

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská



Návrh manipulátorů tokamaku COMPASS Upgrade

Design of COMPASS Upgrade in-vessel manipulators

Výzkumný úkol

Autor:Bc. Samuel LukešVedoucí práce:Res. Prof. Jan Horáček, dr. és. sc.Akademický rok:2020/2021

Čestné prohlášení:

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

Nemám závažný důvod proti použití 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 d
ne 10. $9.\ 2021$

Samuel Lukeš

Lilos

Poděkování:

Zejména děkuji Res. Prof. Jan Horáček, dr. és sc. za jeho vedení a spolupráci na výzkumném úkolu a ochotě pomoci kdykoliv bylo třeba.

Dále děkuji Ing. Viktoru Veselovskému a jeho kolegovi Ing. Davidu Šestákovi za podklady, vykreslování, technické zpracování a rady k našim návrhům. Za rady i poskytnuté materiály děkuji rovněž Ing. Petr Vondráček, Ph.D. a Dr. Jordan Cavalier.

A nakonec děkuji i celému oddělení Tokamak z Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, že mi byla umožněna práce na této nepostradatelné součásti budoucího mimořádného zařízení COMPASS Upgrade, a že mi byly v rámci této práce všude otevřeny dveře.

Název práce:

Návrh manipulátorů tokamaku COMPASS Upgrade

| Autor: | Bc. Samuel Lukeš |
|-------------|-------------------------------------|
| Obor: | Fyzika plazmatu a termojaderné fúze |
| Druh práce: | Výzkumný úkol |

Vedoucí práce: Res. Prof. Jan Horáček, dr. és sc., Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.

Abstrakt: Nový tokamak COMPASS Upgrade s jeho unikátně vysokou teplotou komory (250 až 500 °C) a s extrémními tepelnými toky (kolmý tok na divertor až $q_{\perp} \approx 80 \text{ MW/m}^2$ a $q_{\parallel} \sim 10^3 \text{ MW/m}^2$ na poslední uzavřené magnetické ploše (LCFS)) bude velkou výzvou pro (mimo jiné) jeho okrajovou diagnostiku. V této práci ukážeme návrh, podpořen výsledky ze simulací vedení tepla a mechanických modelů, tří nových manipulátorů operujících přímo v komoře tokamaku.

První provádí reciprokaci do oblasti narůstajícího okrajového toku plazmatu (vnější midplane), druhý do oblasti plazmového zřidla (mezi vnějším strike-point divertoru a X-bodem) zkoumajíc oddělení plazmatu (impurity-seeding) na divertoru a transport výparů z tekutých kovů. Obě hlavice sond jsou osazeny sety ball-pen a Lanqmuirových sond (rail sond), které umožní spolehlivé a extrémně rychlé (10^{-6} s) měření lokálního (1 mm) potenciálu plazmatu, hustoty, elektronové teploty, tepelného toku a dokonce iontové teploty s rozlišením $10^{-5}s$. Záměr hluboké reciprokace elektrostatických sond co nejblíže k LCFS by mělo být možné díky a) optimalizaci geometrie a materiálu hlavic a sond, b) vyrovnání profilu zpomalení (dosahující až $100 \times$ gravitačního zrychlení) pomocí dodatečných pružin, c) real-time kontrole pozice a d) chlazení hlavice a sond mezi výboji.

Divertorový manipulátor (bez reciprokace) bude umísťovat testovací terčíky z různých materiálů na vnější divertor. Unikátní bude jeho schopnost ještě navýšit tepelný tok dopadající na povrch terčíků s přesně daným tvarem, pouze pomocí kontrolovaného posunutí terčíku vůči sousedícím wolframovým dlaždicím. Plánujeme testování terčíků z tekutých kovů, kde takové navýšení tepelného toku bylo zásadní pro dosažení módu, kdy dojde ke stínění terčíku jeho vlastním výparem. I za konzervativního usouzení finálního výkonu COMPASS Upgrade můžeme předpokládat, že terčík dosáhne a vydrží tepelné toky srovnatelné s reaktorem EU DEMO.

Klíčová slova: COMPASS Upgrade, tokamak, reciproké manipulátory, divertor, diamantové pokrytí, tekuté kovy, kapilární porézní systém

Title: Design of COMPASS Upgrade in-vessel manipulators

Author: Bc. Samuel Lukes

Abstract: The new COMPASS Upgrade tokamak with uniquely high vessel temperature (250-500 °C) and extreme heat loads (perpendicular to divertor surface up to $q_{\perp} \approx 80 \text{ MW/m}^2$ and $q_{\parallel} \sim 10^3 \text{ MW/m}^2$ at last closed flux surface (LCFS)) is very challenging (not only) for its edge diagnostic systems. In this work, we show engineering design supported by heat conduction and mechanical models of three new in-vessel manipulators.

One reciprocates at the region of edge plasma influx (the outer midplane), the second one at the plasma sink (between the outer divertor strike-point and X-point) studying the plasma divertor (impurity-seeded) detachment and liquid metal vapor transport. Both probe heads are equipped with a set of ball-pen and Langmuir probes (rail probes), allowing for reliable and extremely fast (10^{-6} s) measurement of local (1 mm) plasma potential, density, electron temperature, heat flux and even ion temperature with $10^{-5}s$ resolution. The intention for deep reciprocation of electrostatic probes near the LCFS should be possible by a) optimizing geometry and material of the head and probes, b) narrowing the deceleration profile (reaching up to $100 \times$ gravity) by additional springs, c) real-time position control and d) cooling of the head and probes in between discharges.

The divertor manipulator (without reciprocation) will place various material test targets at the outer divertor. Unique will be its capability to even increase the surface heat flux to targets with exact shape just by controllable target miss-alignment to the surrounding tungsten tiles. We plan to test liquid metal targets where such increase of incoming heat flux was found to be critical to achieve the desired mode with lithium vapor shielding. Even in the conservative expected performance of COMPASS Upgrade, we predict to reach and survive the EU DEMO relevant heat fluxes.

