

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Bakalářská práce

Zprovoznění návratové sondy na tokamaku Compass

Petr Vondráček

Vedoucí práce: Mgr. Jan Horáček, PhD

Studijní program: Fyzikální inženýrství

Studijní obor: Fyzika a technika termojaderné fúze

Praha 2010

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci 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 30.6.2010

Petr Vondráček

Poděkování

Děkuji všem, kteří jakýmkoli způsobem přispěli ke vzniku mé bakalářské práce! Doktoru Horáčkovi za vytrvalost i pohodový a přátelský přístup při vedení práce, Pavlovi Cahynovi za vydatnou pomoc v začátcích programování dsPIC, J. Strnadovi za neustálé půjčování nářadí, J. Vlčkovi za spolupráci v oblasti elektrotechniky i všem ostatním za cenné rady či mnohé drobnosti, bez kterých by práce byla daleko těžší...

Název práce: **Zprovoznění návratové sondy na tokamaku Compass**

Autor: Petr Vondráček

Obor: Fyzikální inženýrství

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Jan Horáček, PhD
Ústav fyziky plazmatu, v.v.i.
Za Slovankou 1782/3
182 00, Praha 8

Abstrakt: Hlavní náplní bakalářské práce byla především samotná, mnohdy ryze manuální, reinstalace reciprokových sond tokamaku Compass. Textová část práce zachycuje hlavní body této činnosti – od prvního seznámení se sondami, přes návrhy různých doplňkových komponent, testy jednotlivých částí, až po uvedení do provozu (alespoň co se ovládání týče). První dvě kapitoly navíc nabízejí stručný úvod do problematiky řízené termojaderné fúze a principu reciproké (Langmuirovy) sondy. Hlavní pozornost je ale v textu věnována ovládání jedné ze sond. Práce by měla sloužit i jako jakýsi manuál k jejímu ovládání a popis zapojení.

Klíčová slova: rychlá reciproká sonda, ovládání sond, Compass-D, Langmuirova sonda, diagnostika plazmatu.

Title: **Reinstallation of reciprocating probe on tokamak Compass**

Author: Petr Vondráček

Abstract: The main content of the bachelor's thesis was a practical work on reinstallation of the reciprocating probes for tokamak Compass. The text part takes down the main goals of this work - from the first teach-in, over design of many complementary parts, tests of single components, up to setting in motion. First two chapters contain a brief introduction to the thermonuclear fusion and the principle of the fast reciprocating (Langmuir) probe. The main part is a description of a probe control. This thesis is also a probe control manual and a memorandum of the connection.

Key words: fast reciprocating probe, probe control, Compass-D, Langmuir probe, plasma diagnostics.

Obsah

Obsah.....	6
Úvod.....	7
1 Termojaderná fúze	8
1.1 Fúzní reakce	8
1.2 Plazma	10
1.3 Základní stavba dnešních tokamaků	11
1.4 Tokamak Compass	13
1.5 Okraj plazmatu, stěnová vrstva	16
2 Reciproká sonda	19
2.1 Princip Langmuirovy sondy	19
2.2 Konstrukce a parametry reciprokých sond tokamaku Compass ...	20
3 Reinstalace sond, vlastní práce	25
3.1 Horizontální sonda	25
3.2 Vertikální sonda	26
3.3 Společná elektronika sond, sběr dat	26
3.4 Ovládání	27
3.5 Řídící software	29
4 Závěr	31
5 Kam dál	32
Seznam literatury.....	33
Seznam příloh.....	35

Úvod

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 dává slibné naděje 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.

Před nedávnou dobou byl v Praze uveden do provozu tokamak Compass. Hlavním tématem této bakalářské práce bylo zprovoznění tzv. „*návratové (reciproké) sondy*“ na tomto tokamaku.

1 Termojaderná fúze

1.1 Fúzní reakce

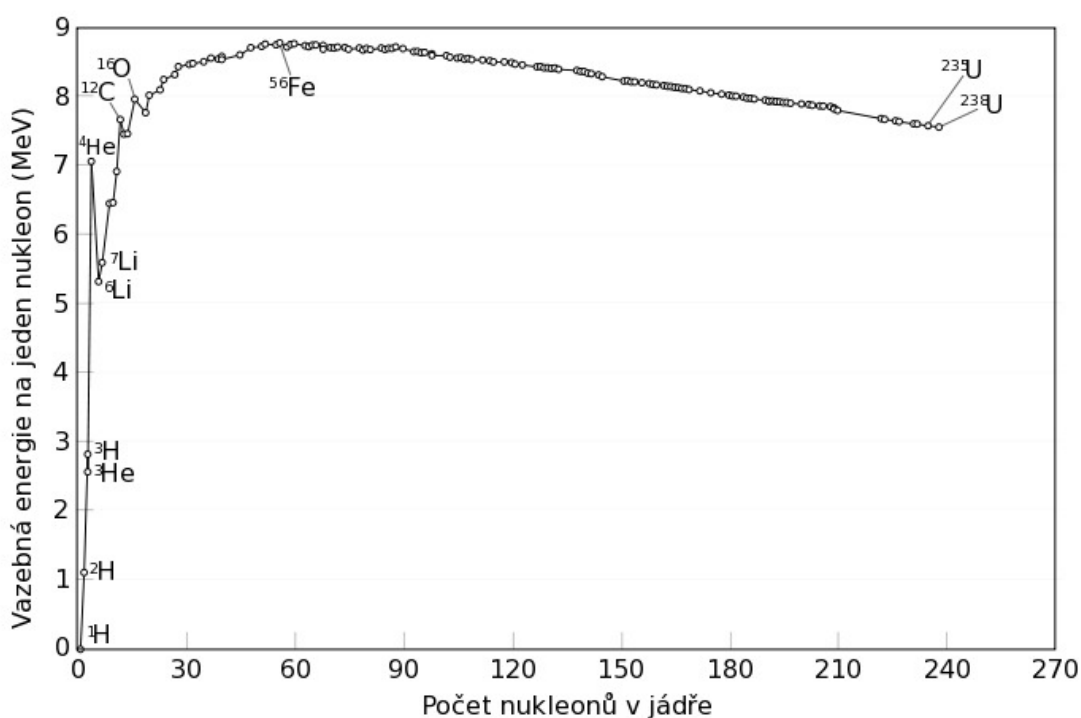
Každému atomovému jádru je možné přisoudit jistou *vazebnou energii* B odpovídající podle Einsteinova vztahu mezi hmotou a energií rozdílu součtu hmotností jednotlivých nesloučených nukleonů oproti hmotnosti jádra. Tuto vazebnou energii lze tedy vyjádřit jako

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

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) [9].

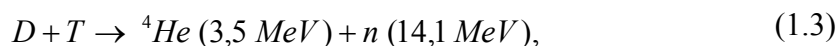


Obrázek 1.1: Závislost vazebné energie (na jeden nukleon) na počtu nukleonů v jádře. [8]

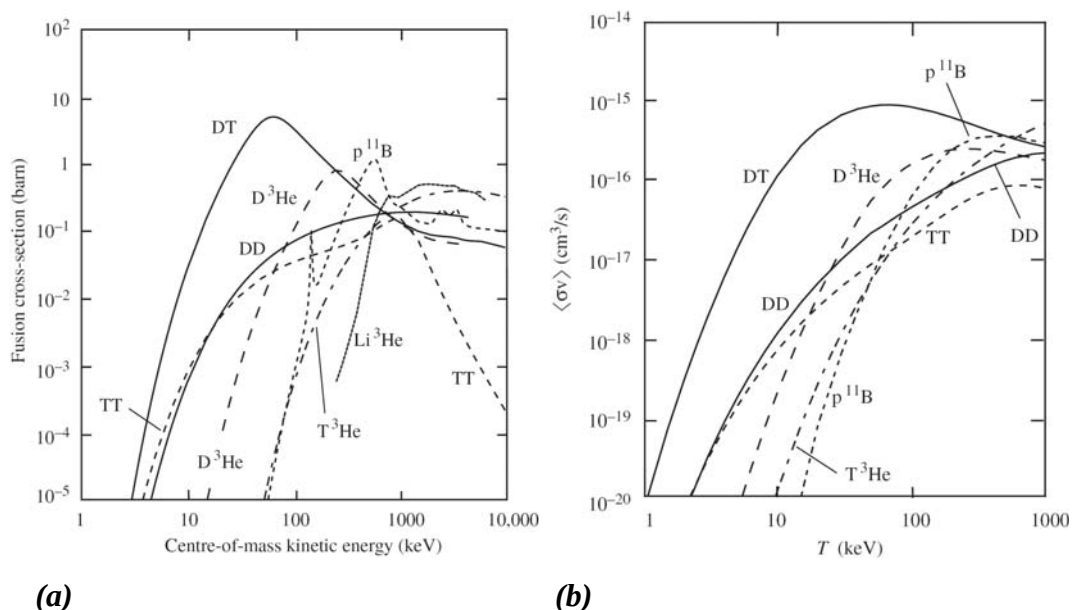
Jak je patrné z **Obrázku 1.1**, vazebná energie připadající na 1 nukleon je u různých prvků odlišná, čehož lze využít k získávání energie. A to buďto štěpením

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

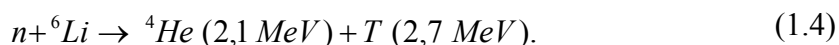


která má vyšší účinný průřez i energetický zisk než ostatní reakce. Lze ukázat, že ideální teplota pro udržování této reakce ve fúzních zařízeních je 10-20keV [13].



