

Vysokoteplotní plazma na tokamaku GOLEM

Abstrakt: Cílem úlohy je základní seznámení s fyzikálně-technologickou problematikou generace vysokoteplotního plazmatu v nádobách s magnetickým udržením – tokamacích – a změření základních fyzikálních parametrů popisujících plazma: proud plazmatem I_p , elektronovou teplotu T_e , dobu udržení τ_E a parametry, při nichž dochází k průrazu neutrálního plynu do plazmatu. Úloha také slouží k nácvičku dálkového řízení komplexního experimentálního zařízení, správnému časovému rozvržení experimentu a vytěžení užitečné informace z velkých objemů experimentálních dat.

1 Pracovní úkoly

1. V domácí přípravě se naučte manipulaci se vzdálenými datovými soubory [3]. Pokud máte možnost, přineste si s sebou na měření notebook, na kterém máte tyto funkce manipulace se vzdálenými soubory dat zprovozněné. Na stejné stránce najdete přidělené web rozhraní, ze kterého budete ovládat tokamak. Seznamte se s ním.
2. V laboratoři tokamaku se seznamte fyzicky s tokamakem GOLEM a zmapujte na něm jeho základní prvky: komoru, transformátorové jádro, cívky toroidálního magnetického pole, primární cívky, čerpací systém, energetický zdroj, kondenzátorové baterie, systém napouštění pracovního plynu, řídicí systémy, datový sběr a server. S pomocí asistenta proveďte funkci jednotlivých komponent infrastruktury tokamaku:
 - (a) vypněte a zapněte čerpání tokamaku,
 - (b) napusťte do tokamaku pracovní plyn,
 - (c) vyzkoušejte předionizační trysku.
3. V laboratoři tokamaku osad'íte tokamak základními diagnostickými prostředky (drát na měření napětí na závit U_l , cívečka měření toroidálního magnetického pole B_t , Rogowského pásek pro měření I_p a fotodiodu s H_α filtrem), napojte vše na 4-kanálový osciloskop Tektronix (resp. na datové sběry) a zaznamenávejte časové vývoje signálů jednotlivých diagnostik. Proveďte následující seznamovací experimenty (pro přístup k datům na vzdáleném serveru použijte metodu z pracovního úkolu č.1):
 - Vygenerujte na tokamaku samostatné toroidální elektrické pole E_t a zaznamenejte časový průběh napětí na závit $U_l(t)$. Z jeho průběhu a signálu z Rogowského pásku $I_{tot}(t)$ odhadněte z Ohmova zákona v prvním přiblížení odpor komory R_{ch} se zanedbáním její indukčnosti.
 - Vygenerujte na tokamaku samostatné toroidální magnetické pole B_t a zaznamenejte časový průběh napětí na měřicí cívce $U_B(t)$.
 - Vytvořte komplexní zadání pro výboj (pracovní plyn + předionizace + toroidální elektrické pole + toroidální magnetické pole) v tokamaku a zadejte k provedení. Z napětí na závit $U_l(t)$ a průběhu proudu na Rogowského pásku $I_{tot}(t)$ vypočítejte časový vývoj proudu plazmatem $I_p(t)$ se zanedbáním jeho indukčnosti. Následně znázorněte časový vývoj elektronové teploty $T_e(t)$.

Všechny závislosti získané z improvizované diagnostiky srovnávejte s původním diagnostickým osazením tokamaku GOLEM.
4. Vzdáleným řízením proveďte 10 výbojů, ve kterých se budete snažit pokrýt maximálně prostor parametrů (zadávejte co nejpestřejší spektrum parametrů výbojů), přičemž se pokuste dosáhnout co nejvyšší elektronové teploty.

5. Doma, při zpracovávání výsledků vytvořte tabulku 5 výstřelů s nejvyšší T_e a u každého uveďte vámi vypočtené parametry: délku výboje, maximální proud plazmatem, maximální elektronovou teplotu, maximální ohmický příkon, maximální energii plazmatu a dobu udržení v době maxima energie plazmatu.

