{fl} spojen s potenciálem plazmatu Φ vztahem

$$V_{fl} = \Phi - 2.8T_e. \quad (3.1)$$

kde T_e je elektronová teplota. [4],[6]

Nabijeme-li sondu na napětí V vzhledem ke komoře tokamaku, můžeme měřit sondový proud I , pro nějž platí [6]

$$I = I_{sat} \left(1 - \exp \left(- \frac{e(V - V_{fl})}{K_B T_e} \right) \right) \quad (3.2)$$

kde I_{sat} je iontový nasycený proud a V_{fl} plovoucí potenciál.

Iontového nasyceného proudu dosáhneme nabitím sondy na dostatečně veliké záporné napětí (většinou je dostačující napětí $\sim 100V$), tak aby byly elektrony odpuzovány a na sondu dopadaly pouze ionty. Pro I_{sat} pak platí [6]

$$I_{sat} = n_e f e A c_s. \quad (3.3)$$

c_s je iontozvuková rychlost (viz vztah (2.2)), kterou mají ionty vstupující do stěnové vrstvy (Bohmovo kritérium (2.1)). T_i iontová teplota, m_i hmotnost iontů, Z_i stupeň ionizace iontů. A představuje povrch stěnové vrstvy obklopující Langmuirovu sondu – v magnetizovaném plazmatu se často nahrazuje aktivní plochou sondy (projekcí jejího povrchu ve směru magnetického pole). f je faktor popisující změny hustoty vlivem vzájemného pohybu sondy a plazmatu. Jeho velikost je závislá na použitém modelu - neuvažujeme-li viskozitu plazmatu je $f \sim 1/2$, s přihlédnutím k viskozitě plazmatu dostáváme pro f hodnotu ~ 0.37 [8][9].

3.2 Reciproká sonda

Vysokou tepelnou zátěž Langmuirovy sondy při kontaktu s plazmatem se snaží řešit koncept reciproké sondy. Základním principem je co možná nejvíce zkrátit dobu kontaktu aktivní části sondy (např. Langmuirova či ballpen sonda) s horkým plazmatem. Reciproká sonda tedy velice rychle zasune měřící hlavici do plazmatu (typicky na SOL) a okamžitě (dříve než se tepelným tokem poničí) ji zase vytáhne. Kontakt s nejteplejším plazmatem se tak zkrátí na několik jednotek až desítek ms.

Konstrukce reciproké sondy může být rozličná, reciproký pohyb typicky zajišťuje píst poháněný stlačeným vzduchem či héliem. Navíc je možné před výbojem sondu „pomalým posuvem“ nastavit na potřebnou pozici vůči komoře tokamaku. Podrobnosti lze nalézt např. v literatuře [3][6][13].

Vysoké nároky jsou kladeny na mechanickou konstrukci sondy, která při reciprokém pohybu odolává přetížení několika g , i na přesný řídicí systém sondy, který musí být schopen časově i prostorově sesynchronizovat pohyb sondy s plazmatem.

4 Reciproké sondy tokamaku

Compass

V rámci svého výzkumného úkolu jsem měl na starost především dokončení a vyladění ovládání obou reciprokých sond tokamaku Compass – a to jak elektroniky tak především ovládacího softwaru. Bylo třeba poupravit software pro mikrokontrolér dsPIC30F4013 ovládající horizontální sondu, který jsem vyvíjel jako součást své bakalářské práce a vytvořit program s grafickým uživatelským rozhraním pro místní server umožňující komunikaci přes optická vlákna se samotným mikrokontrolérem. Za tímto účelem jsem též sestavil komunikační protokol. Celý tento systém bylo třeba navíc poupravit i pro potřeby vertikální reciproké sondy.

Po krátkém shrnutí parametrů obou reciprokých sond tokamaku Compass jsou v následujícím textu podrobněji rozebrány jednotlivé části zmiňované výše.

4.1 Konstrukce a parametry sond

4.1.1 Horizontální sonda

Horizontální reciproká sonda tokamaku Compass měří parametry plazmatu přibližně na *midplane LFS* (*Low Field Side* – strana nižšího magnetického pole – tj. dále od osy tokamaku). Základ této sondy byl přivezen spolu s tokamakem z anglického Culhamu.

Hlavní pohonnou silou 190 cm dlouhé sondy je stlačený vzduch, kterým je pro účely pomalého posuvu poháněn pneumatický motor, jehož otáčivý pohyb se pomocí mechanických převodů mění na lineární. Posuv na požadovanou pozici před měřením (výbojem) lze též provádět ručně. Rychlý pohyb směrem k ose tokamaku a následně ven zajišťuje dvoucestný pneumatický píst. Rozsah pomalého posuvu je zhruba 610 mm, rychlého pak maximálně 60 mm. Tělo sondy ukrývá celkem 18 koaxiálních signálních vodičů, které je možno připojit k jednotlivým Langmuirovým pinům hlavice (příp. ballpen sondám apod.). Momentálně je nainstalována hlavice J.

Adámka osazená čtyřmi ballpen sondami a čtyřmi Langmuirovými sondami. Popis hlavice lze najít např. ve článku [19]. Celý mechanismus je umístěn na masivním kovovém stole, zajišťujícím dostatečnou stabilitu a znemožňujícím jakékoli nežádoucí pohyby či vibrace sondy při rychlém pohybu během měření.

Tlak vzduchu přiváděného k sondě z centrálního rozvodu tokamaku je řízen redukčním ventilem. Vzhledem k technické konstrukci zařízení a bezpečnosti je používán tlak 5 bar, při kterém rychlý pohyb sondy dosahuje maximálního zrychlení $a \sim 3g$. Celý pohyb trvá ~ 170 ms. Do budoucna se pro zlepšení parametrů rychlého pohybu počítá s používáním stlačeného hélia namísto vzduchu, příp. s instalací pružin – viz kapitola 5.

4.1.2 Vertikální sonda

Vertikální sonda je připojena na horní oválný port v jihozápadní části komory tokamaku a měří tedy v nejvrchnějších částech plazmatu. Tato sonda byla vyvinuta a zkonstruována výzkumnou skupinou na *University of California* v San Diegu v USA, řadu let byla úspěšně používána na tokamacích *TEXTOR* a *DIII-D*, s některými úpravami pak na *TCV* ve švýcarském Lausanne, odkud byla v roce 2009 převezena do ČR.

Oproti horizontální sondě, kde pomalý posuv zajišťuje pneumatický motor, jsou zde oba pohyby, tedy rychlý i pomalý, zajištěny dvoucestnými pneumatickými písty. Nastavení koncové polohy pomalého posuvu se provádí pomocí dorazu v podobě elektrickými motorky polohovatelného „vozíku“. Délka rychlého pohybu je dána pevně na 150mm.