Key words: COMPASS Upgrade, tokamak, reciprocating manipulators, divertor, diamond coating, liquid metals, capillary porous system

Obsah

| 1 | Úvo | od | 10 | | |
|----|--------------------|--|----|--|--|
| 2 | Zák | ladní přehled | 10 | | |
| | 2.1 | Termojaderná fúze | 10 | | |
| | | 2.1.1 Princip | 11 | | |
| | | 2.1.2 Tokamak | 12 | | |
| | 2.2 | Tokamak COMPASS Upgrade | 14 | | |
| | 2.3 | Reciproké sondy | 14 | | |
| 3 | Náv | rh manipulátorů | 15 | | |
| | 3.1 | Horizontální reciproký manipulátor | 16 | | |
| | | 3.1.1 HRCP pro COMPASS Upgrade | 16 | | |
| | | 3.1.2 Real-time ovládání reciprokace | 17 | | |
| | | 3.1.3 Profilování průběhu reciprokace | 18 | | |
| | | 3.1.4 Radiační chlazení hlavic | 20 | | |
| | | 3.1.5 Diamantová ochrana hlavic a sond | 21 | | |
| | 3.2 | Šikmý reciproký manipulátor | 22 | | |
| | 3.3 | Manipulátor dlaždicových prototypů | 23 | | |
| | 3.4 | Finální rozmístění | 25 | | |
| 4 | Záv | ěr | 26 | | |
| Po | Použitá literatura | | | | |

1 Úvod

Počínaje rokem 2016 započaly počáteční designové práce na prvním ryze českém tokamaku COMPASS Upgrade (CU) [16], který má nahradit současný tokamak COMPASS [19] v oblasti výzkumu termojaderného plazmatu na Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky. Unikátností na poli vědy budou především parametry a geometrie jeho plazmatu, které jsou relevantní s nejdůležitějším věděckým projektem v oblasti termojaderné fúze současnosti, ITER [20], přičemž svou jednodušší konstrukcí může výrazně pomoci při řešení složitých překážek návrhů budoucích fúzní zařízení.

Nezbytnou součástí každého současného tokamaku je jeho co nejvyšší variabilita vůči výzkumu a jeho diagnostické systémy, pomocí kterých se může výzkum zaznamenat. Podstata této práce spočívá v návrhu tří nezávislých manipulačních systémů, které tyto požadavky pomohou zajistit. Jedná se o dva rychlé reciproké manipulátory, na kterých jsou umístěné hlavice snášející extrémní tepelné namáhání se soustavou citlivých sond. Dále jeden pomalý manipulátor, jehož účelem je bezpečně a opakovatelně dopravit do oblasti divertoru systémy inovativních prototypů dlaždic.

V práci jsou rozebrány požadavky na jednotlivé manipulátory, porovnání s problémy na podobných zařízeních typu tokamak a samotný návrh manipulátorů s jeho opodstatněním. Mezi hlavní faktory ovlivňující samotný návrh patří zejména snaha proměřit parametry plazmatu co nejhlouběji v tokamaku (v případě rychlých reciprokých manipulátorů) a možnost testování systémů z tekutých kovů (v případě pomalého divertorového manipulátoru) tak, aby nebyla ztracena bezpečnost a spolehlivost při zasunutí standardního komponentu divertoru.

Pro tyto účely jsou v práci řešeny i problémy týkající se samotných aktivních/pasivních zakončení manipulátorů, jejichž samotný design není přímo spjatý s konstrukcí manipulátorů a může se během provozu tokamaku měnit, ale je nutné při návrhu manipulátorů s jejich požadavky do značné míry počítat.

2 Základní přehled

2.1 Termojaderná fúze

Přes veškerou snahu moderního světa snížit svoji závislost na fosilních palivech, jejich spalování stále představuje $\approx 85\%$ celosvětové primární energetické spotřeby. Náhrada v podobě současných obnovitelných zdrojů (solární, větrné, vodní, geotermální, ...) často závisí na počasí, denní době, ročním období a lokalitě. To ve výsledku snižuje jejich, už tak výrazně menší oproti fosilním palivům, výkonnost na zábor půdy. Záchranu nabídla na začátku druhé poloviny 20. století štěpná jaderná energetika, ale již 40 let stagnuje kvůli

negativnímu ohlasu veřejnosti z důvodu celosvětově známých havárií štěpných elektráren.

Fúzní jaderná energetika se jeví jako řešení v podobě nevyčerpatelného a navíc bezpečného zdroje "zelené" energie. Bohužel, celých 70 let se zatím nepodařilo lidstvu sestrojit elektrárnu, která by byla schopná efektivitou konkurovat jiným zdrojům. To vše by měl změnit mezinárodní projekt ITER [20], který má fungovat jako "energetický zesilovač" se zesílením Q = 10 vložené energie dosahující fúzního výkonu 500 MW v roce 2035. První evropskou elektrárnu EU DEMO o užitném tepelném výkonu > 2 GW pak očekáváme ještě na konci první poloviny 21. století.

2.1.1 Princip

Lidské tělo je závislé na získávání energie z jídla. Jídlo obsahuje molekuly cukru, které je tělo chemicky schopno přeuspořádat do jiných molekul, či uspořádání. Avšak každé různé vzájemně působící uspořádání atomárních částic má různou vazebnou energii, která se projeví jako nepatrná změna hmotnosti všech uvažovaných částic dle známého Einsteinově vztahu [13] mezi energií E a hmotou m

$$E = m \cdot c^2, \tag{1}$$

kde $c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s je konstanta rychlosti šíření světla ve vakuu [21]. Pokud tedy v těle dojde ke změně uspořádání molekuly cukru, jenž má v celku menší hmotnost než předtím, dojde k uvolnění energie. Stejným principem funguje např. i spalování fosilních paliv, kdy atom uhlíku C a dva atomy kyslíku O mají větší hmotnost než molekula oxidu uhličitého CO₂, která procesem získá kinetickou energii, jenž se v makroskopickém měřítku projeví jako teplo. Fúze neboli slučování atomárních jader využívá jen mnohonásobně většího rozdílu vazebných energií na jednotlivou částici než bylo doposud možno.

Současných favoritem se zdá být fúze iontů izotopů vodíku: deuterium $\binom{2}{1}H^+$ neboli D⁺) a tritium $\binom{3}{1}H^+$ neboli T⁺), která má největší účinný průřez (pravděpodobnost sloučení) ze všech uvažovaných. Schéma D-T fúze vypadá následovně

$$D^+ + T^+ = {}^{4}_{2}He^{2+} + {}^{1}_{0}n + (17, 6 \text{ MeV}).$$
 (2)

Ale podmínky k jejímu dosažení jsou na našich současných technologických limitech. Pro překonání odpudivých elektrických sil mezi ionty jsou potřeba extrémní teploty, které jsou limitovány požadavkem na co největší energetický zisk. Pro D-T fúzi se nevhodnější podmínky nacházejí mezi 10 keV až 20 keV (v přepočtu $116 \cdot 10^6$ až $232 \cdot 10^6$ K). Takové teploty není dlouhodobě schopen vydržet žádný pevný materiál, a proto se současná snaha výzkumných projektů zaměřuje zejména na nalezení nejvhodnějšího způsobu k udržení a oddělení plazmatu od zbytku fúzní elektrárny.