Obrázek 1.2: (a) Závislost účinných průřezů vybraných fúzních reakcí na energii slučovaných částic. (b) Závislost reaktivity vybraných fúzních reakcí na teplotě. [9]

Deuterium pro tuto reakci lze na Zemi získávat z mořské vody, kde tvoří cca 0,015% z celkového obsahu vodíku [2]. 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 frekvenci*) a frekvencí srážek v (*srážkovou frekvenci*)

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

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*“

$$\lambda_D \equiv \left(\frac{\varepsilon_0 K T_e}{n e^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.6)$$

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) $N_D \gg 1$ [2].

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 [2]. 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 stáčející se (helicitní) magnetické pole. 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

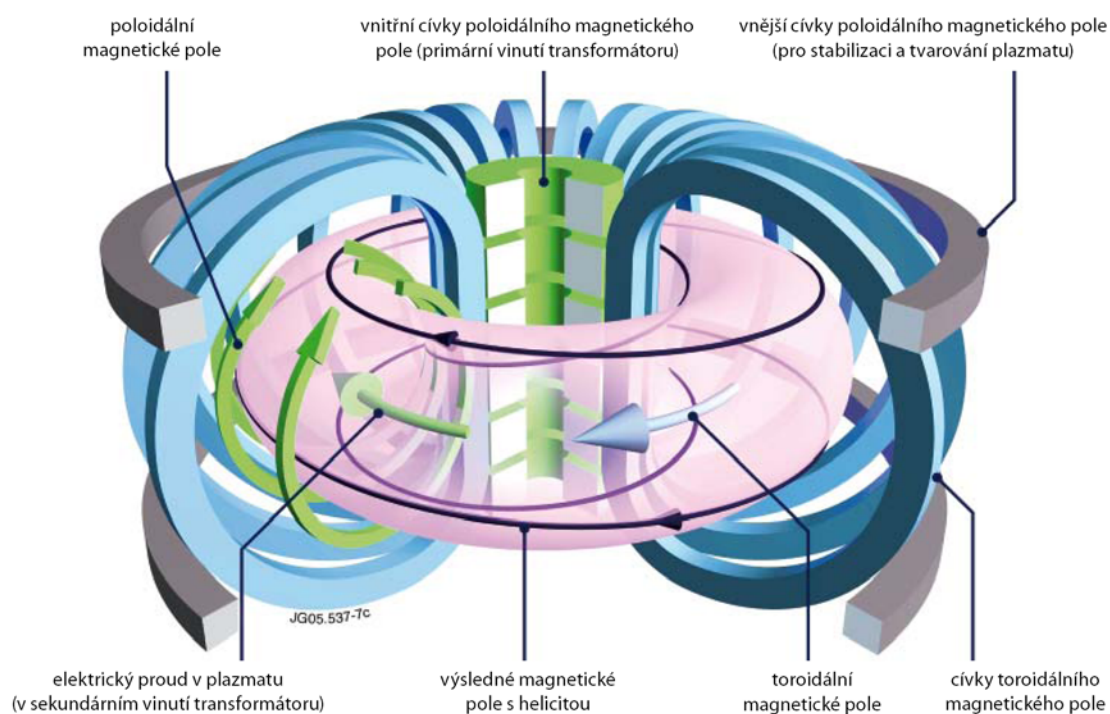
$$q = \frac{B_T}{R} \frac{r}{B_p}, \quad (1.8)$$

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, již se věnuje této bakalářské práce.



Obrázek 1.3: Principiální schéma tokamaku. [5]

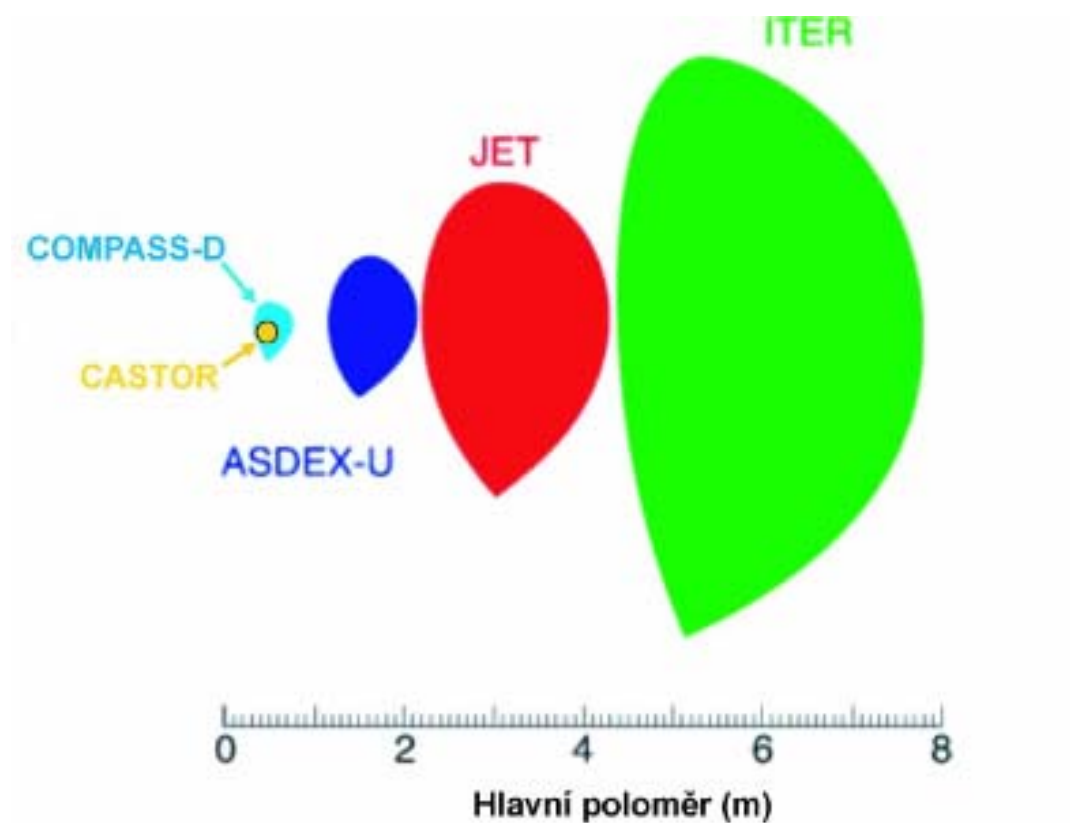
1.4 Tokamak Compass

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.

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 [14].

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 [20]. Nově vybudovaný je též systém sběru dat, většina diagnostik atd.



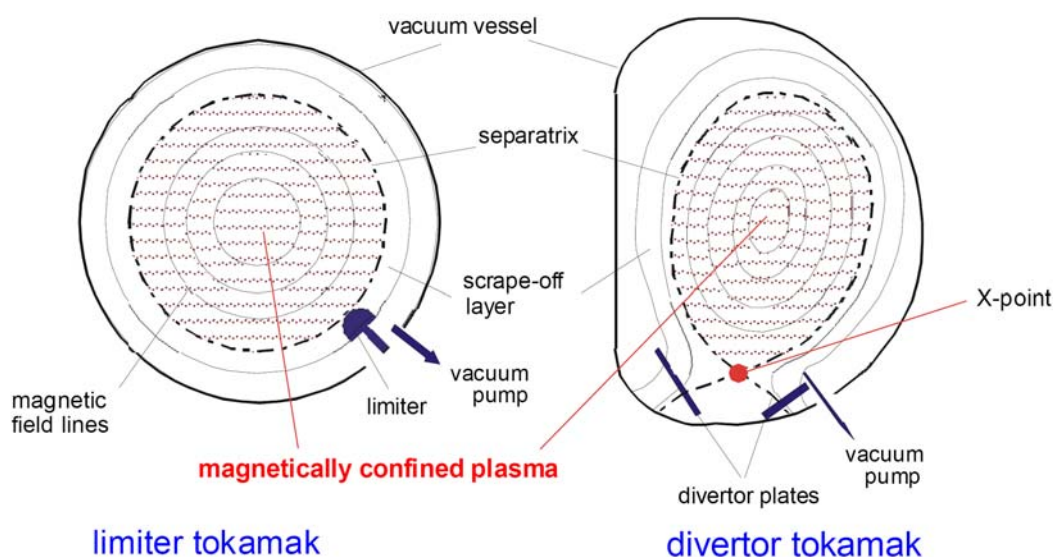
Obrázek 1.4: Srovnání velikosti komory Compassu-D s dalšími tokamaky. [2]

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. [3]

1.5 Okraj plazmatu, 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 vložením pevné překážky – *limiteru*, nebo vytvořením „*X-bodu*“ pomocí přidavného 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 1.5**. 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 1.5: Schématické vyobrazení poloidálního řezu komorou tokamaku se znázorněním magnetických povrchů v limiterové a divtorové konfiguraci. [19]

Vzhledem k vyšší pohyblivosti (teplotě, nižší hmotnosti) 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 1.6**. Potenciál se ustaví na takové hodnotě, aby se vyrovnal tok elektronů a iontů.