Podobně jako u horizontální sondy je i u této pomalý pohyb poháněn stlačeným vzduchem z centrálního rozvodu tokamaku, jehož tlak je redukován na 5 bar. Pohonnou sílu rychlého pohybu zajišťuje stlačené helium. V místě dřívějšího působení sondy, ve švýcarském Lausanne, bylo používáno helium pod tlakem 4 bar, při jehož použití reciproký pohyb dosahoval průměrné rychlosti $|v| = 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ s maximálním zrychlením $|a| < 40\text{m}\cdot\text{s}^{-2} \approx 4g$. Celý pohyb trval zhruba ~ 300 ms [6]. Tělem sondy je vedeno 5 koaxiálních signálních vodičů, maximální počet pinů hlavice je tedy 5.

4.2 Elektronika

Reciproké sondy tokamaku Compass jsou ovládány pomocí 2 mikrokontrolérů dsPIC30F4013. Ty jsou umístěny v racku přímo v hale tokamaku a se sondami jsou spojeny kabely taženými pod podlahou haly. Uživatelskou komunikaci s mikrokontroléry obstarává software s grafickým uživatelským rozhraním běžící na serveru „thermoc“ umístěném již mimo halu tokamaku. Propojení serveru s dsPIC zajišťují optická vlákna na straně serveru doplněná opto-metalickými převodníky ELO E14C (server je díky tomu opticky oddělen od elektroniky uvnitř haly tokamaku).

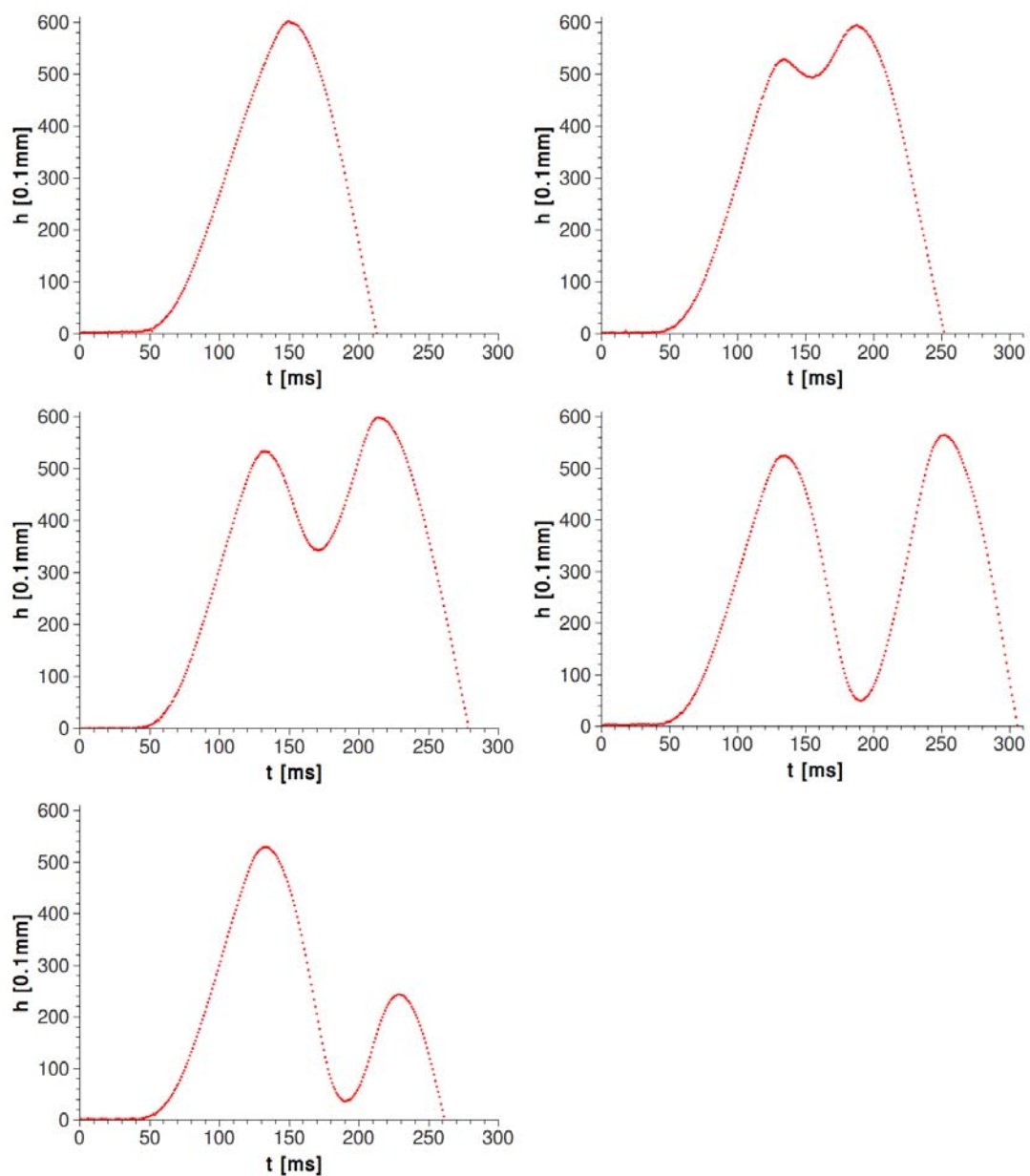
Elektronika horizontální sondy byla uvedena do provozu již v rámci mé bakalářské práce. Po zkušenostech s občasnou potřebou jednoduše odpojit sondu od elektroniky jsem zadal výrobu „destičky“ s několika RJ-45 zásuvkami vyvedenými na svorkovnici, která je propojena s jednotlivými částmi sondy. Přívodní kabely ovládací elektroniky opatřené konektory RJ-45 lze nyní snadno v případě potřeby odpojit (např. při výměně hlavice sondy mimo halu tokamaku apod.).

Pohyb vertikální sondy není na rozdíl od té horizontální řízen přímo mikrokontrolérem dsPIC, ale ten slouží k ovládání samostatné původní elektroniky sondy (převzaté ze švýcarského TCV), jež si sama řídí pneumatické ventily a motorky pomalého posuvu. Nově bylo třeba navrhnout a zkonstruovat rozšiřující desku pro dsPIC vertikální sondy, která podobně jako u sondy horizontální [3] zajistí optické oddělení od původní ovládací elektroniky a elektroniky externího triggeru. Navíc je již osazena konektory (RJ-45 a BNC) pro snadnější odpojení kabelů (deska horizontální sondy využívá svorkovnice - odpojování a zpětné připojování kabelů je ve stísněném prostoru racku, v němž jsou mikrokontroléry umístěny, velice zdoluhavé). Viz příloha 1.