2.1.2 Tokamak

Prozatím neúspěšnější fúzní reaktory, jejichž energii jsme schopni "ekonomicky" využívat, jsou hvězdy. K fúzi využívají své ohromné gravitační síly, které na Zemi nejsme schopni nijak napodobit. Variantou k udržení extrémně horkého plazmatu v pozemských podmínkách se v druhé polovině 20. století ukázala být elektromagnetická síla. Vědci po celém světě přicházeli s různými koncepty zařízení (Z-pinč, θ -pinč, lineární magnetické pasti, inerciální fúze, fúzor, stelarátor, ...), které by mohli, či dokonce úspěšně detekovali termojaderné neutrony, avšak žádný z nich nedokázal svoji účinností konkurovat dostupnosti fosilních paliv. Mezi všemi těmito návrhy se v 60. letech ukázalo jako velice úspěšné zařízení jménem tokamak.

Tokamak, neboli toroidálně symetrická nádoba s magnetickými cívkami, slouží k dlouhodobému udržení výboje o termonukleárních teplotách a porozumění jak plazmatu, tak termojaderné fúze. Plazmatický výboj je zachycen uvnitř toroidální vakuové (naplněné pracovním plynem, tedy vodíkem a jeho izotopy) komory pomocí systému cívek vytvářející silná magnetická pole \boldsymbol{B} dosahující několik jednotek tesla. Toroidální cívky generují toroidální magnetické pole, které se uzavírá ve vakuové komoře dokola, díky tomu elektricky nabité částice zůstávají na spirálovitých drahách podél magnetických siločár, viz. Obr. 1. Udržení plazmatu (gradient hustoty) je však až důsledkem spojení toroidálního pole s transformátorem (dnes pouze centrální solenoid) indukující v plazmatu proud. Proud plazma ohřívá, ale také vytváří poloidální magnetické pole. Kombinace toroidálního a poloidálního magnetického pole tvoří šroubovité (helikální) pole, které vyruší jinak nutně vznikající $\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{B}$ drift částic od centra toru. Avšak proud vytváří kolem sebe takové magnetické pole, které se nutně snaží proudovou smyčku natáhnout do přímky. V tokamacích proto nesmí chybět ani vnější cívky poloidálního pole, které sílu kompenzují. Cívky poloidálního pole také plazma stabilizují vertikálně a optimalizují jeho tvar.



Obr. 1: Základní uspořádání magnetických cívek každého tokamaku.

S cílem lépe stabilizovat a čistit plazma se mnoha tokamacích začal využívat tzv. D-tvar a X-bod. Jedná se o tvar magnetické konfigurace plazmatu v toroidálním řezu, viz. Obr.

2. D-tvar slouží k vyrovnání poměru částic v komoře, protože toroidální tvar nádoby má více částic na vnější straně, straně nízkého magnetického pole (LFS). Asymetrické písmeno "D" má větší plochu (více částic) na vnitřní straně toru, kde jsou cívky toroidálního pole blízko u sebe (HFS). D-tvar zároveň umožňuje tvorbu bodu "X" (i více bodů), kde je nulové poloidální magnetické pole. Částice, jejichž dráha se nachází "radiálně" dál od centra plazmatu než X-bod opustily magnetické udržení a pokračují na zvolenou plochu do oblasti divertoru (poslední v komoře se uzavírající magnetická plocha se nazývá LCFS). Tok uniklých částic se díky extrémním rychlostem podél magnetických siločár koncentruje do dvou toroidálních kružnic (strike-point). To znamená, že divertorové dlaždice musí vydržet nesmírné tepelné toky v řádech 10^6 až 10^8 W/m².



Obr. 2: Toroidální řez komorou tokamaku znázorňující D-tvar plazmatu s X-bodem.

Úspěšnost tokamaku v efektivitě udržení termojaderné fúze je těsně sledována podobným zařízením, stelarátorem. Místo indukovaného proudu, pro vytvoření helikálního magnetického pole, využívá další vnější cívky. Věří se, že jeho nevýhoda spočívá pouze ve složitosti jeho konstrukce (a to i při dnešních technologiích), která způsobuje horší výsledky pro stejný objem plazmatu. Na druhou stranu by v principu umožnil kontinuální režim provozu elektrárny, což je naopak pro tokamak (v principu induktivní zařízení) velice složitá záležitost. V budoucích reaktorech se proto počítá s neinduktivními ohřevy, které mají za úkol také udržet v plazmatu konstantní proud. A tak se centrálnímu solenoidu začíná přikládat spíše vedlejší funkce v podobě počátečního průrazu a nažhavení pracovního plynu. První evropská demonstrační elektrárna (EU DEMO1) stále spoléhá na pulzní režim v podobě 2 hodinového plazmatu a 15 minutové pauzy na přepólování a nastartování dalšího výboje.

2.2 Tokamak COMPASS Upgrade

Aktuálně ukončovaný provoz experimentálního zařízení typu tokamak, jménem COMPASS, nacházející se na Ústavu fyziky plazmatu AV ČR v Praze bude nahrazen zbrusu novým evropským tokamakem COMPASS Upgrade (CU). Jedná o úplně první tokamak konstruovaný v České republice za velkého úsilí týmu oddělení Tokamak výše zmíněného ústavu a nemalé pomoci kolegů z celého světa. Stejně jako jeho předchůdce bude i CU nezbytnou součástí evropského i celosvětového výzkumu termojaderného plazmatu, a to zejména díky jeho geometrickému uspořádání odpovídající budoucím fúzním reaktorům (a právě dokončovaného celosvětového projektu experimentální fúzní elektrárny ITER), které se skloubí do středně velkého tokamaku (R = 0,894 m, a = 0,27 m) schopného produkovat časté a levné výboje oproti větším podobným zařízením.

Výrazným rysem CU a budoucích fúzních elektráren bude silné magnetické pole (toroidální magnetické pole $B_{\rm t} \leq 5$ T). V CU takové pole dokáže udržet výboj po dobu až 2 vteřin díky měděným cívkám, které jsou v kryostatu chlazeny na teplotu kapalného dusíku (≈ 80 K). Očekávaný proud až $I_{\rm p} = 2$ MA v plazmatu o vysoké hustotě $(n_{\rm e} \sim 10^{20} \text{ m}^{-3})$ spolu s dodatečným ohřevem pomocí neutrálních svazků (NBI) a rezonančním elektronovým cyklotroním ohřevem (ECRH) dodá celkový ohřev 18 MW. Další unikátností tokamaku CU bude udržování vakuové komory a první stěny na 250 °C (v pozdějších fázích až 500 °C). Takové parametry umožní ITER-relevantní výzkum nových scénářů udržení (I-mód, QH-mód, ...) a design počítá i s pokročilými konfiguracemi plazmatu (snowflake, double null, negative triangularity, rozmítaný divertor, ...).