2 Pomůcky

Pomůcky: Zařízení pro generaci a udržení vysokoteplotního plazmatu – tokamak GOLEM, pracovní plyn – vodík, U_t cívka, B_t cívka, Rogowského pásek, fotodioda, H_α filtr, měrka vakua, systémy datových sběrů, osciloskop Tektronix.

3 Teoretický úvod

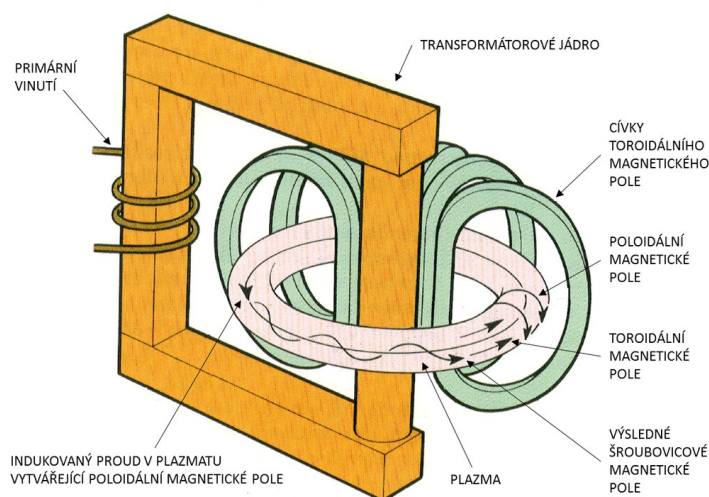
Zdůrazňujeme, že následující výklad je velmi strohou zkratkou fyzikálně-technologické problematiky zvládnutí řízené termojaderné fúze v nádobách s magnetickým udržením (*tokamacích*) v pozemských podmínkách.

3.1 Plazma

Plazma je kvazineutrální plyn vzniklý ionizací atomů neutrálního plynu. Skládá se tedy ze dvou hlavních složek, elektronů a iontů. Většina iontů pochází z pracovního plynu, např. vodíku. V reálném plazmatu je přítomné také malé, ale nezanedbatelné množství nečistot, jako je dusík, kyslík anebo uhlík. Vlastnosti plazmatu se v mnoha ohledech liší od klasického plynu, především kvůli rozdílnému typu interakcí. Zatímco v klasickém plynu dochází zpravidla k lokálním srážkám pouze dvou částic, jednotlivé části plazmatu spolu v tokamaku interagují prostřednictvím dalekodosahových magnetických a elektrických polí, takže na každou částici najednou působí velké množství jiných částic na vzdálenosti řádově až metrů. Kvazineutralitou se rozumí, že makroskopický náboj plazmatu je nulový, a kolektivní chování poukazuje na reakci plazmatu na přítomnost elektromagnetických polí jako celek. Důsledkem tohoto chování jsou unikátní vlastnosti plazmatu, z nichž mnoho stále není zcela pochopeno, a které jsou součástí intenzivního vědeckého výzkumu.

3.2 Tokamak

Hlavním cílem fúzního výzkumu je vytvoření a udržení vysokoteplotního plazmatu. Mělo by zde docházet k jaderné přeměně – sloučení lehkých prvků na těžší za uvolnění velkého množství energie působením jaderných vazebných sil. Takové zařízení by mohlo v budoucnu sloužit jako prakticky nevyčerpatelný, bezpečný a co do odpadů téměř neškodný zdroj energie pro lidstvo. Technologické řešení tohoto úkolu vyžaduje splnění několika nesnadných úkolů: i) zahřátí paliva na požadovanou teplotu řádově miliónů stupňů Celsia, čehož dosahujeme aplikací ohmického ohřevu, ohřevem elektromagnetickými vlnami o vhodné frekvenci a také vstřelováním svazků velmi urychlených neutrálních částic a ii) zabránění kontaktu takto horké látky (plazmatu) se stěnou reaktoru, čehož dosahujeme vhodnou konfigurací komory a tvaru magnetického pole. Typickým zařízením na generaci a studium vysokoteplotního plazmatu je *tokamak* (Obr. 1). Jde o transformátor, jehož jediným sekundárním závitem (nakrátko) je vysokoteplotní – a tedy dobře vodivé – plazma. Plazma je uzavřeno ve vakuové nádobě tvaru