4.3 Ovládací software dsPIC

Podrobný popis programu v jazyce C pro dsPIC horizontální sondy lze nalézt v bakalářské práci [3]. Komunikaci s uživatelem využívající jednoznakové příkazy však bylo třeba nahradit uceleným sériovým komunikačním protokolem, pokud možno stejné filozofie jako komunikační protokol používaný k řízení vakuového systému tokamaku a jeho dalších částí (tento protokol navrhl Tiago Valeriano – viz [7]). Protokol je samostatně popsán v kapitole 3.4.

Dále jsem doplnil několik funkcí, jako např. možnost nastavit 2 další časy přepnutí pneumatického ventilu rychlého reciprokého posuvu. Díky tomu by mělo být možné utlumit zpětný chod reciprokého pohybu či jinak tvarovat časový průběh polohy hlavice při rychlém reciprokém pohybu (doposud docházelo k prudkému nárazu pohyblivé části sondy při dosažení maximálního vysunutí při zpětném pohybu). Viz Obr. 4.1.



Obrázek 4.1: Časový průběh polohy hlavičky sondy při reciprokém pohybu při různých nastaveních časů přepínání ventilu.

Pro dsPIC vertikální sondy vytvořil řídící software student Benoit Caylar. Vzhledem k potřebě snadné údržby obou programů a tudíž pokud možno jejich podobnosti a navíc potřebě též zavést komunikační protokol pro komunikaci se serverem (grafickým rozhraním), jsem se rozhodl vytvořit program nový na základě programu horizontální sondy. Kód se od programu pro horizontální sondu poněkud liší, což je dáno především odlišnou konstrukcí sondy a zařazením původní ovládací elektroniky – ta se ovládá pomocí 4 vstupů, na něž se v různých kombinacích přivádí 0 nebo 5V. Každému povelu (rychlý posuv dovnitř, rychlý posuv ven, pomalý posuv dovnitř, pomalý posuv ven apod.) tak přísluší jakési binární číslo – kombinace 0 a 5V na 4 vstupech řídící elektroniky.

4.4 Grafické uživatelské rozhraní

Požadavek na co nejjednodušší a pokud možno intuitivní ovládání sond (např. i pro potřeby studentů letních škol apod.) vyústil v nutnost vytvořit uživatelsky přívětivé grafické rozhraní softwaru pro server komunikující s mikrokontroléry dsPIC. Takovýto software by mohl jednoduše ovládat kdokoli, komu bude např. přes ssh umožněn přístup na server. Po porovnání dostupných programových produktů pro tvorbu GUI (grafic user interface – grafické uživatelské rozhraní) jsem se rozhodl využít moderní a pružný jazyk Python v kombinaci s Qt.

4.4.1 Python

Neustále se vyvíjející jazyk Python začal vznikat v roce 1989 ve výzkumném ústavu v Amsterodamu pod vedením Guida van Rossuma. V současné době běží na mnoha platformách (Linux, Win, Mac, WinCE, OS/2, Java) a programy v něm napsané lze na těchto systémech téměř vždy spouštět bez úprav. [12]

Python je interpretovaný objektově orientovaný jazyk. Umožňuje rozdělit programy do samostatných modulů, které mohou být snadno použity i v jiných programech a projektech. Základní distribuce Pythonu obsahuje velké množství standardních modulů - pro přístup k databázím, GUI, službám operačního systému, HTTP, FTP, POP3, SMTP atd.. Samozřejmostí je správa výjimek, kompilace do bytcodeu, mnoho vysokoúrovňových typů (řetězec, seznam, asociativní pole), plná

podpora Unicode, možnost doplnit vlastní vestavěné typy a funkce pomocí C/C++, nebo naopak začlenit interpret do programu v jiném jazyce. [12]