2.3 Reciproké sondy

Jedním z nejstarších a nejspolehlivějších způsobů jak v tokamaku a jiných zařízení měřit vlastnosti plazmatu jsou plazmové sondy (Lanqmuirovy sondy, ball-pen sondy, ...). Oproti jiným diagnostikám poskytují lokální (1 mm) a velice rychlé (až ~ 10^6 Hz) měření. V současných tokamacích je možné dlouhodobě umístit takové sondy pouze na vzdálený okraj plazmatu, kde jsou převážně v zákrytu za první stěnou. Pokud chceme využít přesnosti tohoto měření i hlouběji v termonukleárním plazmatu, musíme použít reciproké manipulátory. Umístěním sond na hlavici z odolného materiálu (uhlík, wolfram), kterou manipulátorem vsuneme během výboje do a zpět z plazmatu dokážeme ve většině případů proměřit zbytek prostoru mezi LCFS a první stěnou, nazývanou Scrape-Off Layer (SOL).

Vše záleží na výší tepelného toku q působící na povrch sondy a hlavice. Na tokamaku CU bude díky jeho extrémním hustotám plazmatu a silném ohřevu koncentrovaným v tokamaku střední velikosti tepelný tok podél magnetického pole dosahovat hodnot až $q_{\parallel} \sim 10^3 \text{ MW/m}^2$. Takový tok dokáže snadno zahřát sondu na teplotu tání (v případě grafitu silné vypařování), které může vést k deformaci sondy (mění její sběrnou plochu a tedy i naměřený signál), zkratování sondy i k samotné terminaci výboje vypařením velkého množství nečistot do plazmatu. Už před samotným tavením dochází k termoemisi elektronů, která má opět za následek neplatnost získaných údajů. K termoemisi dochází už při teplotách mnohem nižších než je teplota tání, proto se tímto jevem často omezuje maximální hloubka zásunu sondy.

Mnoho pohonných systémů různých reciprokých manipulátorů se skládá s pneumatických, či hydraulických pístů, jejich jednoduchost často převyšuje výhody jiných způsobů pohonu (elektromagnetické lineární motory různých druhů). Jejich typické maximální rychlosti dosahují $\approx 1 \text{ m/s}$ a při obratu zvládají zrychlení okolo 100 m/s². Tímto dokáží provést jednu reciprokaci tam a zpět zpravidla za $\sim 10^2 \text{ ms}$. Obdobnými parametry disponují i dva nedokončené reciproké systémy, jejichž design je v této práci vylepšen a dokončen.

3 Návrh manipulátorů

Záměr vytvořit dva nové pneumatické reciproké manipulátory byl již na tokamaku COM-PASS, jejich koupě a částečné sestavení proběhlo až v roce 2019. V důsledku toho vznikl scénář jejich předělání pro právě chystaný nový tokamak CU. Oba manipulátory obsahují plně funkční elektroniku, která nebude v této práci rozebírána. I přesto, že CU má jen o pár desítek centimetrů větší komoru než tokamak COMPASS, tak jeho kryogenní obálka způsobí nutnost prodloužení většiny prvků manipulátorů o $\approx 1,6$ m. Velká výhoda je naopak v ponechání pneumatického (He) reciprokačního systému se zavedenou elektronikou, který dosahuje maximálního návratového zrychlení 15 g a maximální rychlosti 2,5 m/s s 3 kg zátěží (přibližně odpovídá hmotnosti sondy s tlačnou tyčí).

To neplatí pro třetí manipulátor sloužící k testování nových komponent vystavených plazmatu (PFC), který musel být vytvořen úplně nový. Tento manipulátor, ačkoliv návrhy různých částí byly čerpány zejména z velkého divertorového manipulátoru na tokamaku ASDEX Upgrade v Německu [7], byl v důsledku snahy o jednoduchost obsluhy a kompletace všech tří manipulátorů navrhnut na základě stejného schématu jako oba reciproké manipulátory.

Při návrhu vakuového systému bylo nahlíženo na recyklaci vakuových komponent z tokamaku COMPASS. Pokud to nebránilo provozu manipulátoru, tak vyžití komponent jako borosilikátové vakuové okénka, krátké vlnovce, či pneumatické šoupě (gate valve) určilo průměr vakuového systému daného manipulátoru.

3.1 Horizontální reciproký manipulátor

U obou reciprokých manipulátorů se ze začátku počítá s osazením speciálními teplotně odolnými hlavicemi [1], které se dodatečně pokryjí wolframem, nebo dojde k osazení úplně novými wolframovými hlavicemi s wolframovými sondami. V obou případech se počítá se sety Lanqmuirových sond (rail sond) s ball-pen (BPP) sondami. Ty umožní rychlé (1 MHz) a lokální (1 mm) měření potenciálu plazmatu $V_{\rm p}$, elektronové hustoty $n_{\rm e}$ (úměrné saturovaným proudům), elektronové teploty v režimu bez rozmítání jako $T_{\rm e} = (V_{\rm BPP} - V_{\rm fl})/2.2$, tepelného toku [1] a dokonce i iontové teploty $T_{\rm i}$ [2].

Jedním ze základním požadavků bylo, aby jeden z manipulátorů byl schopen tyto parametry proměřit podél horizontální osy procházející středem plazmatu (midplane). Tím vzniklo označení prvního manipulátoru reciprokujícího v horizontální poloze skrze port tokamaku ve výši midplane, HRCP. HRCP bude moci zkoumat turbulentní transport látky na okraji vysoce hustého plazmatu a původ okrajových nestabilit (blobs a ELM). Jeho sekundárním záměrem je dosáhnout co nejhlouběji do takto hustého plazmatu, tomu je věnována část této práce níže.

3.1.1 HRCP pro COMPASS Upgrade

Na schématu Obr. 3 jsou vidět tři základní rozložení HRCP. Pro výměnu sondy (c) se musí manipulátor manuálně vysunout na vzduch pomocí dvou pojízdných kolejnic připevněných k nosné stolové konstrukci. Po zasunutí do diagnostické polohy (b) se odčerpá vzduch jedním z možných odvodů z vakuových kostek DN63. V této poloze je možné (i mezi výboji) kontrolovat stav sondy vakuovým okénkem. Další zasouvání je způsobeno servomotorem umístěním na vnějším konci manipulátoru, který otáčí dlouhou závitovou tyčí. Tak dochází k posunu reciprokačního mechanismu s reciprokační trubicí a hlavicí se sondami na jejím konci. > 15 cm (maximální délka reciprokace) za hlavicí jsou umístěny tři podpůrná kolečka (počítá se s jejich náhradou kluznými kovovými pláty), která stabilizují jak pomalý pohyb, tak reciproký pohyb. Manipulátor se zastaví v parkovací poloze (a), přičemž sondy jsou v zákrytu za první stěnou a čekají na reciprokaci.