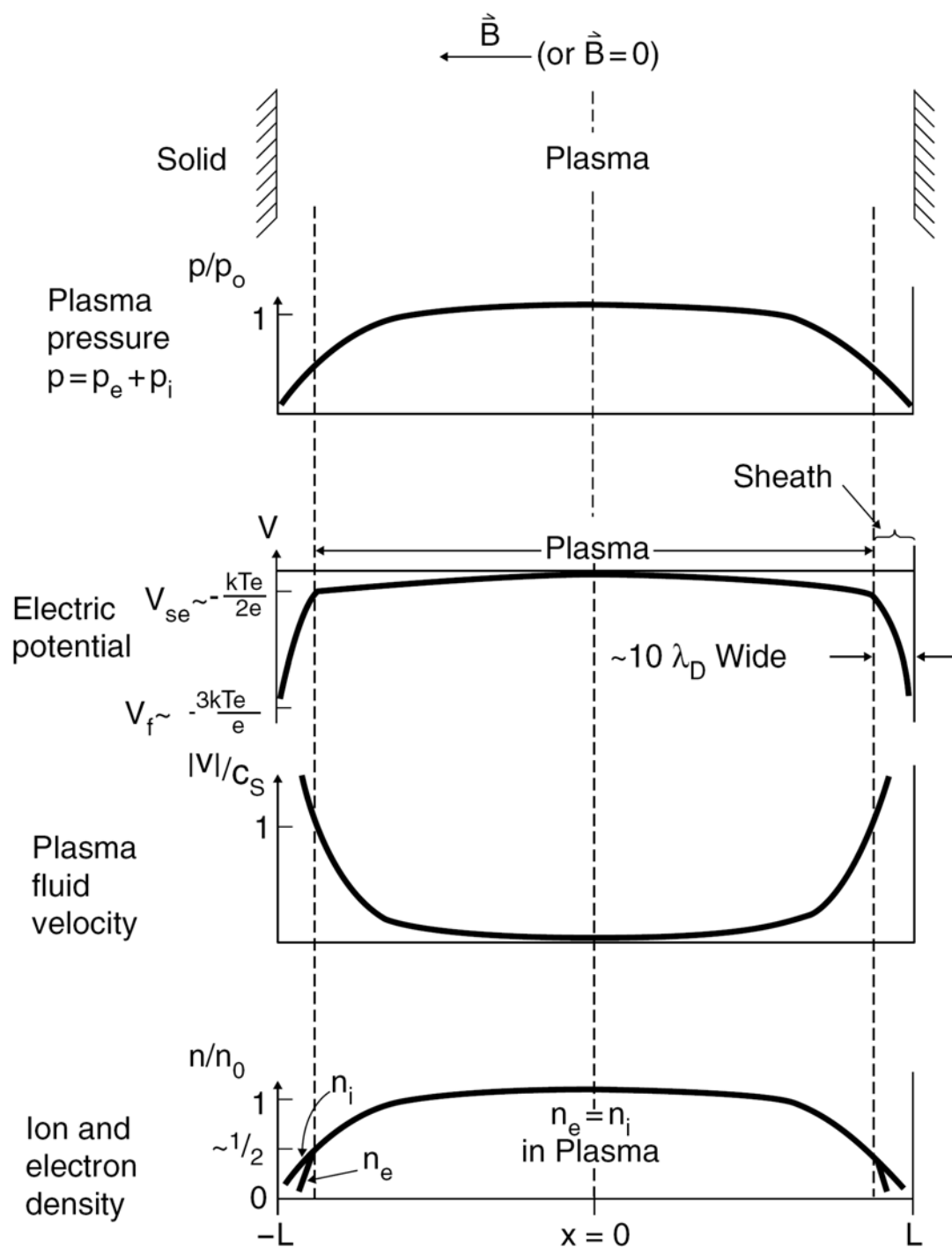
Lze ukázat, že ionty musí splňovat tzv. *Bohmovo kritérium*, které říká, že rychlost v_i iontů vstupujících do stěnové vrstvy musí být rovna alespoň akustické rychlosti c_s

$$v_i \geq c_s. \quad (1.9)$$

Pro akustickou rychlost platí

$$c_s = \sqrt{\frac{k_B(T_i + T_e)}{m_i}} \quad (1.10)$$

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



Obrázek 1.6: 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. [19]

2 Reciproká sonda

Jednou z hojně využívaných diagnostik na světových tokamacích je např. *reciproká (návratová) sonda*. Jde v podstatě o soubor Langmuirových sond, které jsou velice rychle zasunuty na okraj plazmatu a dříve než se teplem poškodí opět vysunuty ven. Sonda tudíž musí vydržet vysoké tepelné a částicové toky, zároveň však způsobovat pouze nízkou kontaminaci plazmatu nečistotami.

Standardně se reciproké sondy skládají ze 2 hlavních částí. První zajišťuje tzv. pomalý posuv, jehož rozsah je několik desítek cm až 1 m a je určen pro nastavení výchozí pozice hlavice sondy (s jednotlivými Langmuirovými sondami) před měřením. Druhá část umožňuje rychlý reciprokový pohyb v rozsahu několika centimetrů. Ten je aktivován až při měření a zajišťuje přiblížení hlavice k okraji plazmatu (většinou maximálně na separatrix) a rychlý návrat zpět do bezpečné vzdálenosti.

2.1 Princip Langmuirovy sondy

Langmuirova sonda je jednou z nejjednodušších diagnostik. Ve své nejběžnější podobě je tvořena malou elektrodou - válečkem (o průměru řádově 1mm) z grafitu nebo jiného materiálu schopného odolávat vysokým teplotám. Nepatrná velikost zaručuje dobré prostorové rozlišení, které ve spojení s dobrým časovým rozlišením dělá z Langmuirovy sondy mocný nástroj pro studium turbulentních procesů v okrajovém plazmatu.

Při vložení elektrody do plazmatu vznikne v jejím okolí stěnová vrstva (viz kap. 1.5) stejně jako okolo jakéhokoli jiného pevného materiálu, který je ve styku s plazmatem (např. limiter). Elektroda se nabije na tzv. *plovoucí potenciál* V_f , který je díky větší pohyblivosti (nižší hmotnosti) elektronů oproti iontům záporný ve srovnání s potenciálem plazmatu Φ . Fluktuaace plovoucího potenciálu lze za předpokladu, že se nemění elektronová teplota, ztotožnit s fluktuacemi potenciálu plazmatu.

Přivedeme-li na elektrodu (sondu) dostatečně velké záporné napětí (takové, aby odpudilo většinu přilétávajících elektronů), můžeme měřit tzv. *iontový nasycený proud* I_{sat} . Podobně jako v případě potenciálu odpovídají fluktuace iontového nasyceného proudu za předpokladu neměnné elektronové teploty fluktuacím hustoty plazmatu [21]. V magnetizovaném plazmatu platí pro iontový nasycený proud vztah

$$I_{sat} = n_e f e A \sqrt{\frac{k_B (T_e + T_i)}{m_i}}. \quad (2.1)$$

Výraz s odmocninou představuje iontozvukovou rychlost (c_s – viz výraz 1.10), T_e resp. T_i je elektronová resp. iontová teplota, m_i je hmotnost jednoho iontu, A je aktivní plocha sondy, na kterou dopadají ionty a faktor f popisuje změny hustoty vyvolané sondou [1] [11] [21]. V případě jiného než vodíkového plazmatu (s více než jednou ionizovanými ionty) by se ve výrazu 2.1, stejně jako ve vztahu pro iontozvukovou rychlost, objevil navíc stupeň ionizace.

Rozmítáním napětí V na elektrodě a měřením protékajícího proudu I získáme voltampérovou charakteristiku, pro kterou platí

$$I = I_{sat} \left(1 - \exp\left(-\frac{V - V_{fl}}{T_e}\right) \right) \quad (2.2)$$

[1]. Z voltampérové charakteristiky je možné určit jak iontový nasycený proud tak plovoucí potenciál, navíc lze ze vztahu 2.2 stanovit elektronovou teplotu.

Langmuirova sonda se používá v mnoha modifikacích – podobný princip využívá např. emisní či ball-pen sonda k měření potenciálu plazmatu, Machova a Gundestrupská sonda měří toky v plazmatu, tunelová resp. Katsumata sonda poskytuje měření teploty rychlých elektronů resp. pomalých iontů atd. [1].

2.2 Konstrukce a parametry reciprokových sond tokamaku Compass

V současné době jsou na pražský tokamak osazovány 2 reciproké sondy. Jedna bude pracovat v horizontální poloze a měřit 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.