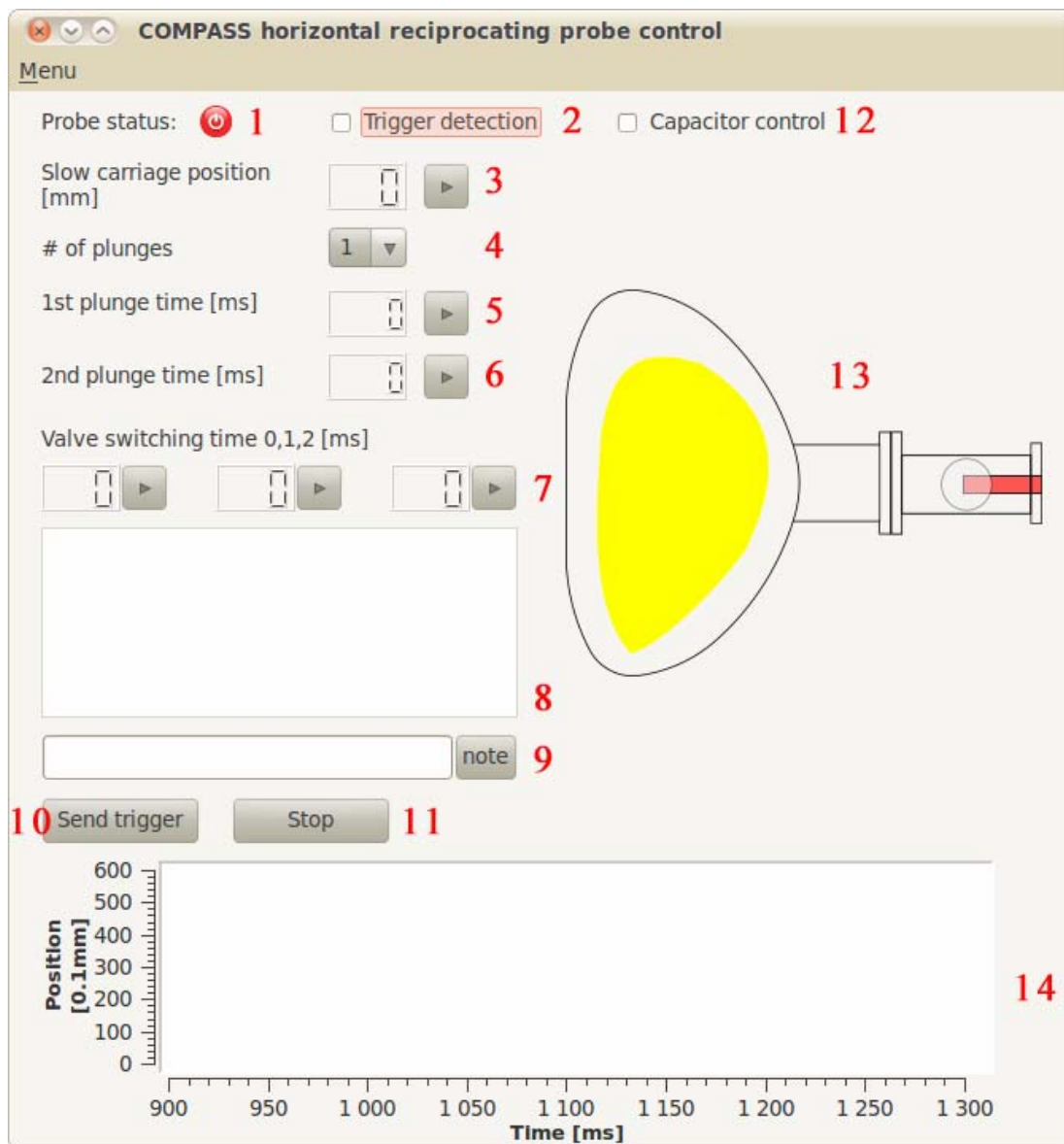
4.4.2 Qt

Qt je jednou z nejpobulárnějších multiplatformních knihoven pro vytváření programů s grafickým uživatelským rozhraním. Qt je napsáno v C++ a o jeho vývoj se stará firma Nokia. Používá vlastní renderovací jádro, které se snaží emulovat vzhled systému, na němž běží. Pro potřeby jazyka Python lze Qt použít ve formě knihovny PyQt. [10][11]

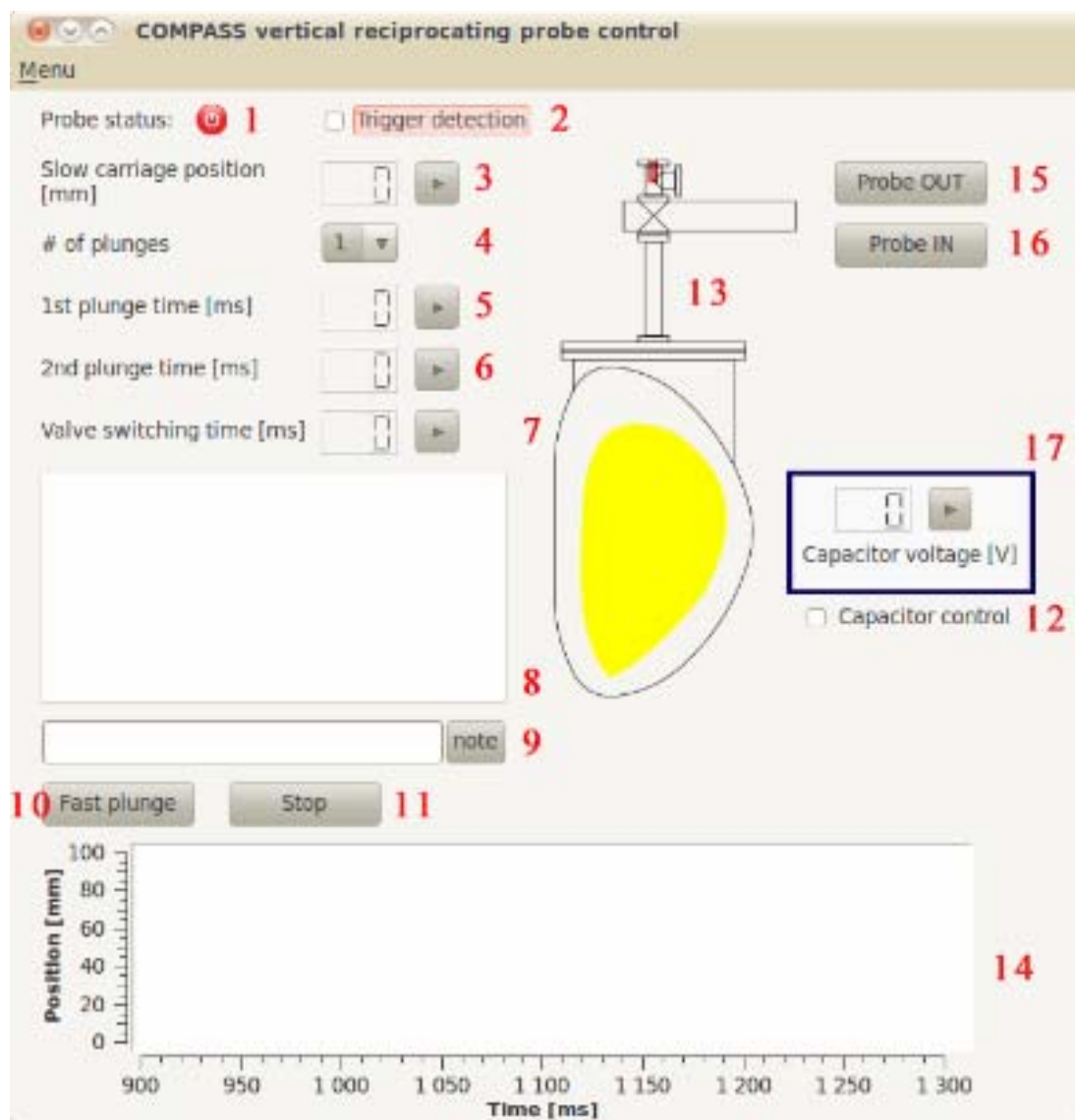
4.4.3 Práce s programem

Prostřednictvím 2 obdobných programů v jazyce Python v kombinaci s PyQt běžících na serveru „thermoc“ lze provádět veškeré ovládání horizontální resp. vertikální reciproké sondy tokamaku Compass. Programy navíc umožňují uložit soubor s aktuálním nastavením dané sondy pro případ pozdějšího použití stejného nastavení. Soubor s nastavením lze následně kdykoli snadno načíst a sonda se automaticky uvede do požadovaného stavu. Mimo to programy zaznamenávají do textového souboru jakýsi „logbook“ práce sond (změny nastavení, poloha sondy, detekce externího triggeru, provedení měření/reciprokého pohybu atd.). Podle data a času tak není problém dohledat např. nastavení sondy při některém z měření. Do samostatných souborů se též zaznamenává časový průběh každého reciprokého pohybu (poloha hlavice sondy v čase).

Grafické uživatelské rozhraní softwaru horizontální sondy je znázorněno na obrázku 4.2, vertikální sondy pak na obrázku 4.3.