Reciprokační trubicí ($\emptyset_{vnitřní} = 22 \text{ mm}$) jsou vedeny zprvu kaptonové koaxiální kabely (< 260 °C), ale v pozdějších fázích tokamaku se kvůli vyšším teplotám vakuové nádoby počítá s jejich nahrazením odolnějšími \emptyset 3mm Mineral Insulated Cables (MIC). Při odhadu proudu I < 10 A tekoucí měděným vodičem průměru d = 0,85 mm se vodič ohmicky ohřeje jako

$$\frac{RI^2}{c\varrho \cdot \pi d^2} = 13 \text{ K/s},\tag{3}$$

kde R je odpor mědi, c měrná tepelná kapacita mědi a ρ hustota mědi. Tedy teplota kabelů bude dána zejména teplotou okolí, tudíž pro počátky CU s teplotou komory 250 °C stačí

kaptonové vedení.



Obr. 3: Schématický pohled na HRCP manipulátor ve třech fázích použití. a) Sonda v parkovací pozici čekající na výboj a přibližně 10 až 20 reciprokací. b) Sonda v diagnostickém okénku (možná kontrola i mezi jednotlivými výboji). c) Manipulátor připraven k demontáži sondy.

3.1.2 Real-time ovládání reciprokace

Zjistit v reálném čase pozici separatrix lze pouze přibližně, ale vzhledem k očekávanému růstu tepelného toku na CU (viz. Obr. 4) se v oblasti kolem LCFS žádá přesnost na milimetry. Takto přesné vyhodnocování polohy (tepelného zatížení) vede k mnohem hlubšímu bezpečnému zásunu než v případě, kdy je hlavice nastavena na pevnou a pro každý případ bezpečnou hloubku.

Princip spočívá v měření absorbovaného množství tepla během reciprokace a úpravu hloubky zásunu následující reciprokace. Každý výboj začne s mělkým bezpečným zásunem. Celkové teplo Q absorbované sondou během reciprokace lze určit z měření iontového saturovaného proudu $I_{\text{sat}} = I_{-300V}/(1 - \exp([-300 - V_{\text{fl}}]/T_{\text{e}}))$ a elektronové teploty $T_{\text{e}} = (\phi_{\text{BPP}} - V_{\text{fl}})/2.2$ jako integrál signálu v čase t

$$Q = \int_{\text{reciprokace}} I_{\text{sat}}(t) \cdot T_{\text{e}}(t) dt$$
(4)



Obr. 4: Uvažovaný dvojitě exponenciální profil tepelného toku q_{\parallel} tekoucí podél magnetických siločár na CU v závislosti na vzdálenosti od LCFS. Kde $R_{\rm q} = 4, q_{\parallel}^{\rm LCFS} = 1 \text{ GW/m}^2, \lambda_{\rm q}^{\rm near} = 0.7 \text{ mm}$ [6] a $\lambda_{\rm q}^{\rm main} = 7.0 \text{ mm}$ [8]

Následující zásun bude pomocí servomotoru pomalého pohybu (5-7 mm/s) posunut o

$$\Delta r = \log(-Q/Q_{\text{opt}}),\tag{5}$$

kde Q_{opt} znamená jistou optimální hodnotu přijatého tepla tak, aby v průběhu výboje teplota povrchu sondy nepřekročila její termoemisní limit.

Před návrhem vyhodnocováním signálu přímo ze sond se počítalo se spolehlivější metodou pozorování sond vyhrazenou rychlou CCD IR kamerou. Tím bychom získali přímo teplotu povrchu hlavice i sond a následující postup (úprava hloubky pro další zásun) by byl obdobný. Momentálně není k dispozici žádná dostatečná IR kamera, avšak může být instalována v pozdějších fázích CU.

3.1.3 Profilování průběhu reciprokace

Vzhledem k tomu, že teplota T dosažená během reciprokace roste s časem stráveném v plazmatu, je důležité provést pohyb co nejrychleji. K tomu přispívá zvyšování jak návratového zrychlení *a* manipulátoru, tak jeho maximálně dosažitelná rychlost v_{max} při pohybu, které je dosaženo po $r \sim 10^1$ mm (< 15 cm, délka celého pohybu) pro běžný pneumatický manipulátor. 1D simulace rovnice vedení tepla v čase *t*

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\varrho} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \tag{6}$$

a pohybových rovnic různých profilů zrychlení s fixní dráhou reciprokace 15 cm byla vytvořena s cílem demonstrovat chování systému a nalézt vhodný profil návratového zrychlení. Za materiálové konstanty tepelné vodivosti λ , měrné tepelné kapacity c a hustoty ρ jsme volili teplotně proměnné hodnoty odpovídající grafitovému kompozitu (současných sond) ze skupiny SGL (R8710) [18].



Obr. 5: Srovnání mezi predikovaným chováním (7) závislosti teploty povrchu Tmax sondy na maximální návratové rychlosti a_{max} a 1D simulací vedení tepla pro maximální rychlosti v_{max} od 1(bílá) do 4(modrá) m/s.

První věc, které jsme si všimli bylo stejné chování jako na Linear Servomotor Probe Drive System na tokamaku Alcator C-Mod [4]. Exponenciální nárůst tepelného toku (viz. Obr. 4) způsobí, že teplo obdržené během fáze konstantní rychlosti je zanedbatelné oproti teplu, které získá při obrácení pohybu v plazmatu. Tím pádem můžeme předpokládat závislost teploty povrchu (maximální teploty) $T_{\rm max}$ pouze na návratovém zrychlení *a*, které nám určí dobu strávenou v plazmatu jako $\delta t \sim 1/\sqrt{\delta a}$. Rovněž víme, že teplotní anomálie se v pevném tělese rozplývá (klesne na 1/e z původní hodnoty) jako $\delta T \sim 1/\sqrt{\delta t}$. Z toho můžeme soudit závislost $T_{\rm max}$ na maximálním návratové zrychlení $a_{\rm max}$ jako

$$T_{\rm max} \sim 1/\sqrt[4]{a_{\rm max}} \tag{7}$$

Závislost (7) a minimální ovlivnění T_{max} změnou v_{max} bylo simulací ověřeno na Obr. 5.



Obr. 6: Pohled na posuvný systém reciprokačního pohybu manipulátoru HRCP (XRCP) znázorňující umístění setu předpnutých pružin.

Díky tomu jsme byli schopni navrhnout vylepšení existujícího designu reciprokého pohybu. "Pomalý" v čase rostoucí profil návratového zrychlení, který byl výsledkem použití pneumatických pístů, byl nahrazen téměř konstantním profilem návratového zrychlení o hodnotě 100 g (limit manipulátoru a hlavice pro pohybující se 3 kg hmoty). Vyrovnání bylo způsobeno vložením dodatečného setu předpnutých mechanických pružin (o pevnosti 28,7 kN/m/kg, viz. Obr. 6), které rovněž mohou sloužit jako pojistka při selhání pneumatického řízení, při kterém by došlo k přímému nárazu ocelových konstrukcí manipulátoru. Takové vylepšení nám umožní udržet teplotu pod 1200 °C i při zásunu sondy až 1 mm k LCFS, viz. Obr. 7.