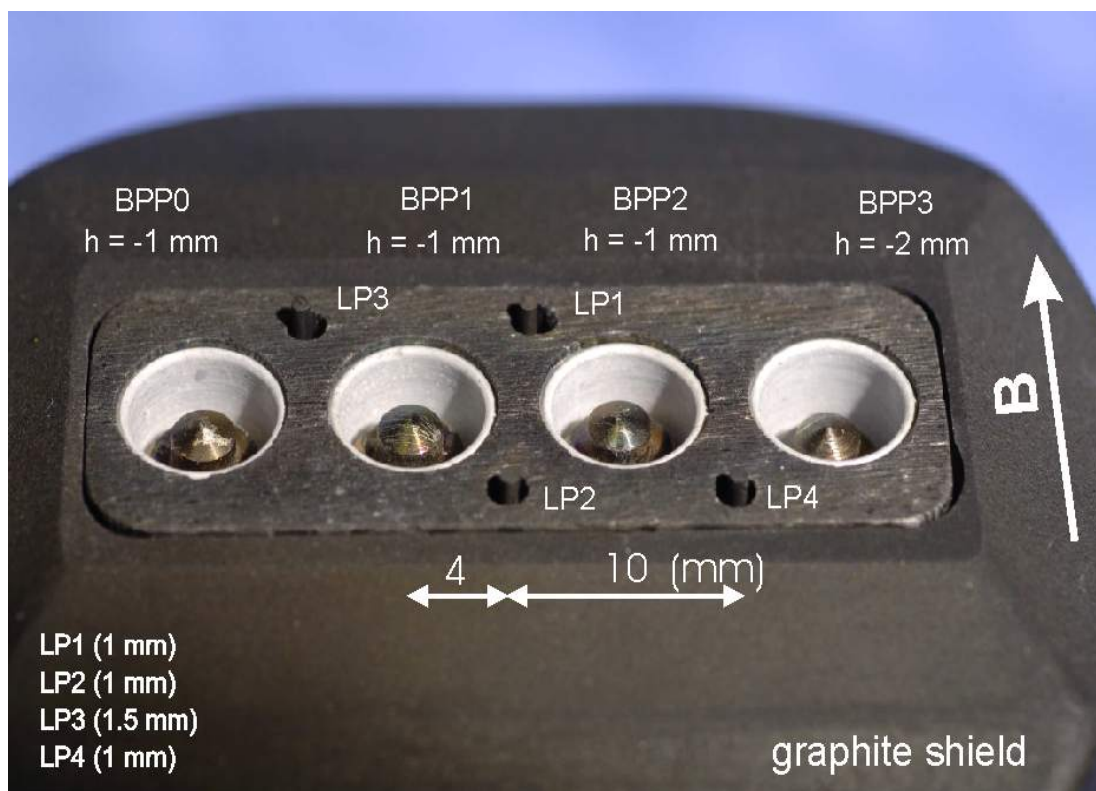
Druhá sonda bude připojena na jeden z horních portů tokamaku a měřit tedy bude v nejvrchnějších částech plazmatu. Tato sonda byla vyvinuta a zkonstruována výzkumnou skupinou na *University of California* v San Diegu v USA, řadu let byla úspěšně používána na tokamacích *TEXTOR* a *DIII-D*, s některými úpravami pak na *TCV* ve švýcarském Lausanne, odkud byla v roce 2009 převezena do ČR.

2.2.1 Horizontální sonda

Jako první byla osazena sonda pracující v horizontální poloze a to na jeden z kruhových portů jižní strany komory tokamaku. 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 600 mm, rychlého pak maximálně 60 mm. Tělo sondy ukrývá celkem 18 koaxiálních signálních vodičů, které je možno připojit k jednotlivým Langmuirovým pinům hlavice (příp. ball-pen sondám apod.). Jako první byla nainstalována hlavice J. Adámka osazená čtyřmi ball-pen sondami a čtyřmi Langmuirovými sondami. Popis hlavice lze najít např. ve článku [10]. Celý mechanismus je umístěn na masivním kovovém stole, zajišťujícím dostatečnou stabilitu a znemožňujícím jakékoli nežádoucí pohyby či vibrace sondy při rychlém pohybu během měření.

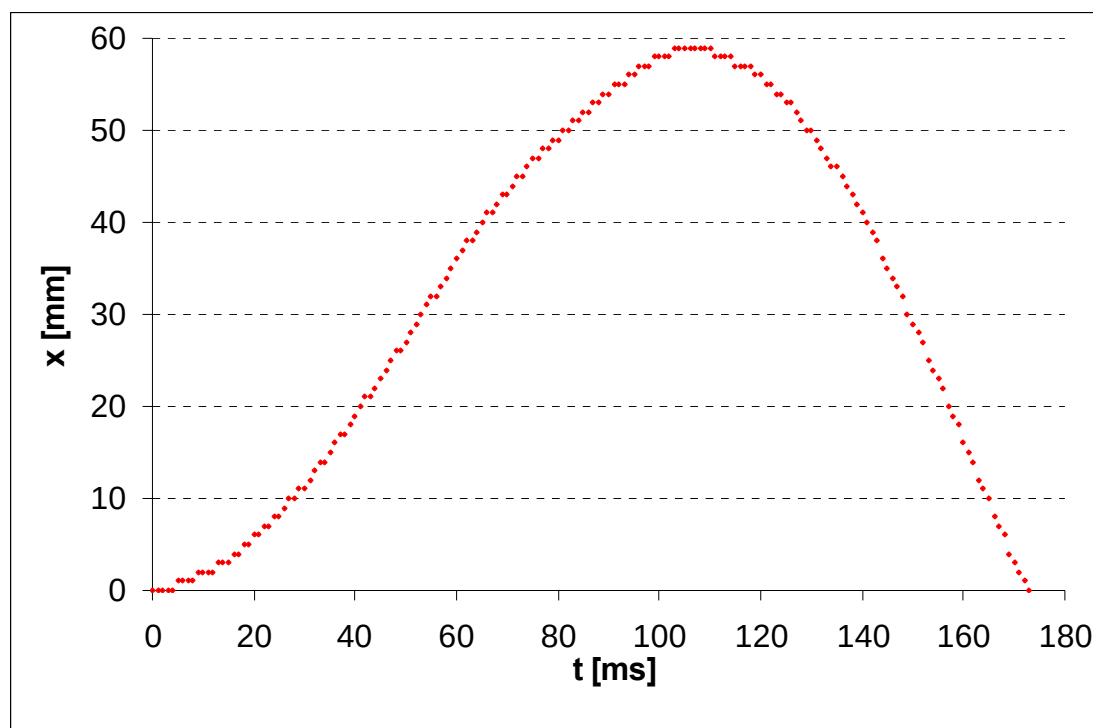
Tlak vzduchu přiváděného k sondě z centrálního rozvodu tokamaku je řízen vlastním redukčním ventilem. Vzhledem k technické konstrukci zařízení a bezpečnosti je používán tlak 5 bar, při kterém rychlý pohyb sondy dosahuje průměrné rychlosti $|v| = 0,7 \text{ m.s}^{-1}$ a maximálního zrychlení $|a| < 35 \text{ m.s}^{-2}$. Celý pohyb trvá $\sim 170 \text{ ms}$.¹ Do budoucna se pro zlepšení parametrů rychlého pohybu počítá s používáním stlačeného hélia namísto vzduchu.

¹ Měřeno bez vyčerpání sondy.



Obrázek 2.1: Hlavice horizontální sondy. Na obrázku jsou vidět 4 ball-pen sondy a 4 grafitové piny - Langmuirovy sondy. [10]

Řízení sondy zajišťuje mikroprocesor dsPIC30F4013 komunikující pomocí optického sériového rozhraní s linuxovým serverem, z něhož lze mikroprocesoru zadávat jednotlivé řídicí příkazy. Ovládací software provádí otevírání pneumatických ventilů, snímání polohy pomalého a rychlého posuvu, detekci triggeru a v nastaveném odstupu provedení reciprokého pohybu, hlídání dosažení krajní polohy pomalého posuvu či polohy hlavního gate ventilu mezi sondou a komorou tokamaku, nastavení bodu obratu rychlého reciprokého pohybu, stejně tak jako řízení nabíjení a vybíjení kondenzátoru sloužícího jako zdroj napětí zvolených Langmuirových sond, jeho připojování ve zvoleném čase během měření atd.

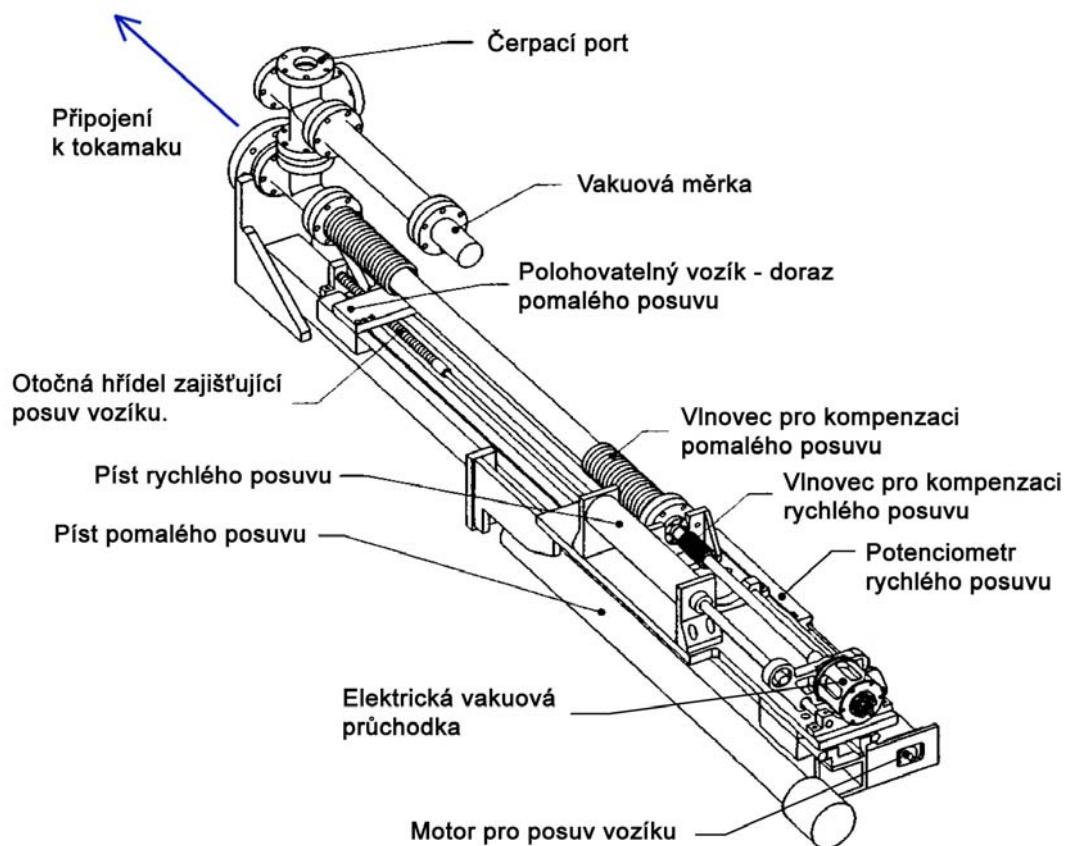


Obrázek 2.2: Test rychlého reciprokého pohybu s nastavením přepnutí pneumatického ventilu po 60ms pohybu.