Obrázek 4.2: Grafické uživatelské rozhraní softwaru horizontální sondy běžící na serveru thermoc.



Obrázek 4.3: Grafické uživatelské rozhraní softwaru vertikální sondy běžící na serveru thermoc.

Vysvětlivky k obrázkům 4.2 a 4.3:

1. Kontrolka navázání komunikace se sondou (mikrokontrolérem dsPIC).
2. Zapnutí/vypnutí automatické detekce externího triggeru.
3. Aktuální poloha vozíku pomalého posuvu sondy a tlačítko pro vyvolání dialogového okna pro pomalý posuv na požadovanou pozici.
4. Výběr počtu reciprokých pohybů po obdržení triggeru.
5. Nastavená prodleva mezi triggerem a prvním reciprokým pohybem a tlačítko pro její změnu.
6. Nastavená prodleva mezi triggerem a druhým reciprokým pohybem a tlačítko pro její změnu.
7. Nastavení časů přepnutí pneumatického ventilu pro pohon rychlého reciprokého pohybu (nastavení „hloubky“ pohybu, dobrždění apod.).
8. Logbook.
9. Pole pro zadání vlastních poznámek do logbooku (např. číslo výstřelu apod.).
10. Ruční spuštění externího triggeru.
11. Zastavení akce (pomalého posuvu).
12. Zapnutí/vypnutí automatického připojení napájení hrotů sondy při reciprokém pohybu (měření I_{sat}).
13. Znázornění aktuální polohy sondy vůči komoře tokamaku.
14. Časový průběh polohy hlavice sondy při posledním reciprokém pohybu.
15. Pomalé zasunutí vertikální sondy.
16. Pomalé vysunutí vertikální sondy.
17. Aktuální napětí kondenzátoru pro napájení hrotů sondy a tlačítko pro jeho změnu.

Menu umožňuje uložení aktuálního nastavení sondy, příp. načtení dříve uloženého nastavení a ukončení programu (klávesová zkratka Ctrl + Q).

4.5 Komunikační protokol

Veškerá komunikace mezi uživatelským ovládacím softwarem s grafickým rozhraním na serveru thermoc a mikrokontrolérem dsPIC probíhá formou zpráv s pevně daným tvarem – viz níže. dsPIC standardně pouze odpovídá na dotazy GUI – výjimkou je zpráva o detekování externího triggeru a následné zprávy o průběhu rychlého reciprokého pohybu.

Při sestavování protokolu jsem se snažil zachovat logiku komunikačního protokolu Tiaga Valeriana pro vakuový systém tokamaku Compass [7].

4.5.1 Formát zprávy

Zpráva se skládá z operátoru (1B), dat (libovolná délka), kontrolního součtu (3B) a ukončovacího znaku 0x0D (1B). Pokud se GUI pouze dotazuje na aktuální nastavení, zasílá zprávu bez dat – dsPIC následně odpovídá zprávou se stejným operátorem a vloženými daty s nastavením. Chce-li uživatel nastavení zadat (změnit), odesílá GUI zprávu včetně dat – dsPIC opět odpovídá a jako data přidává změněné nastavení (GUI tak může ověřit, zda bylo možné nastavení skutečně změnit).

OP	DATA (nepovinné)	CHECKSUM	(cr)
1byte	variabilní délka	3byty	1byte

OP – jedinečný jednoznakový operátor přiřazený dané události (např. nastavení času přepnutí některého ventilu) – „a“ až „z“ tj. ascii 97 až 122.

DATA – libovolně dlouhý číselný údaj (omezení dané velikostí bufferu dsPIC). Např. hodnota 123 je odeslána jako sekvence 3 bytů „1“, „2“ a „3“ (ascii 49, 50 a 51)

CHECKSUM – kontrolní součet operátoru a dat – 3 byty představující zbytek po dělení součtu ascii hodnot všech předchozích bytů 256.

(cr) – ukončovací znak „carriage return“ – ascii hodnota 13 (0x0D).

Příklad dotazu GUI na nastavení detekce triggeru:

a	0	9	7	(cr)	ascii:	97	48	57	55	13
---	---	---	---	------	--------	----	----	----	----	----

Příklad odpovědi dsPIC – detekce triggeru zapnuta (=1):

a	1	1	4	6	(cr)	ascii:	97	48	49	52	54	13
---	---	---	---	---	------	--------	----	----	----	----	----	----

4.5.2 Přehled operátorů

značení v kódu programů	příslušný znak	ascii
▪ OP_TRIGGER_ON_OFF	a	97
<i>Zapnutí/vypnutí detekce externího triggeru.</i>		
Data: 0 = detekce vypnuta, 1 = detekce zapnuta		
▪ OP_TRIGGER	b	98
<i>Serverem používáno pro vyvolání triggeru. dsPIC tímto potvrzuje detekování triggeru.</i>		
Bez dat.		
▪ OP_SLOW_CARRIAGE_POSITION	c	99
<i>Pozice (vozíku) pomalého posuvu.</i>		
Data: horizontální sonda 0 – 610 (mm), vertikální sonda 0 – 120 (mm)		
▪ OP_BAD_SLOW_CARRIAGE_POSITION	d	100
<i>Pomalý posuv v krajní poloze. Chybová hláška dsPIC horizontální sondy.</i>		
Bez dat.		
▪ OP_SLOW_CARRIAGE_MOVING	e	101
<i>Aktuální pozice pomalého posuvu udávaná dsPICem během pohybu.</i>		
Data: horizontální sonda 0 – 610 (mm), vertikální sonda 0 – 120 (mm)		
▪ OP_NUMBER_OF_PLUNGES	f	102
<i>Nastavení počtu reciprokých pohybů.</i>		
Data: 1 - 2		
▪ OP_1_PLUNGE	g	103
<i>Čekací čas mezi triggerem a prvním reciprokým pohybem.</i>		
Data: 0 – 999 (ms)		
▪ OP_2_PLUNGE	h	104
<i>Čekací čas mezi triggerem a druhým reciprokým pohybem.</i>		
Data: 0 – 999 (ms)		
▪ OP_VALVE_SWITCHING_TIME	i	105
<i>Délka otevření pneumatického ventilu pro pohon rychlého reciprokého pohybu.</i>		

Data: 0-999 (ms)

- **OP_FAST_MOVE** **j** **106**

Pozice rychlého pohybu v čase.

Data: h.s. čas*1000 (ms) + poloha (0.1mm), v.s. čas*1000 (ms) + poloha (mm)

- **OP_BAD_POSITION** **k** **107**

Nevhodná pozice pomalého vozíku pro reciproký pohyb (ochrana proti vykonání reciprokého pohybu mimo komoru tokamaku). Chybová hláška dsPIC.