Obr. 7: Simulovaný vývoj veličin sondy během reciprokace za uvážení profilu tepelného toku dle Obr. 4 pro $a_{max} = 100$ g (981 m/s²), $v_{max} = 2,5$ m/s s maximální hloubkou zásunu 1 mm od LCFS.

3.1.4 Radiační chlazení hlavic

Typicky, reciprokace je tak rychlá a výboj tak krátký (v porovnání s časem potřebný k znovu dobytí kondenzátorů/setrvačníků tokamaku), že sondy často spoléhají na tzv. setrvačné chladnutí. To znamená, že dojde ke značnému ohřátí pouze povrchové vrstvy, ale celkový energetický zisk je zanedbatelný vůči tepelné kapacitě sondy. V době mezi výboji má teplo dostatek času, aby prodifundovalo celou hmotou sondy a došlo tak k pouze nepatrnému zvýšení její teploty. Na CU (a budoucích fúzních reaktorech) bude první stěna vyhřáta na 250 °C a v pozdějších fázích až na 500 °C. To limituje spodní teplotu sondy, ke které může mezi výboji zchladnout. Došlo tedy k návrhu pasivního chlazení zářením jako možnost, jak reciprokovat o "500 °C hlouběji".

Uvažovali jsme jednoduchý model válcovité grafitové hlavice, která je různě zahřívána z obou svých konců a chlazena termálním zářením do okolního chladiče, viz. Obr. 8. Vakuová komora o teplotě $T_{\rm komora} = 500$ °C září pouze na přední stranu hlavice o poloměru r = 20 mm, což způsobí ohřev

$$P_{\text{přední}} = \sigma \cdot T_{\text{komora}}^4 \cdot \pi r^2 \cdot \epsilon = 5 \text{ W}, \tag{8}$$

kde δ je Stefanova-Boltzmannova konstanta [3]
a $\epsilon=0.2$ je emisivita wolframu. Podpůrná

trubice z nerezavějící oceli s poloměrem R = 5 cm a tloušťkou D = 2 mm je izolována po délce 1 m pomocí Multi-Layer Insulation (několik vrstev odrážející tepelné záření okolí). Za předpokladu teplotního spádu podél izolované trubice jako $\nabla T = 500$ K/m bude ohřev ze zadní strany hlavice

$$P_{\text{zadn}i} = (D \cdot 2\pi R) \cdot \lambda_{\text{SS}} \cdot \nabla T = 4 \text{ W}, \tag{9}$$

kde $\lambda_{\rm SS}$ je tepelná vodivost nerezavějící oceli. Celkově se tedy hlavice ohřívá P = 11 W, které musejí být chlazeny. Radiační absorbér (chladič) délky $l_{\rm chladič} = 50$ cm chlazen na teplotu $T_{\rm chladič} = 30$ °C je schopen poskytnout dostatečný odtok tepla pro hlavici o teplotě $T_{\rm hlavice} = 120$ °C,

$$\sigma \cdot [T_{\text{chladič}}^4 - T_{\text{hlavice}}^4] \cdot (l_{\text{chladič}} \cdot 2\pi r) \cdot \epsilon = 11 \text{ W} = P \tag{10}$$

Korekce na teplotní gradient uvnitř hlavice dlouhé $l_{\text{hlavice}} = 10$ cm lze vypočíst z rozdílu tepelných toků $P_{\text{zadní}}$ a $P_{\text{přední}}$, který je přenesen přes teplotní rozdíl pouhých $\delta T = 2$ °C,

$$(d \cdot 2\pi r) \cdot (\delta T / l_{\text{hlavice}}) \cdot \lambda_{\text{C}} = 1 \text{ W} = P_{\text{přední}} - P_{\text{zadní}}, \tag{11}$$

kde $\lambda_{\rm C}$ je tepelná vodivost uhlíkového kompozitu o tloušťce d = 1 cm. Maximální teplota hlavice při použití chladiče vychází tedy přibližně na ≈ 120 °C, což nám dovolí při užití předchozích vylepšení zasunout sondu i za LCFS.



Obr. 8: Původ proměnných ve zjednodušeném modelu pasivně chlazené hlavice (bílé pruhy: chladič o teplotě $l_{chladič} = 30$ °C) jejím tepelným zářením v parkovací pozici.

3.1.5 Diamantová ochrana hlavic a sond

Uhlíková technologie i přes svou výjimečnou tepelnou odolnost je nekompatibilní (silné odprašování uhlíku a absorpce radioaktivního tritia) s budoucím fúzních výzkumem a enviromentálně bezpečným fúzním reaktorem. V tomto duchu se musí přizpůsobit i současné grafitové hlavice a sondy tokamaku COMPASS, které v zájmu užívání na CU musí být minimálně pokryty vrstvou wolframu. Bohužel, i za použití wolframu může dojít k roztavení (bod tání 3422 °C), či popraskání a deformaci (bezpečná hranice 1200 °C). To může vést

k deformaci sond (nejistá sběrná plocha sond), jejich zkratu, narušení udržení plazmatu (při odloupnutí/ukápnutí makroskopického kousku) a uhlíkové znečištění komory (pokud použito jako krycí vrstva uhlíku).

Tomu by mohlo zabránit poslední vylepšení, které spočívá v dalším pokrytí sond a hlavic vrstvou diamantu. Podobná technologie byla testována již na tokamaku EAST [12], kde grafitová hlavice sondy byla pokryta vrstvou elektricky izolujícího ultra-nanocrystalline diamantu (UNCD). Po řadě experimentů bylo usouzeno, že UNCD vrstva dokáže výrazně utlumit odprašování grafitu (i při hlubokém zásunu za LCFS na tokamaku EAST), ale po několika výbojích se UNCD vrstva začala odlupovat.

Z Fyzikálního ústavu AV ČR nám bylo nabídnuto využití zcela nové metody syntézy diamond-silicon carbide kompozitních vrstev [14]. Od ní očekáváme dvě hlavní vylepšení oproti technologii použité na tokamaku EAST.

- Wolframová mezi vrstva (či celek) může tvořit silné WC vazby z diamantovou vrstvou, tedy vylepšit makroskopickou odolnost ochranné vrstvy. Pokud by se vrstva nanášela na čistě uhlíkovou sondu, tak by se použila právě nová metoda s nanesením SiC mezi vrstvy (teplot tání 2 830 °C) pro zvýšení přilnavosti vrstvy k povrchu.
- 2. Bórem dopovaný diamant lze užít jako elektrický vodivá ochrana přímo na sondy.

První výzkum na kompatibilitu této technologie s tokamakovou fúzí bude tématem magisterské diplomové práce v roce 2022.

3.2 Šikmý reciproký manipulátor

Umístění (a tedy účel) druhého reciprokého manipulátoru nebylo triviální. Nakonec, zejména z důvodu jeho velkých rozměrů, které musí být alespoň 2× větší než vzdálenost od zvoleného portu do místa reciprokace, se zvolil spodní port s 12° náklonem od horizontální roviny, který míří na pozici mezi plánovaným X-bodem a vnějším strike-point. Tím manipulátor dostal označení XRCP.