Obr. 1: Základní schéma tokamaku. Převzato z [4].

toroidu, na které je navinuta cívka vytvářející prstencové (toroidální) magnetické pole. Základní princip fungování tokamaku je založen na aplikaci Maxwellových rovnic v integrálním tvaru [11].¹ Proud I_{PC}^2 v primáru transformátoru generuje magnetické pole $\mathbf{B}_{\text{transf}}$, resp. magnetický indukční tok Φ_{transf} a ten je za pomoci železného jádra vyveden a koncentrován do středu toroidu jako Φ_{tor} . Pokud se proud I_{PC} mění, bude se také měnit magnetický indukční tok Φ_{tor} ve středu toroidu a dle Faradayova zákona dá vzniknout elektromotorickému napětí \mathcal{E}^{ind} , resp. toroidálnímu elektrickému poli \mathbf{E}_t (na Obr. 1 ve směru černé šipky uprostřed):

$$\mathcal{E}^{\text{ind}} = \oint_{l_{\text{tor}}} \mathbf{E}_t \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_{\text{tor}}}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_{S_{\text{tor}}} \mathbf{B}_{\text{tor}} \cdot d\mathbf{S}. \quad (1)$$

Při dosažení jeho dostatečné intenzity dojde k průrazu velmi řídkého pracovního plynu do plazmatu, což je lavinový proces s kladnou zpětnou vazbou: s rostoucím proudem plazmatu I_p , případně příslušnou proudovou hustotou \mathbf{j}_p , roste dle Jouleova-Lenzova zákona teplota, čímž se zlepšuje vodivost plazmatu a dále narůstá proud I_p až do řádů $\sim 10^3 - 10^7$ A. Dynamickou rovnováhu nakonec ustaví rostoucí ztráty tepla. Během výboje je plazma udržováno v centru komory (plazma se nesmí komory dotýkat) Lorentzovou silou $\mathbf{j}_p \times \mathbf{B}$. Požadovaná (šroubovicová) stabilní konfigurace magnetického pole $\mathbf{B} = \mathbf{B}_p + \mathbf{B}_t$ vzniká kombinací poloidálního³ magnetického pole \mathbf{B}_p vytvářeného proudem plazmatu I_p a toroidálního magnetického pole vytvářeného soustavou N vnějších cívek. Tyto cívky jsou v pravidelných rozestupech namotány na toroidální komoru a tvoří tak prstencově svinutý solenoid o poloměru R_0 . Proud I_{TFC}^4 vedený v cívkách vytváří podle Ampérova zákona toroidální magnetické pole \mathbf{B}_t :

$$\oint_{l_{\text{tor}}} \mathbf{B}_t \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{TFC} \quad \Rightarrow \quad B_t = \frac{\mu_0 N I_{TFC}}{2\pi R_0}. \quad (2)$$

Na nabitě částice plazmatu – ionty a elektrony – tato Lorentzova síla působí tak, že zakřivuje jejich trajektorie do šroubovic okolo magnetických siločar (viz *Měrný náboj elektronu*, úloha 12 [5]) a zároveň působí proti kinetickému tlaku horkého plazmatu magnetickým tlakem $\sim B^2/2\mu_0$, čímž udržuje horké plazma mimo kontakt s komorou reaktoru.

3.3 Základní parametry plazmatu – elektronová teplota T_e , elektronová hustota n_e

Jednou z jednoduše měřitelných a celkem dobře prozkoumaných veličin je elektrický odpor plazmatu. Odpor čistého, plně ionizovaného plazmatu R_p závisí pouze na elektronové teplotě T_e a nezávisí na hustotě plazmatu. Tato závislost je popsána Spitzerovou formulí. Přesný předpis není až tak podstatný, viz např. [7] nebo [2]. Podstatné je, že odpor plazmatu klesá s elektronovou teplotou:

$$R_p \propto T_e^{-\frac{3}{2}}. \quad (3)$$

Proto není možné ohřívat plazma ohmickým ohřevem neomezeně, neboť při vysokých teplotách má větší vodivost než čistá měď.¹