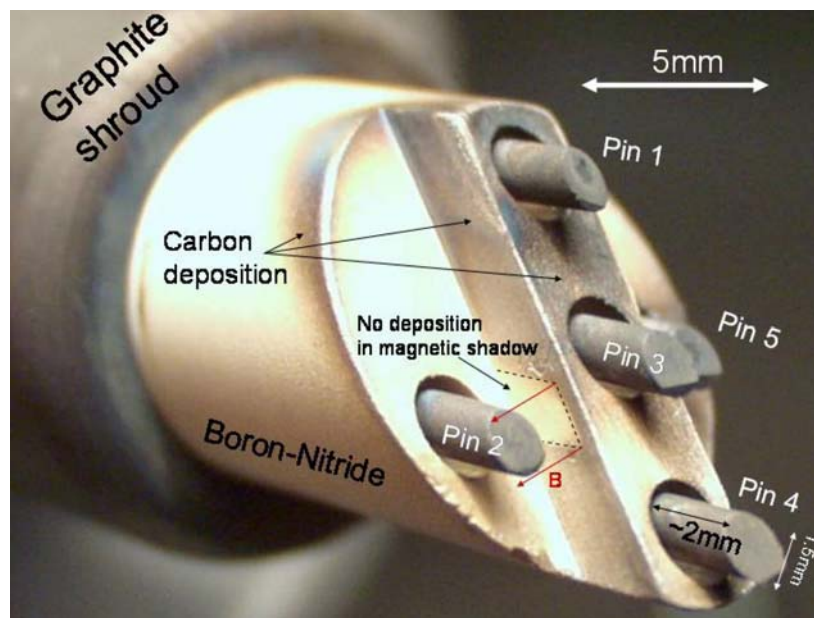
2.2.2 Vertikální sonda

Druhá reciproká sonda tokamaku Compass je umístěna ve vertikální poloze na horní oválný port v jihozápadní části komory. 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 hélium. V místě dřívějšího působiště sondy, ve švýcarském Lausanne, bylo používáno helium pod tlakem 4 bar, při jehož použití reciproký pohyb dosahoval průměrné rychlosti $|v| = 1 \text{ m.s}^{-1}$ s maximálním zrychlením $|a| < 40 \text{ m.s}^{-2} \approx 4g$. Celý pohyb trval zhruba $\sim 300 \text{ ms}$ [1]. Tělem sondy je vedeno 5 koaxiálních signálních vodičů, maximální počet pinů hlavičky je tedy 5.



Obrázek 2.3: Náskres vertikální sondy. [4]



Obrázek 2.4: Jedna z hlavic vertikální sondy. Na obrázku je vidět 5 grafitových pinů - Langmuirových sond. [1]

3 Reinstalace sond, vlastní práce

Před uvedením sond do provozu bylo nutné provést řadu úprav, ověření funkčnosti jednotlivých komponent, návrhů a zkonstruování doplňkových dílů (vakuové části mezi sondami a tokamakem, podpůrné konstrukce), zvolit a zakoupit vhodné vakuové pumpy, vytvořit zcela nové ovládání a systém sběru dat atd.

Následující kapitola obsahuje popis samotné „fyzické“ práce při reinstalaci návratových sond na tokamaku Compass. Velkou část popisovaných prací jsem vykonával přímo já, příp. jsem u nich alespoň asistoval. Ostatní činnosti prováděla celá řada dalších pracovníků ÚFP AV ČR, kterým tímto děkuji za spolupráci, radu či zapůjčení vybavení.

3.1 Horizontální sonda

Podstatnou komplikací byla absence dostatečné dokumentace k anglické (v našem případě horizontální) sondě nebo alespoň její obtížná dohledatelnost. Prvním úkolem tedy bylo zmapování účelu jednotlivých částí, prozkoumání zapojení elektronických konektorů (pro několikere spínače hlídající koncovou polohu pomalého posuvu, pro potenciometry pomalého a rychlého posuvu atp.). Dále jsme proměřili přeslechy mezi stávajícími 11-ti koaxiálními signálními vodiči – výsledek byl uspokojivý, naindukovaný přeslech dosahoval řádově maximálně 1/1000 původního signálu. Vakuová průchodka s 15-ti konektory neznámého typu (rozdělená na 3 části po pěti konektorech) ukončující koaxiální kabely byla vyměněna za novou 19-ti pinovou, zároveň byla sonda rozšířena o 7 nových signálních kabelů a je jich tak nyní možno zapojit až 18.

Malé opravy (doplnění chybějících či výměna starých pneumatických hadiček) bylo nutné provést na pneumatickém motoru pomalého posuvu, který byl poté úspěšně otestován, prozatím bez automatického elektronického řízení. Rychlý posuv dosahoval při orientačním proměření (bez vyčerpání sondy) za tlaku stlačeného vzduchu 5 bar maximálně $1,3 \text{ m.s}^{-1}$ s průměrným zrychlením 14 m.s^{-2} (měření

provedeno pomocí osciloskopu připojeného k potenciometru snímajícímu polohu rychle se pohybující části sondy).

Na míru byl vyroben vakuový díl propojující sondu s komorou tokamaku sestávající z „kříže“ s okénkem a přírubou pro připojení vakuové pumpy, vespelu pro galvanické oddělení od komory a vlnovce zajišťujícího kompenzaci pohybů způsobených tepelnou roztažností při vypékání apod. Díky okénku by mělo být snadné provádět vizuální kontrolu stavu hlavice sondy (grafitových hrotů). Zároveň by se skrz okénko do budoucna měla pomocí tepelného záření vypékat hlavice.

Nezbytnou součástí je též podpůrná konstrukce v podobě stolu z hliníkových profilů s masivní ocelovou deskou, ke které je sonda napevno přidělána. Robustní konstrukce zabraňuje nežádoucím pohybům či vibracím sondy při měření, výsuvná kolečka však zároveň umožňují po odpojení od komory tokamaku sondu snadno přesunout mimo kobku v případě potřeby výměny hlavice apod.

3.2 Vertikální sonda

U vertikální sondy byla situace o něco snazší vzhledem k tomu, že s ní několik let pracoval vedoucí této bakalářské práce J. Horáček ve švýcarském Lausanne. Nicméně bylo třeba doplnit některé chybějící vakuové díly mezi sondu a tokamak – především díl s okénkem pro vizuální kontrolu hlavice, navrhnout mechanickou konstrukci pro upevnění sondy nad tokamak a napojit stávající elektroniku ovládání sondy na místní systém počítačového řízení.

Osazení sondy na komoru tokamaku včetně doplňkových vakuových dílů je znázorněno v **Příloze 2**. Ovládáním této sondy se zabýval Benoit Caylar a je řešeno podobným způsobem jako té horizontální – viz kapitola 3.4.

3.3 Společná elektronika sond, sběr dat

Další nepostradatelnou částí každé diagnostiky je sběr dat. Pro potřeby obou sond bylo nataženo z kobky tokamaku do místnosti centrálního sběru dat, kde jsou umístěny A/D převodníky a další technika, 13 osmi žilových stíněných kabelů

(každý délky cca 25m), které bylo třeba zakončit pomocí konektorů RJ-45, následně proměřit správnost zapojení atd.

Pro napájení jednotlivých Langmuirových sond, rozmítání napětí, ale i měření sledovaných veličin a jejich převod na napěťový signál v rozsahu 0 až 10 V (který je následně zpracováván zmiňovanými A/D převodníky) byla na ÚFP navržena speciální elektronika – viz **Příloha 4**.

Zvláštní pozornost bylo třeba věnovat uzemnění celého systému. Jednak aby nedošlo ke vzniku rušivých zemních smyček a aby nebylo porušeno oddělení komory tokamaku od všech ostatních zemí.