XRCP svým umístěním může skenovat < 15 cm v oblasti divertoru, kde může zkoumat oddělení plazmatu od interakce s komorou pomocí neutrálního plynného média (plasma detachment). Tím XRCP bude schopna zkoumat kompletně jinou fyziku než HRCP, ale v případě scénářů plazmatu s divertorem v horní části je XRCP schopna poloidálně rozšířit skenovanou oblast HRCP. Další výhodou takového umístění bude sounáležitost v experimentech s testováním nových prototypů dlaždic na třetím manipulátoru. Při zkoumání vypařování tekutých kovů, či jiných konceptů bude XRCP toroidálně hned za zkoumanou dlaždicí, bude tedy přímo měřit vlastnosti plazmatu z ionizovaných výparů dlaždic.

Design XRCP je vesměs podobný manipulátoru HRCP, viz. Obr. 9. Postrádá ovšem nutnost proniknout až za LCFS vzhledem k tomu, že se nachází až pod X-bodem. Tím

jeho design zprvu nepočítá s úpravami zmíněných výše u HRCP. Nicméně, s plně funkčním spodním divertorem se počítá až o mnoho měsíců později od prvního plazmatu (kdy se přibližně začlenění HRCP), je tedy možné příslušné úpravy později provést i pro XRCP.



Obr. 9: Schématický pohled na XRCP manipulátor ve třech fázích použití. a) Sonda v parkovací pozici čekající na výboj a přibližně 10 až 20 reciprokací. b) Sonda v diagnostickém okénku (možná kontrola i mezi jednotlivými výboji). c) Manipulátor připraven k demontáži sondy.

3.3 Manipulátor dlaždicových prototypů

Třetí manipulátor, s označením DivMat, má v principu sloužit k úplně jinému účelu než předchozí dva. Místo rychlého opakovaného zasouvání hlavic se sondami do plazmatu bude zasouvat prototypy komponent vystavených plazmatu (PFC) z různých materiálů a kompozitů na místo jedné z divertorových dlaždic. Přičemž důležité namísto rychlého umístění je dostatečně pevná fixace a přesnost usazení.

Při návrhu jsme byli řízeni koncepčním návrhem konstrukce divertoru a okolí, který nám udával jednak maximální velikost možných terčíků, ale taky třeba jestli nebude nutné



Obr. 10: Schématický pohled na DivMat manipulátor ve třech fázích použití. a) Terčík v parkovací pozici čekající na výboj. b) Terčík v diagnostickém okénku (možná kontrola i mezi jednotlivými výboji). c) Manipulátor připraven k demontáži terčíku.

terčík při transportu sklopit podobně jako na tokamaku ASDEX Upgrade [7]. Prozatímní design s terčíkem o velikosti 7 cm tuto úpravu zatím nevyžaduje. Stejně tak doba výboje trvajícího méně než 2 vteřiny vylučuje užití aktivního chladícího systému, protože dle parabolického zákonu šíření tepla v prostoru [10] stihne 1/e z teplotního píku na povrchu dlaždice dojít za $t_{výboj} = 2$ s pouze do vzdálenosti

$$r_{\rm T}(t_{\rm výboj}) = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho c}} \cdot t_{\rm výboj} \sim 10^{-3} \text{ m (platí pro většinu kovů)},$$
(12)

kde λ je tepelná vodivost, ϱ hustota a c tepelná kapacita. Takové úvahy značně zjednodušily design do stavu na schématech Obr. 10, kde je vidět obdobná konstrukce pomalého pohybu jako u reciprokých manipulátorů. Namísto podpůrných koleček (plátů) je dlaždice nesena samotnou trubkou z nerezavějící oceli, která se při zatížení plně wolframovou dlaždicí (2,3 kg) za teploty 500 °C ohne na maximální vzdálenosti pouze o ≈ 13 mm. Před parkovací pozicí Obr. 10a se nosná trubka s dlaždicí navede pomocí plošiny (upevněné ke konstrukci tokamaku) do čtyřech kotevních bodů. Očekávané ohromné proudy tekoucí skrze dlaždici v silném magnetickém poli CU při neočekávané ztrátě udržení (např. Vertical Displacement Event) mohou vyvolat sílu $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$, která by přidala zatížení až 100 N/mm podél manipulátoru. K minimalizaci této síly je molybdenové uzemnění umístěno těsně (≈ 40 mm) za dlaždicí a kotvami svedeno do uzemnění tokamaku, viz. Obr. 11.

Nicméně, vedlejší záměr manipulátoru DivMat je testování tekutých kovů v prototypech



Obr. 11: Konstrukční detaily manipulátoru DivMat. a) Hlava manipulátoru s posuvným držákem dlaždic podepřená naváděcí platformou a Mo zemnění držáku. b) Diagnostický kříž s borosilikátovým okénkem DN150, který umožňuje diagnostiku dlaždic a kontrolu polohy usazené dlaždice pomocí integrovaného pravítka. c) Magnetická průchodka manuálního motoru otáčí vnitřním závitem a vytváří posun tlačné tyče. Tlačná tyč má čtvercový průřez proti vlastnímu otáčení.

kapilárních porézních systémů [15]. Získané zkušenosti z experimentu s tekutými kovy (Li, Li + Sn) na tokamaku COMPASS v ELMy H-módu [5] nám ukázali, že pokud chceme dosáhnout nastolení tepelné rovnováhy terčíku při tepelném zatížení odpovídající divertoru EU DEMO bez detachmentu [9], tak musíme zajistit dodatečný náklon α terčíku. Stejný problém se řešil na tokamaku COMPASS pomocí vysouvání/zasouvání terčíku ve tvaru válce, tím se s výškou měnil sklon dopadajících magnetických siločár (tedy i tepelný tok $q_{\perp} = q_{\parallel} \cdot \sin(\alpha)$). Proto jsme zvolili obdobné řešení i zde (viz. Obr. 12). Namísto mechanismu reciprokého pohybu se zde nachází manuálně ovládaná rotační průchodka, která posouvá vnitřní tyčí a následně tak i vysouvá terčík na konci manipulátoru až o 2 cm s přesností 1 mm (k tomu dodatečně slouží zabudované pravítko pozorovatelné okénkem).

3.4 Finální rozmístění

Původní úvahou bylo rozmístit manipulátory do sousedících portů, aby pouze jedna rychlá infračervená (či viditelná) kamera byla schopna pozorovat a kontrolovat všechny najednou. Nakonec, kvůli nutnosti vyhovět požadavkům ostatních diagnostických systémů, byl XRCP přesunut toroidálně o několik portů dál, viz. Obr. 13. Vzhledem k velice malému poměru poloidálního magnetického pole $B_{\rm p}$ ku toroidálnímu $B_{\rm t}$ v oblasti divertoru (na X-bodu je $B_{\rm p}/B_{\rm t} = 0$) toroidální posun nevadí, protože veškeré vypařené nečistoty z dlaždic manipulátoru DivMat se v mžiku (~ 10¹ mm) ionizují a budou tyto siločáry následovat (jak bylo pozorováno v experimentu s tekutými kovy na tokamaku COMPASS [5]).