Bez dat.

- **OP_FAST_MOVE_END** **l** **108**

Oznámení ukončení reciprokého pohybu. Hláška dsPIC.

Data: 0 = pohyb selhal, 1 = pohyb v pořádku

- **OP_STOP** **m** **109**

Zastavení akce (pomalého posuvu).

Bez dat.

- **OP_CAPACITOR** **n** **110**

Kondenzátor připojen/odpojen. Hláška dsPIC vertikální sondy.

Data: 0 = kondenzátor odpojen, 1 = kondenzátor připojen

- **OP_CAPACITOR_CONTROL** **o** **111**

Zapnutí/vypnutí automatického připojování napájecího kondenzátoru.

Data: 0 = vypnuto, 1 = zapnuto

- **OP_CAPACITOR_VOLTAGE** **p** **112**

Napětí napájecího kondenzátoru.

Data: 0 – 150 (V)

- **OP_CAPACITOR_CHARGING** **q** **113**

Napětí kondenzátoru udávané dsPICem vertikální sondy během nabíjení/vybíjení.

Data: 0 – 150 (V)

- **OP_CARRIAGE_PLUNGE** **r** **114**

Pomalé zasunutí/vysunutí vertikální sondy.

Data: 0 = vysunuto, 1 = zasunuto

- **OP_VALVE_SWITCHING_TIME_1** **t** **116**

Čas uzavření hnacího ventilu (kvůli brždění zpětného rychlého pohybu či jeho tvarování).

Data: 0 – 999 (ms)

- **OP_VALVE_SWITCHING_TIME_2** **u** **117**
Čas opětovného otevření hnacího ventilu pro zpětný rychlý pohyb (tvarování pohybu).

Data: 0 – 999 (ms)

- **OP_BAD_CHECKSUM** **y** **121**
Chybný kontrolní součet zprávy.

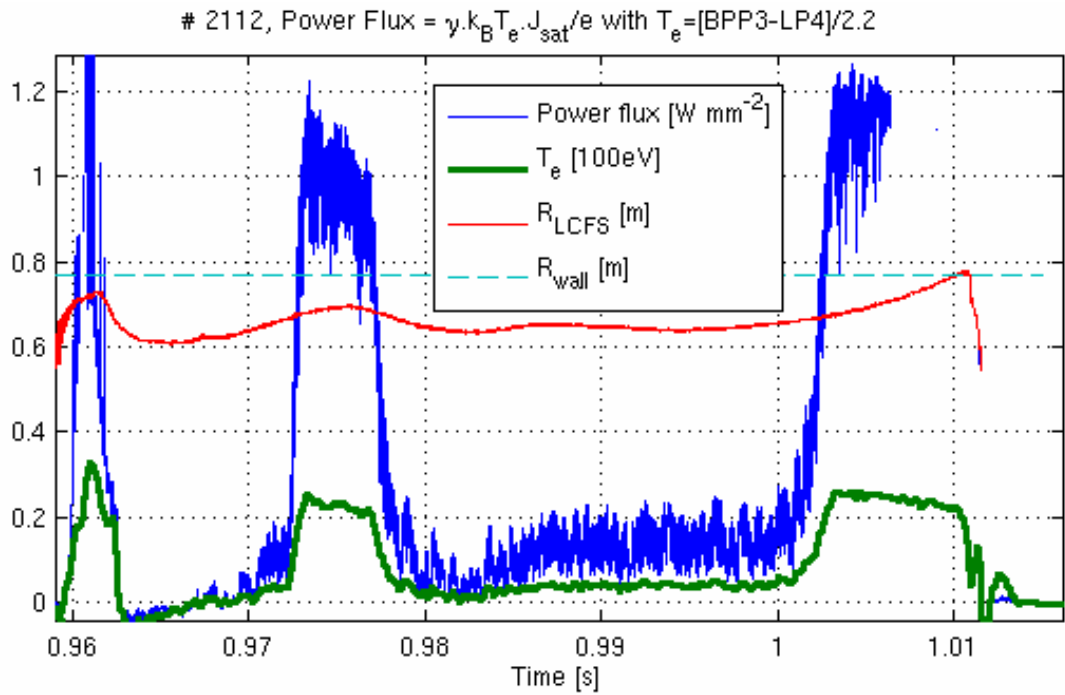
Data: původní zpráva

- **OP_BAD_MESSAGE_FORMAT** **z** **122**
Zpráva ve špatném formátu (délka, operátor).

Data: původní zpráva

4.6 První data

V rámci letní školy SUMTRAIC 2011 byla horizontální sondou naměřena první experimentální data. Vzhledem ke krátké době existence plazmatu během současných výbojů na tokamaku Compass nebyl využit reciproký pohyb a sonda byla umístěna zároveň se stěnou komory tokamaku. Již z těchto prvních dat jsme se pokusili stanovit dle vztahu 2.14 hustotu tepelného toku plazmatu. Vzhledem k nepříliš dobré stabilizaci polohy plazmatu lze z naměřených dat vyčíst i jakýsi radiální profil, jelikož plazma se vůči sondě pohybuje. Výsledky měření shrnuje obrázek 4.4. Měření však bude třeba důkladně zopakovat a ověřit důvěryhodnost dat (vzhledem k různým nestandardním zapojením elektroniky sběru dat atd. byla nyní použitelná data z jediného výstřelu).



Obrázek 4.4: První „testovací“ měření toku energie na stěny tokamaku Compass. Z obrázku je dobře patrné zvyšování tepelného toku při přiblížení plazmatu k sondě umístěné přibližně zároveň se stěnou. Měření elektronové teploty bylo provedeno porovnáním signálů Langmuirovy a ballpen sondy.