3.4 Ovládání

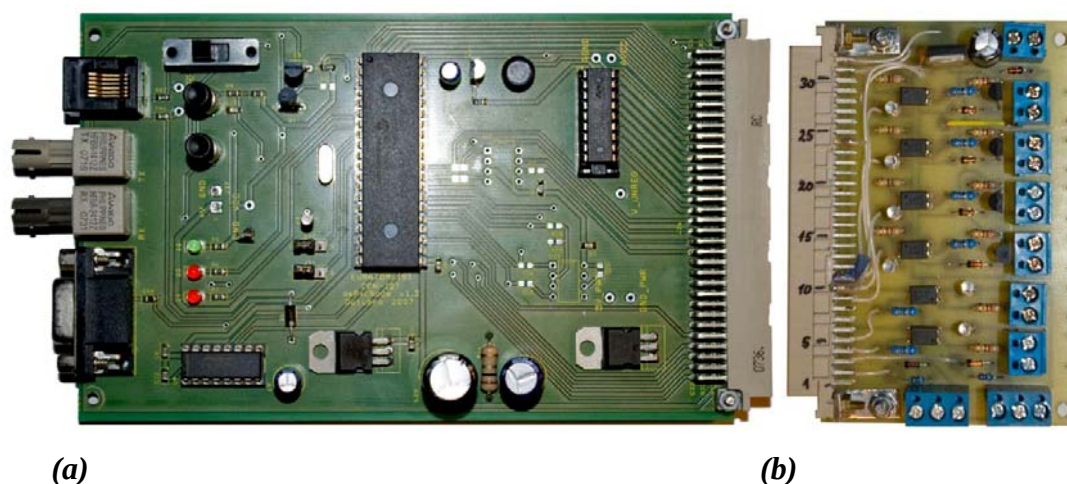
Ovládání obou sond je podobné, autor této práce měl na starosti především ovládání horizontální sondy, které je popsáno v následujícím textu.

Při provozu sondy je třeba řídit a kontrolovat následující části a činnosti: otevírání pneumatických ventilů, snímání polohy pomalého a rychlého posuvu, detekce triggeru a v nastaveném odstupu provedení reciprokého pohybu, hlídání dosažení krajní polohy pomalého posuvu či polohy hlavního gate ventilu mezi sondou a komorou tokamaku, nastavení bodu obratu rychlého reciprokého pohybu, stejně tak jako řízení nabíjení a vybíjení kondenzátoru sloužícího jako zdroj napětí zvolených Langmuirových sond, jeho připojování ve zvoleném čase během měření atd.

Toto všechno obstarává mikrokontrolér dsPIC30F4013 osazený do elektronické desky převzaté od týmu fúzního výzkumu v Portugalsku. Pro potřeby sondy byla na ÚFP navržena rozšiřující karta, která po připojení na 96-pinový konektor portugalské karty převádí její 5V signály na potřebné 24V (pro pneumatické ventily), zajišťuje napájení potenciometrů rychlého a pomalého posuvu i samotné desky mikroprocesoru a je osazena svorkovnicemi pro připojení vodičů všech ostatních signálů – viz **Obrázek 3.1** a **Příloha 3**.

Snímání polohy rychlého i pomalého posuvu je založeno na principu jednoduchého napěťového děliče, kdy je na potenciometr přivedeno konstantní

napětí 5V a A/D převodník mikroprocesoru snímá napětí na jezdcí. Ze znalosti délky dráhy potenciometru a hodnot napětí v krajních polohách mikrokontrolér jednoduše vypočítá polohu příslušnou danému napětí na jezdcí. Zadá-li tedy uživatel příkaz pro pomalý posun do požadované polohy, přepočítá procesor tuto polohu na odpovídající napětí, to porovná s aktuálním, otevře patřičný pneumatický ventil a periodicky snímá polohu až do dosažení té požadované, kdy opět ventil vypne. Při pohybu je samozřejmě hlídáno dosažení krajních poloh posuvu, kde je pohyb automaticky zastaven. To je „ošetřeno“ jednak omezením rozsahu hodnot, které může zadat uživatel, a jednak snímáním stavu spínačů umístěných na koncových částech posuvné dráhy.



Obrázek 3.1: (a) Portugalská deska osazená mikroprocesorem dsPIC30F4013, metalickým a optickým sériovým rozhraním atd. (b) Rozšiřující karta se vstupy (pro trigger a kontrolu dosažení krajní pozice pomalého posuvu) a 24V výstupy (pro pneumatické ventily a spínání napájecího kondenzátoru) zajišťující též napájení mikroprocesorové desky.

Rychlý pohyb je ovlivňován uživatelským nastavením doby, za kterou je přepnut pneumatický ventil z polohy zajišťující tlačení sondy směrem do tokamaku do polohy opačné - způsobující zprvu brždění a následně obrat směru pohybu a návrat sondy do klidové pozice (řádově desítky ms). Během reciprokého pohybu dsPIC přes optické sériové rozhraní automaticky každou ms odesílá okamžitou polohu hlavičky sondy snímanou obdobným způsobem jako u pomalého posuvu.

Náběžná hrana centrálního externího 5V triggeru (společného i pro mnoho dalších diagnostik) inicializuje samostatné „přerušení“ mikrokontroléru, jež spustí čekací cyklus s předem uživatelem nastavenou délkou, po jehož uplynutí je automaticky proveden rychlý reciprokový pohyb s přednastavenou délkou (resp. dobou přepnutí ventilu). Tímto způsobem lze nastavit přesný okamžik měření v průběhu výboje.

Uživatel též může ovlivnit, zda bude po detekci triggeru připojen ke zvoleným pinům hlavice sondy napájecí kondenzátor (nabitý na přednastavenou úroveň napětí) či nikoli.

Samotná komunikace mezi mikroprocesorem a uživatelem je realizována přes sériové rozhraní napojené na počítačový server s operačním systémem linux. Na ten se lze připojit z libovolného místa počítačové sítě pracoviště tokamaku a sondu řídit prostřednictvím některého komunikačního terminálu schopného vysílat a přijímat data přes sériový port (např. GTKterm). Každé činnosti je přiřazen příkaz v podobě jednoho znaku, v případě zadávání polohy a času ještě doplněný o trojmístný číselný údaj. Ovládací software podává uživateli krátké textové zprávy o aktuálním stavu, např. o aktuální pozici při pomalém posuvu, jednotlivých uživatelských nastaveních, detekci triggeru apod. Zobrazit lze též krátkou nápovědu s přehledem příkazů. Podrobný seznam ovládacích příkazů je v **Příloze 1**.

3.5 Řídící software

Ovládací software pro mikrokontrolér dsPIC byl vyvíjen v programu MPLAB verze 8.14. Celkově zahrnuje zhruba 1100 řádků kódu v programovacím jazyce C. Zdrojový kód programu je přiložen k bakalářské práci na CD (**Příloha 6**).

Hlavní soubor zdrojového kódu main.c obsahuje především definice funkcí obstarávajících

- pomalý pohyb (uživatelem zadanou polohu přepočte na napětí, porovná s aktuální pozicí, rozhodne, které ventily je třeba otevřít, hlídá okamžitou polohu a stav spínačů na koncích posuvné dráhy, uzavře ventil(y) po dosažení požadované pozice)

- rychlý reciprokový pohyb (sepne patřičný ventil, čeká než se ventil skutečně otevře – prodleva několik desítek ms, začne sbírat aktuální polohu hlavice sondy a odesílat ji přes optický sériový port v binární podobě (1 číselný údaj o poloze v mm = 1 byte), po uplynutí nastavené doby opět přepne ventil – započne brždění pohybu, po návratu sondy do klidové pozice proces ukončí, příp. vypíše chybovou hlášku, pokud se hlavice do krajní polohy nevrátí)
- přepočet polohy v mm na příslušné napětí na jezdcí potenciometru pro rychlý i pro pomalý pohyb
- přepočet napětí na jezdcí potenciometru na příslušnou polohu v mm pro rychlý i pro pomalý pohyb
- čekací cyklus
- načítání trojmístného číselného údaje ze sériového portu (uživatelské zadání polohy, časů atd.)
- detekci triggeru (po změně stavu na nastaveném vstupu spustí čekací cyklus určené délky, po jehož uplynutí odstartuje rychlý reciprokový pohyb)

Mimo to soubor obsahuje instrukce přerušení od A/D převodníku, časovače TIMER1 a Input change notification. Tato část kódu též obstarává veškerá uživatelská nastavení, výpis aktuálního stavu a nápovědy.

Dalších několik pomocných souborů obsahuje nastavení A/D převodníku, funkce pro řízení priorit procesů, obsluhu sériového portu, definice často používaných konstant atd.

Část kódu (především obsluha sériového portu) byla převzata ze softwaru Pavla Cahyny ovládajícího hydraulický systém tokamaku Compass [18].

4 Závěr

Hlavní náplní mé bakalářské práce byla především samotná, mnohdy ryze manuální, reinstalace reciprokých sond tokamaku Compass. V tomto textu jsem se snažil zachytit hlavní body této činnosti – od prvního seznámení se sondami, přes návrhy různých doplňkových komponent, testy jednotlivých částí až po uvedení do provozu (alespoň co se ovládání týče). První dvě kapitoly navíc nabízejí stručný úvod do problematiky řízené termojaderné fúze a principu reciproké (resp. Langmuirovy) sondy.

Hlavní pozornost je ale v textu věnována ovládání horizontální sondy, na které jsem se soustředil především. Práce by měla sloužit i jako jakýsi manuál k ovládání sondy a popis zapojení. Proto je v příloze připojen seznam ovládacích příkazů, schémata elektronických desek, seznam označení kabelů atd.

Po téměř dvou letech se reinstalace návratových sond tokamaku Compass dostala do „finishe“. Již proběhl úspěšný test ovládání horizontální sondy a měření šumu mimo komoru tokamaku. Věřím, že již brzy si budeme moci prohlédnout první plnohodnotná naměřená data.