Obr. 12: Manipulátor DivMat s prototypem LMD dlaždice. a) Cylindrický tvar CPS způsobí při vysunutí dlaždice v nejzatíženějším místě tepelné zatížení odpovídající budoucím fúzním reaktorům. Kolem LMD se vytvoří oblak excitovaného Li [9], který je nasáván čerpacím systémem tokamaku, či kondenzován na přilehlém kondenzátoru (zobrazen v poloidálním řezu b)) o teplotě mezi 181 °C (teplota tání Li) a 500 °C (teplota okolní první stěny).



Obr. 13: Uspořádání všech tří manipulátorů a) kolem vakuové nádoby CU, b) v poloidálním řezu vakuovou komoru CU a c) modelovaný záznam z IR kamerového systému CU.

4 Závěr

Byl navržen systém tří manipulátorů zakládající se na stejném podkladu dvou nedokončených reciprokých manipulátorů z roku 2019, které umožňují výměnu svých hlavic (terčů) mezi výboji. Nedokončeným manipulátorům (později HRCP a XRCP) byla prodloužena většina komponent pomalého pohybu tak, aby vyhovovala tokamaku CU, přičemž pneumatický reciprokační systém byl zachován. V této práci bylo navrženo několik vylepšení manipulátoru HRCP (viz. sekce 3.1.2 až 3.1.5) se záměrem umožnit rychlý zásun sond až za

LCFS v plazmatu o vysokých hustotách s tepelným tokem podél magnetického pole až $q_{\parallel}^{\rm LCFS} \approx 1 \ {\rm GW/m^2}.$

Třetí manipulátor PFC prototypů (DivMat) umožňuje dopravit a ukotvit testované dlaždice do přesně dané pozice. Pomocí dalšího šroubového mechanismu, který nahrazuje reciproký mechanismus, je schopen mezi výboji dodatečně přizpůsobit polohu dlaždice vzhledem ke zbytku divertorového uspořádání až do výchylky 2 cm s přesností 1 mm. Využití takové posunu se předpokládá zejména u experimentů s tekutými kovy, kde na speciálně tvarovaných dlaždicích CPS lze výsunem měnit dopadající tepelný tok. DivMat počítá se spoluprací manipulátoru XRCP, avšak instalace a spuštění obou manipulátorů musí nejprve počkat na dokončení spodního divertoru CU.

Návrh všech tří manipulátorů je uložen v souborech softwaru CATIA na serverech Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i.. Jejich dokončení čeká na poslední úpravy spočívající v konstrukci podpůrných systémů manipulátorů a úprav způsobených měnícím se designem divertoru tokamaku. Stávající design je rovněž publikován v článku [11].

Použitá literatura

- J. Adamek, et al.: Fast measurements of the electron temperature and parallel heat flux in ELMy H-mode on the COMPASS tokamak. Nuclear Fusion, 57, no. 2, 2017
- [2] J. Adamek, et al.: Ion temperature measurements in the tokamak scrape-off layer with high temporal resolution. Nuclear Fusion 61 (2021) 036023
- [3] I. A. Bláhová: Absolutně černé těleso, Planckův vyzařovací zákon, Stefan-Boltzmannův zákon, Wienův posunovací zákon. [online], [cit. 1.5.2020], Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/~blahova/F1KME/30.pdf
- [4] D. Brunner, et. al.: Linear servomotor probe drive system with real-time self-adaptive position control for the Alcator C-Mod tokamak. Rev. Sci. Instrum. 88, 073501 (2017)
- R. Dejarnac, et al.: Overview of power exhaust experiments in the COMPASS divertor with liquid metals. (2020) Nuclear Materials and Energy. 25
- [6] T. Eich, et al.: Scaling of the tokamak near the scrape-off layer h-mode power width and implications for ITER. Nuclear Fusion 53 (2013), no. 9, 093031..
- [7] A. Herrmann, et al.: A large divertor manipulator for ASDEX Upgrade. Fusion Engineering and Design, 98-99, 1496-1499, (2015)
- [8] J. Horacek, et al.: Scaling of L-mode heat flux for ITER and COMPASS-U divertors, based on five tokamaks 2020 Nucl. Fusion 60 066016
- [9] J. Horáček, et. al.: Predictive modelling of liquid metal divertor: from tokamak COM-PASS towards Upgrade, Phys. Scr. 96 (2021) 124013: https://doi.org/10.1088/ 1402-4896/ac1dc9
- [10] S. Lukeš: Analýza prvního experimentu s tekutými kovy na divertoru tokamaku COM-PASS. Bakalárská práce, 2020
- [11] S. Lukeš, et al.: Design of Reciprocating Probes and Material-Testing Manipulator for Tokamak COMPASS Upgrade, Odesláno k publikaci v Journal of Instrumentation (JINST)
- [12] C. Ionita, et al.: Diamond-Coated Plasma Probes for Hot and Hazardous Plasmas. Materials 2020, 13(20), 4524
- [13] O. Semerák: Speciální teorie relativity. skripta ke stejnojmenné přednášce MFF UK, Praha 2012
- [14] A. Taylor, et. al.: Synthesis and properties of diamond silicon carbide composite layers, Journal of Alloys and Compounds 800 (2019) 327-333

- [15] A. V. Vertkov, et al.: In-Vessel Devices Based on Capillary-Porous Systems with Liquid Metal for a Stationary Tokamak. Plasma Phys. Rep. 44, 664 (2018)
- [16] P. Vondráček, et al.: Preliminary design of the COMPASS upgrade tokamak. Fusion Engineering and Design, 169, 112490, (2021)
- [17] J. Wesson, et al.: Tokamaks. Oxford: Clarendon Press, 2004
- [18] E. Zhmurikov, et al.: Electronic structure and physical properties of 13C carbon composite. arXiv:1510.07214 [cond-mat.mtrl-sci], (2015)
- [19] Institute of Plasma Physics of CAS: The COMPASS tokamak. [online], [cit. 28.4.2020], Dostupné z: http://www.ipp.cas.cz/vedecka_struktura_ufp/tokamak/ tokamak_compass/
- [20] International Thermonuclear Experimental Reactor: The ITER tokamak. [online], [cit. 29.4.2020], Dostupné z: https://www.iter.org/
- [21] Physical Measurement Laboratory of NIST: International System of Units. [online], [cit. 20.5.2019], Dostupné z: https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?file: //clsearch_for=universal_in!