5 Plány do budoucna

5.1 Zjednodušení ovládání reciprokého pohybu

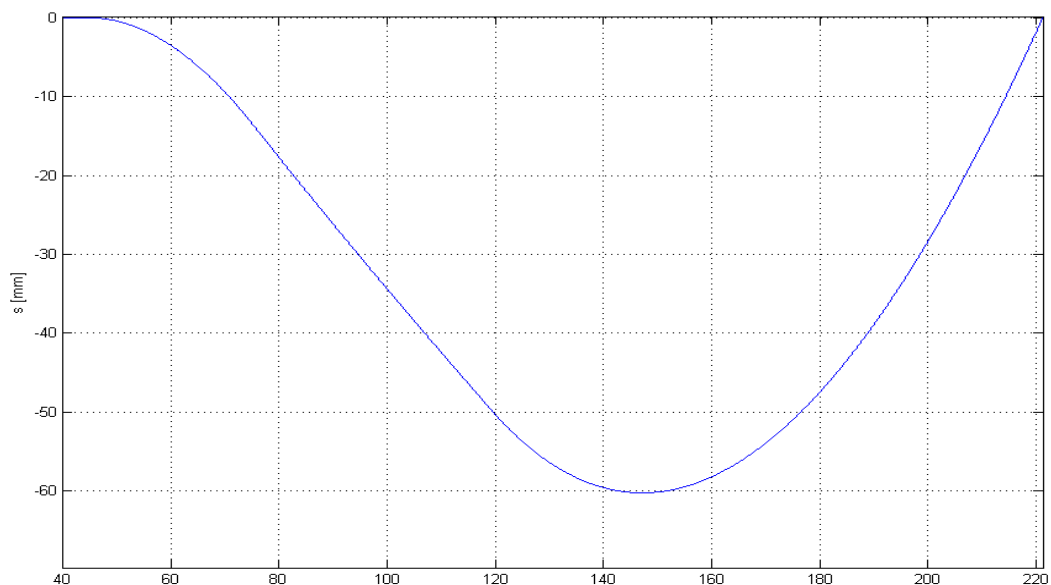
Již během testování reinstalovaných reciprokých sond se objevilo několik tipů na další vylepšení. V následujícím období bych tedy rád např. doplnil grafické uživatelské rozhraní ovládacího softwaru o simulaci průběhu reciprokého pohybu dle zadaných nastavení přepínání ventilů – tzn. software by měl být schopen ještě před samotným měřením podle zadaných časů přepínání ventilu vykreslit očekávanou časovou závislost polohy hlavice sondy během rychlého pohybu. Následně bude možné uvažovat také o možnosti nechat uživatele zadávat pouze „hloubku“ reciprokého pohybu – nastavení časů by si již software dopočítal sám. K tomu bude ale třeba důkladně proměřit zpoždění ventilu, „mrtvou dobu“ při jeho přepínání (kdy je zhruba vyrovnaný tlak na obou výstupech) atd.

5.2 Zefektivnění reciprokého pohybu

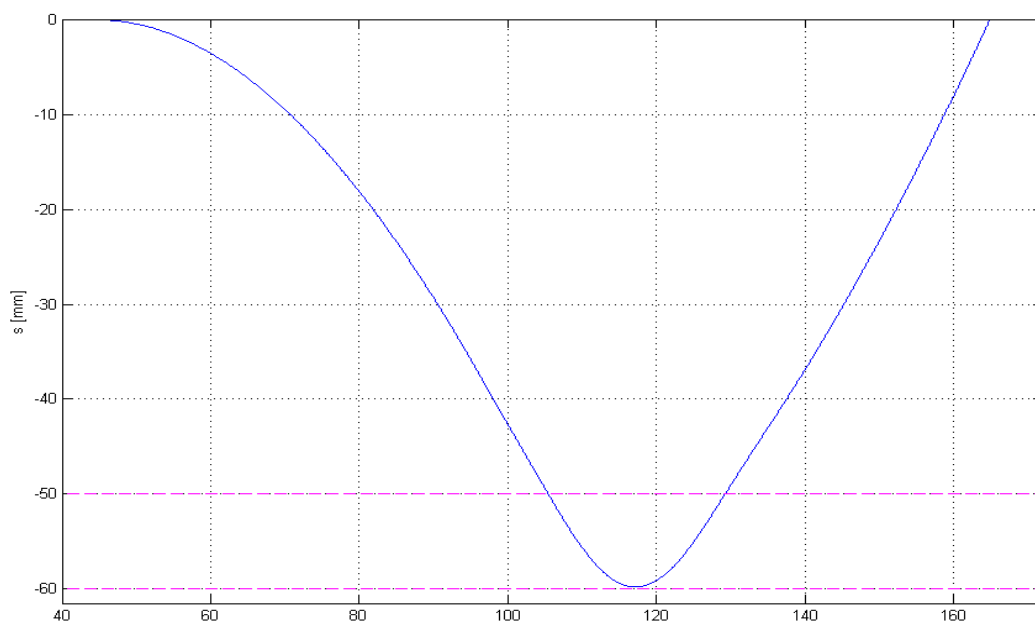
V současné době je reciproký pohyb ve všech svých fázích poháněn stlačeným vzduchem (příp. heliem či jiným plynem). I pokud pomineme „mrtvou dobu“ při přepínání ventilu z pohonu na brzdění pohybu atd., je principiálně možné zrychlovat pohyb maximálně v první polovině délky pohonného pístu (jednoho směru reciprokého pohybu – tj. u horizontální sondy 3cm), následně je nutné přepnout ventil a začít brzdit, neboť síla pohonu je stejná jako síla brzdící (neuvažujeme-li tření a vliv sníženého tlaku uvnitř sondy). Při tlaku 5 bar stlačeného vzduchu tak v praxi u horizontální sondy dosáhneme zrychlení $\sim 3g$. Při tomto zrychlení setrvá hlavice sondy v oblasti 1cm od konce reciprokého pohybu cca 56ms – viz obrázek 5.1.

Jedním z možných vylepšení (způsobů jak zrychlit obrátku reciprokého pohybu – tj. zvýšit zrychlení) je zvětšit brzdnou sílu např. přidáním pružiny na konci reciprokého pohybu. V takovém případě by bylo možné urychlovat sondu na delší vzdálenosti – zkrátit by se tak i celkový čas pohybu. Z provedených simulací vyplývá, že např. přidáním 1cm dlouhé pružiny o tuhosti $8 \cdot 10^5 \text{ N.m}^{-1}$ docílíme

zrychlení $\sim 17g$ a čas pohybu sondy ve vzdálenosti 1cm od konce reciprokého pohybu se zkrátí na cca 24ms – viz obrázek 5.2.



Obrázek 5.1: Stávající časová závislost polohy horizontální sondy při rec. pohybu.



Obrázek 5.2: Časová závislost polohy horizontální sondy při rec. pohybu s přidáním pružiny (oblast působení pružiny naznačena přerušovanou čarou).

5.3 Hlavičky pro hluboký zásun

Další z plánovaných inovací je vytvoření hlavičky umožňující měření hlouběji v plazmatu. Možností jak toho docílit je několik: jedna z variant počítá s uchycením

Langmuirových hrotů v hlavici sondy na pružinku – při obrátce hlavičky sondy během reciprokého pohybu by tak hrot samostatně „překmitl“ ještě o něco hlouběji do plazmatu. Hlavní obtíží je správná volba tuhosti pružiny a mechanické upevnění grafitového hrotu k pružině.