5 Kam dál

Reinstalace sond popsaná na předchozích stránkách je pochopitelně pouhým začátkem. Pro nadcházející měsíce se nabízí řada dalších činností – především je třeba dokončit poslední nutné úkony k plnému zprovoznění obou sond. Vyměnit netěsný vakuový díl horizontální sondy, upevnit vertikální sondu na nosnou konstrukci a připojit k ní ovládací elektroniku, čerpání a sběr dat.

Stávající hlavice vertikální sondy bude vyměněna za novou s potřebným sklonem 18° . Její dodání přislíbil prof. Tsviatko K. Popov ze St. Kliment Ohridski University of Sofia.

Ovládací software horizontální sondy projde malou revizí s cílem sjednotit komunikační protokol s ostatními řídicími aplikacemi tokamaku (ovládání vakuového systému, glow discharge apod.). Následně by bylo vhodné vytvořit grafické uživatelské rozhraní pro usnadnění práce se sondou.

Výhledově se bude úsilí upínat k optimalizaci pohybu sond, především jejich rychlosti tak, aby bylo možné dosáhnout hlubších částí plazmatu. To by poskytlo prostor pro velice zajímavé fyzikální bádání v oblasti, která není ještě příliš prozkoumána.

Seznam literatury

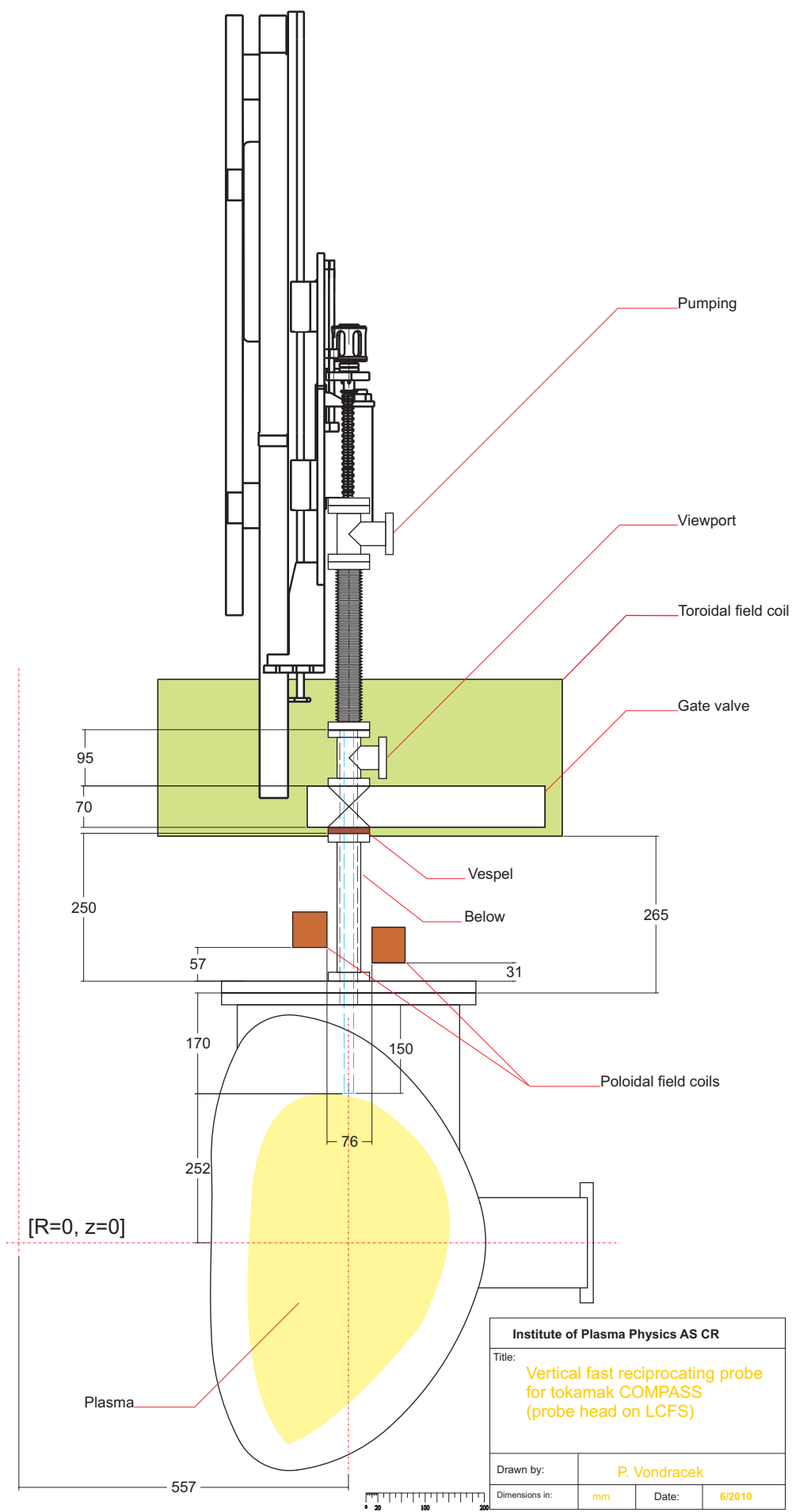
- [1] Horáček J. *Measurement of edge electrostatic turbulence in the TCV tokamak plasma boundary* [online]. Switzerland: EPFL, 2006. PhD thesis No. 3524. [cit. 2009-01-07]. <<http://library.epfl.ch/theses/?nr=3524>>.
- [2] Chen Francis F. *Úvod do fyziky plazmatu*. Praha: Academia, 1984.
- [3] ÚFP AV ČR. *Tokamak COMPASS* [online], [cit. 2010-06-10]. <<http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/comp>>.
- [4] Boedo J. A. et al. Fast scanning probe for tokamak plasmas. *Review of Scientific Instruments*. May 1998, vol. 69, no. 7, s. 2663–2670.
- [5] Mlynář J. O symetrii tokamaku. *Československý časopis pro fyziku*. 2009, roč. 59, č 4, s. 207-212.
- [6] Microchip Technology Inc. *dsPIC30F3014/4013 Data Sheet*. 2007
- [7] 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/>>.
- [8] *Atomové jádro* [online]. [cit. 2010-06-20] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Atomové_jádro>.
- [9] 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>>.
- [10] J. Adámek et al. Ball-pen probe measurements in L-mode and H-mode on ASDEX Upgrade. *Contributions to Plasma Physics*. 2009
- [11] Stangeby P. C. *The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices*. London: IOP Publishing Ltd, 2000. ISBN 0-7503-0559-2.

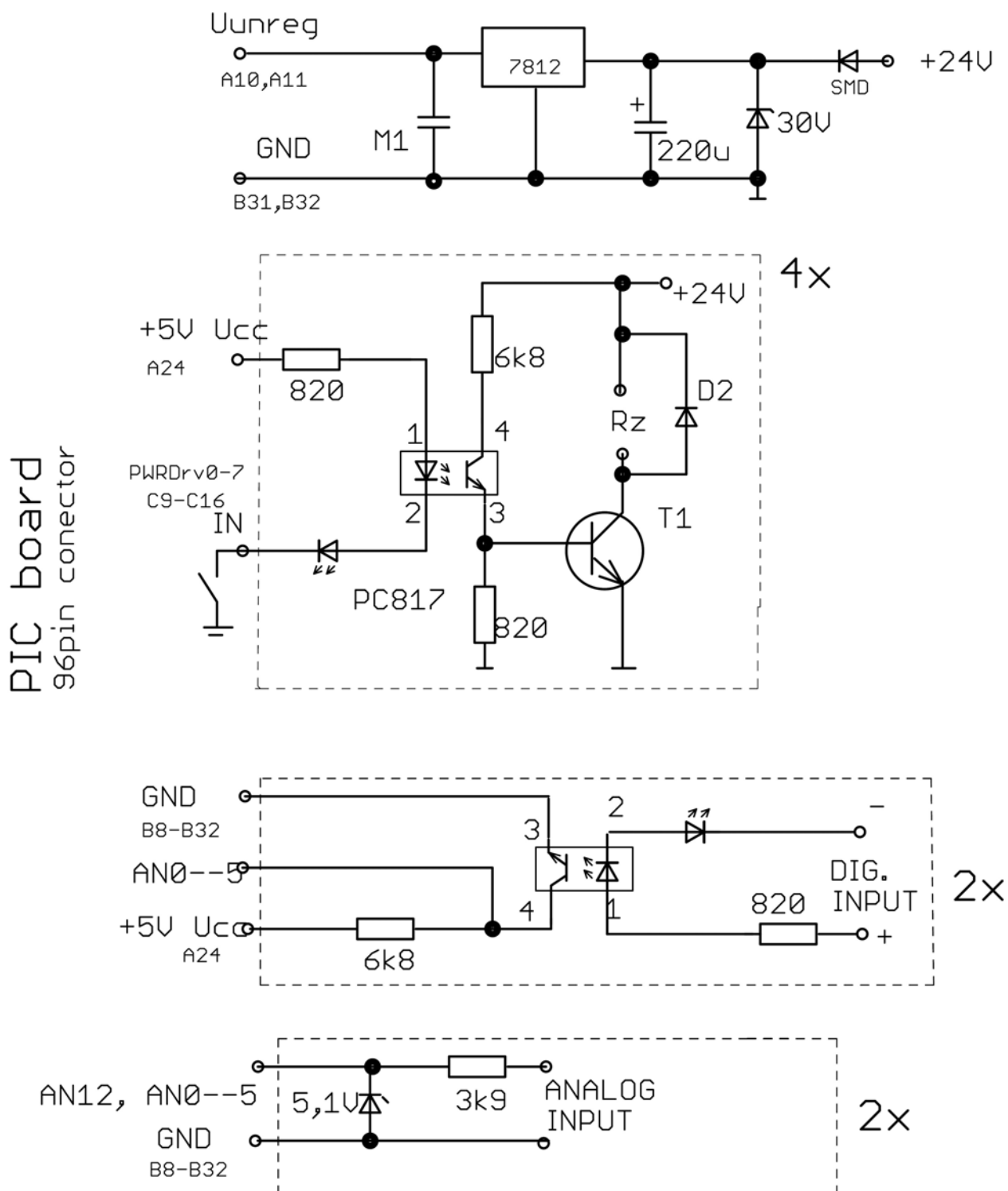
- [12] Stacey W. M. *Fusion Plasma Physic*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. ISBN-10 3-527-40586-0.
- [13] Wesson J. *Tokamaks*. 3rd edition. Oxford: Clarendon press, 2004. ISBN 0-19-8509227.
- [14] Hrbáček J. *Moderní učebnice programování jednočipových mikrokontrolérů PIC – 1. díl*. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-136-5.
- [15] Hrbáček J. *Moderní učebnice programování jednočipových mikrokontrolérů PIC – 2. díl*. Praha: BEN – technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-137-7.
- [16] Haskell H.W.S. *Vessel sector 10*. Culham: UKAEA Culham laboratory, 1988. Výkresová dokumentace tokamaku Compass, nepublikováno.
- [17] Výkresová dokumentace reciproké sondy na tokamaku TCV. Laussane Švýcarsko, nepublikováno.
- [18] Cahyna P. *Hydraulika*. Nepublikováno. [cit. 2009-11-20]. Zdrojový kód softwaru pro dsPIC30F4013 ovládajícího hydrauliku tokamaku Compass.
- [19] Oost G.V. Probe Diagnostics for Plasma Edge Characterization. *Fusion Science and Technology*. March 2004, vol. 45, no. 2T, s. 391-398.
- [20] Pánek R. *Introduction of the COMPASS tokamak*. Praha, srpen 2009. Úvodní přednáška letní školy SUMTRAIC 2009, nepublikováno.
- [21] 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 >.