Další koncepce počítá s využitím magnetického pole tokamaku k roztočení vodivého kotoučku, který zároveň slouží jako Langmuirova sonda. Díky roztočení kotoučku se tepelný tok plazmatu rozloží do většího objemu. Náročná je zde především mechanická konstrukce miniaturních součástek a nutnost elektrického kontaktu s otočným kotoučem.

Standardní metodou zvýšení tepelné odolnosti hlavičky sondy je pak volba materiálů s vyšší tepelnou kapacitou, resp. tepelnou vodivostí (kvůli odvodu tepla do většího objemu materiálu). Jako slibné se ukazují nové materiály na bázi uhlíku - ať již ve formě různých grafitových vrstev a kompozitů či diamantu nanášeného v tenké vrstvě. Překážkou je zde především vysoká cena, nedostupnost některých materiálů kvůli vojenskému utajení vývoje či obtížnost nanášení materiálu na potřebný podklad.

6 Závěr

Během akademického roku 2010/11 se i díky mému přispění v rámci tohoto výzkumného úkolu podařilo udělat značný posun v provozu reciprokých sond tokamaku Compass. Zkonstruované softwarové i elektronické komponenty ovládání sond byly plně otestovány (alespoň v případě horizontální sondy) a jejich použití je oproti stavu před rokem daleko jednodušší a flexibilnější. Na obou sondách již proběhla měření, i tak ale ještě bude třeba vyladit některé detaily ovládání či sběru dat tak, jak se úpravy postupně ukazují jako vhodné. Jistě velice zajímavé budou pokusy o vylepšení sond pro potřeby hlubšího zanoření do SOL resp. separatrix.

Pro mě osobně byla práce na výzkumném úkolu přínosem v podobě rozšíření znalostí a dovedností v oblasti tvorby GUI, administrace Unixových systémů, bližšího seznámení se s problematikou „radial particle flux“, ale i v podobě navázání dalších kontaktů a spolupráce v rámci pracoviště ÚFP AV ČR oddělení tokamak.

Seznam literatury

- [1] Nuclear Fusion 39, 2391 (1999)
- [2] J.P. Gunn, *oral presentation at EFDA TTG + EU-US TTF Meeting*. Cordoba, Spain, 2010.
- [3] Vondráček P. *Zprovoznění návratové sondy na tokamaku Compass*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, katedra fyziky, 2010. Vedoucí bakalářské práce Mgr. Jan Horáček, docteur és sciences.
- [4] Stangeby P. C. *The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices*. London: IOP Publishing Ltd, 2000. ISBN 0-7503-0559-2.
- [5] Marki J. et al. Sheath heat transmission factors on TCV. *Journal of Nuclear Materials* 363 365, 2007, s. 382 – 388.
- [6] Horáček J. *Measurement of edge electrostatic turbulence in the TCV tokamak plasma boundary* [online]. Switzerland: EPFL, 2006. PhD thesis No. 3524. [cit. 2009-01-07]. <<http://library.epfl.ch/theses/?nr=3524>>.
- [7] Tiago Valeriano *Protocol for control of vacuum embedded systém in Compass tokamak*. Nepublikováno. 2008
- [8] Hutchinson I. H. *Principles of Plasma Diagnostics*, Second Edition, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [9] Gunn J. et al, Edge Flow Measurement with Gunterstrup Probes. *Phys. Plasmas*, vol. 8, 2001, pp. 1995.
- [10] <http://qt.nokia.com/>
- [11] <http://www.riverbankcomputing.co.uk/software/pyqt/intro>
- [12] Švec J. *Létající cirkus - Python tutoriál* [online]. 2003 [cit. 2011-01-01]. <ii.info.cz/r/old/data/letajici_cirkus.pdf>.
- [13] Boedo J. A. et al. Fast scanning probe for tokamak plasmas. *Review of Scientific Instruments*. May 1998, vol. 69, no. 7, s. 2663–2670.

- [14] Chen Francis F. *Úvod do fyziky plazmatu*. Praha: Academia, 1984.
- [15] Atzeni S., Meyer-ter-Vehn J. *The Physics of Inertial Fusion* [online]. University of Oxford Press, 2004. ISBN 978-0-19-856264-1. Kapitola Nuclear fusion reactions. [cit. 2010-06-20]. <<http://www.oup.co.uk/pdf/0-19-856264-0.pdf>>.
- [16] *Atomové jádro* [online]. [cit. 2010-06-20] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Atomové_jádro>.
- [17] Microchip Technology Inc. *dsPIC30F3014/4013 Data Sheet*. 2007
- [18] Milivojević Z., Šaponjić D. *Programming dsPIC in C* [online]. [cit. 2010-06-10]. <<http://www.mikroe.com/eng/products/view/266/programming-dspic-mcu-in-c/>>.
- [19] J. Adámek et al. Ball-pen probe measurements in L-mode and H-mode on ASDEX Upgrade. *Contributions to Plasma Physics*. 2009
- [20] Stacey W. M. *Fusion Plasma Physic*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. ISBN-10 3-527-40586-0.
- [21] Wesson J. *Tokamaks*. 3rd edition. Oxford: Clarendon press, 2004. ISBN 0-19-8509227.
- [22] Mlynář J. O symetrii tokamaku. *Československý časopis pro fyziku*. 2009, roč. 59, č 4, s. 207-212.
- [23] ÚFP AV ČR. *Tokamak COMPASS* [online], [cit. 2010-06-10]. <<http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/comp>>.
- [24] Pánek R. *Introduction of the COMPASS tokamak*. Praha, srpen 2009. Úvodní přednáška letní školy SUMTRAIC 2009, nepublikováno.
- [25] Haskell H.W.S. *Vessel sector 10*. Culham: UKAEA Culham laboratory, 1988. Výkresová dokumentace tokamaku Compass, nepublikováno.
- [26] Výkresová dokumentace reciproké sondy na tokamaku TCV. Laussane Švýcarsko, nepublikováno.
- [27] Oost G.V. Probe Diagnostics for Plasma Edge Characterization. *Fusion Science and Technology*. March 2004, vol. 45, no. 2T, s. 391-398.

- [28] Hron M. *Turbulence plazmatu na tokamaku Castor* [online]. Praha: Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta, katedra elektroniky a vakuové fyziky, 2006. Vedoucí disertační práce RNDr. Jan Stöckel, CSc. [cit. 2010-06-20]. < http://golem.fjfi.cvut.cz/files/students/PhDs/HronM_Ths.pdf >.

Příloha 1: Schéma rozšiřující elektronické desky pro dsPIC vertikální sondy.