Seznam příloh

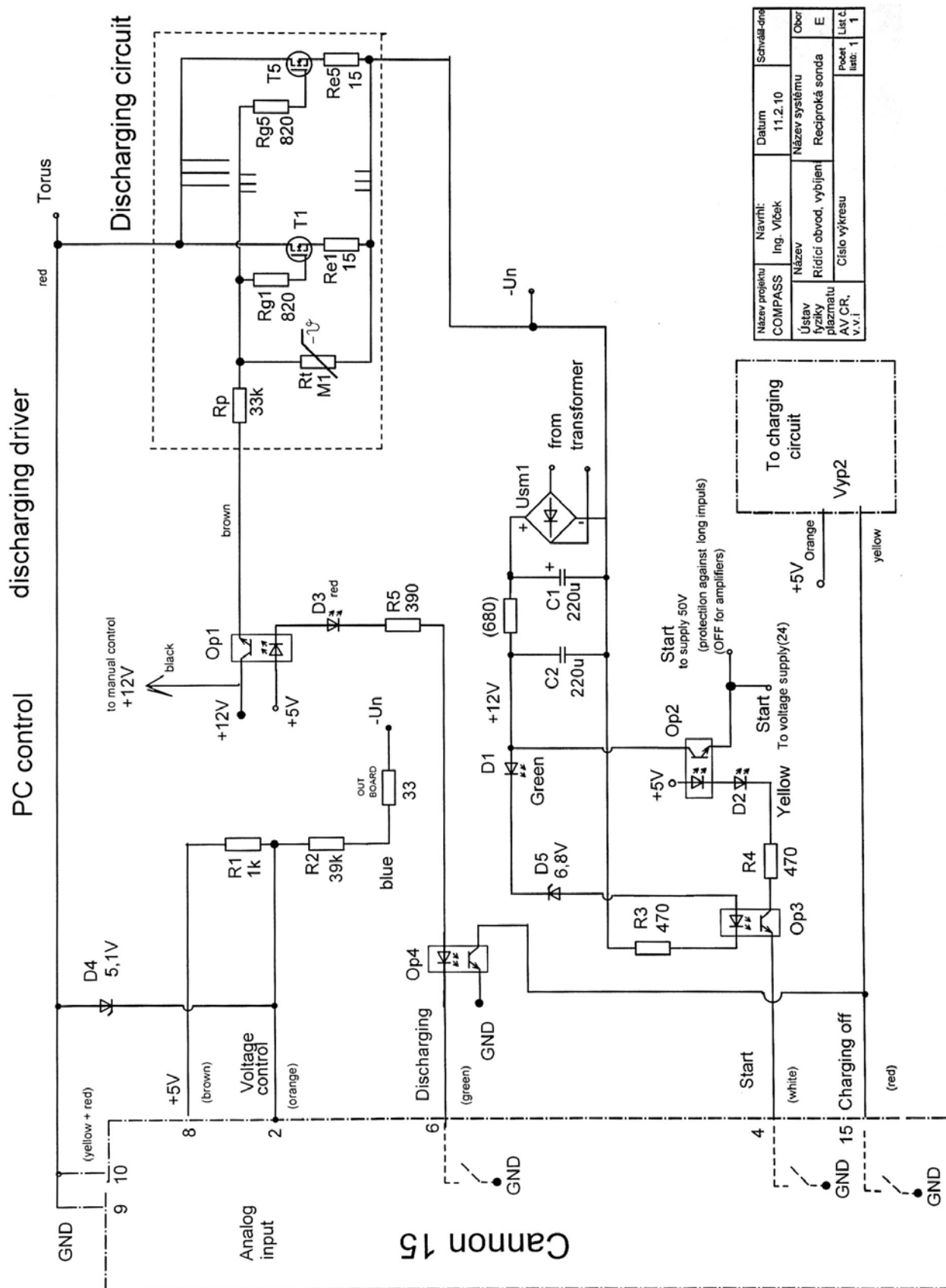
- [1] Seznam ovládacích příkazů horizontální sondy.
- [2] Výkres osazení vertikální reciproké sondy na komoru tokamaku (v měřící poloze).
- [3] Schéma zapojení rozšiřující ovládací karty se vstupy a výstupy.
- [4] Schéma zapojení společné měřicí elektroniky reciprokých sond.
- [5] Rozpis označení kabelů mezi sondou a deskou mikrokontroléru dsPIC.
- [6] CD se zdrojovým kódem ovládacího softwaru horizontální sondy.

Příkaz	Popis
„h“ (help)	Zobrazí nápovědu (seznam příkazů).
„mxxx“ (move)	Přesune sondu na pozici xxx mm.
„f“ (fast)	Provede rychlý reciproký pohyb.
„rxxx“ (return time)	Nastaví „poločas“ reciprokého pohybu na xxx ms (dobu přepnutí pneumatického ventilu).
„wxxx“ (wait)	Nastaví čekací dobu mezi detekcí triggeru a zahájením rychlého pohybu xxx ms.
„t“ (trigger)	Povolí nebo zakáže detekci triggeru.
„l“ (list)	Zobrazí aktuální pozici a nastavení všech parametrů.
„s“ (storno)	Zruší aktuální příkaz.
„c“ (capacitor)	Povolí nebo zakáže připojení napájecího kondenzátoru po detekci triggeru.





Název projektu		Navrhl:		Datum		Schválil-one	
COMPASS		Ing. Vlcek		18.12.09			
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i	Název		Název systému			Obor	
	ovladaníPIC R.sonda					E	
	Číslo vökresu				Počet listu1	List č. 1	



Název projektu	Ing. Višek	Datum	Schválí dne
COMPASS		11.2.10	
Název	Název systému	Obor	Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.
Ridici obvod, vyjádření	Reciproká sonda	E	
Císlo výkresu	Pobit. list. 1	1	

Označení	Funkce
1	Potenciometr rychlého pohybu (GND)
2	Jezdec potenciometru rychlého pohybu
3	Potenciometr rychlého pohybu (+5V), spínání kondenzátoru (+5V)
4	Potenciometr pomalého pohybu (GND)
5	Jezdec potenciometru pomalého pohybu
6	Potenciometr pomalého pohybu (+5V), koncový spínač (+)
7	Koncový spínač a indikátor stavu hlavního gate ventilu (-)
8	GND
9	Trigger (+)
10	Trigger (-)
11	Hlavní pneumatický ventil pomalého posuvu (-)
12	Hlavní pneumatický ventil pomalého posuvu (+)
13	Směrový pneumatický ventil pomalého posuvu (-)
14	Směrový pneumatický ventil pomalého posuvu (+)
15	Pneumatický ventil rychlého posuvu (-)
16	Pneumatický ventil rychlého posuvu (+)
17	Spínání kondenzátoru GND
18	-
19	Napájení 24V (+)
20	Napájení GND, stínění vodičů