Střed plazmatu má vyšší teplotu a tedy nižší rezistivitu s vyšší proudovou hustotou než okrajové plazma. Měřená celková rezistivita $R_p(t)$, která je inverzí objemového integrálu vodivosti, smazává tuto informaci o rozdílech teplot. Protože v GOLEMovi neměříme rutinně profil elektronové teploty, budeme předpokládat parabolický průběh od centra k okraji. Za tohoto předpokladu lze pro GOLEM odvodit vztah pro centrální elektronovou teplotu v elektronvoltech:⁵

$$T_e(0, t) = \left(0.7 \cdot \frac{I_p(t)}{U_l(t)} \right)^{2/3}, \quad [\text{eV}; \text{A}, \text{V}] \quad (4)$$

¹Zbytek této pasáže je spíše pro potěchu ducha a není nezbytný pro potřeby splnění této úlohy.

²PC znamená Primary Coils.

³okolo plazmatického sloupce/vlákná

⁴TFC jako Toroidal Field Coils

⁵Mezi teplotou v elektronvoltech a v Kelvinech platí vztah $1 \text{ eV} \approx 11600 \text{ K}$.

kde $I_p(t)$ je proud tekoucí plazmatem v ampérech a U_l je napětí na závit v transformátoru ve voltech.

Druhým základním parametrem plazmatu je elektronová hustota. V současné době není na tokamaku GOLEM funkční diagnostika pro měření této hustoty. K řádovému určení průměrné hustoty se ale dá použít stavová rovnice ideálního plynu za předpokladu, že hustota je konstantní během výboje a disociací molekuly vodíku získáme 2 elektrony. Přímo ze stavové rovnice potom plyne

$$\bar{n} = 2 \frac{p_0}{k_B T_{ch}}, \quad [\text{počet částic/m}^3, \text{Pa, K}] \quad (5)$$

kde \bar{n} je průměrná hustota, p_0 je tlak neutrálního plynu v komoře a T_{ch} je pokojová teplota.

3.4 Energetická rovnováha plazmatu – ohmický příkon P_{OH} , energie plazmatu W_p a doba udržení τ_E

Jediným zdrojem ohřevu plazmatu na tokamaku GOLEM je ohmický ohřev vznikající průchodem proudu plazmatem s konečnou vodivostí, resp. odporem plazmatu R_p . Časový vývoj ohmického příkonu P_{OH} ve stacionární fázi výboje (přiměřeně konstantní proud plazmatem I_p) je dán vztahem

$$P_{OH}(t) = R_p(t) \cdot I_p^2(t) = U_l(t) \cdot I_p(t). \quad (6)$$

Celkovou tepelnou energii plazmatu spočteme z ekvipartičního teorému:

$$W_{th} = \frac{3}{2} k_B \int (n_e T_e + n_i T_i) dV \approx 3 k_B \int n_e T_e dV. \quad (7)$$

Pro dostatečně čisté vodíkové plazma a dostatečně vysokou hustotu můžeme předpokládat rovnost teplot elektronů a iontů a také rovnost hustot elektronů a iontů. Uvažujeme-li parabolický profil elektronové teploty a konstantní hustotu, lze celkovou energii plazmatu W_p vypočítat ze vzorce

$$W_{th}(t) = \frac{1}{3} \bar{n} k_B T_e(0, t) V, \quad [\text{J; m}^{-3}, \text{K, m}^3] \quad (8)$$

kde V je objem plazmatu, \bar{n} průměrná elektronová hustota, k_B Boltzmannova konstanta a $T_e(0, t)$ centrální elektronová teplota. Tento vztah dává pouze řádový odhad energie a to z důvodu velmi hrubého odhadu hustoty. Na základě znalosti energie plazmatu W_{th} a ohmického příkonu P_{OH} lze ze zákona zachování energie spočít energetické ztráty plazmatu

$$P_{\text{loss}}(t) = P_{OH}(t) - \frac{dW_{th}}{dt} \quad (9)$$

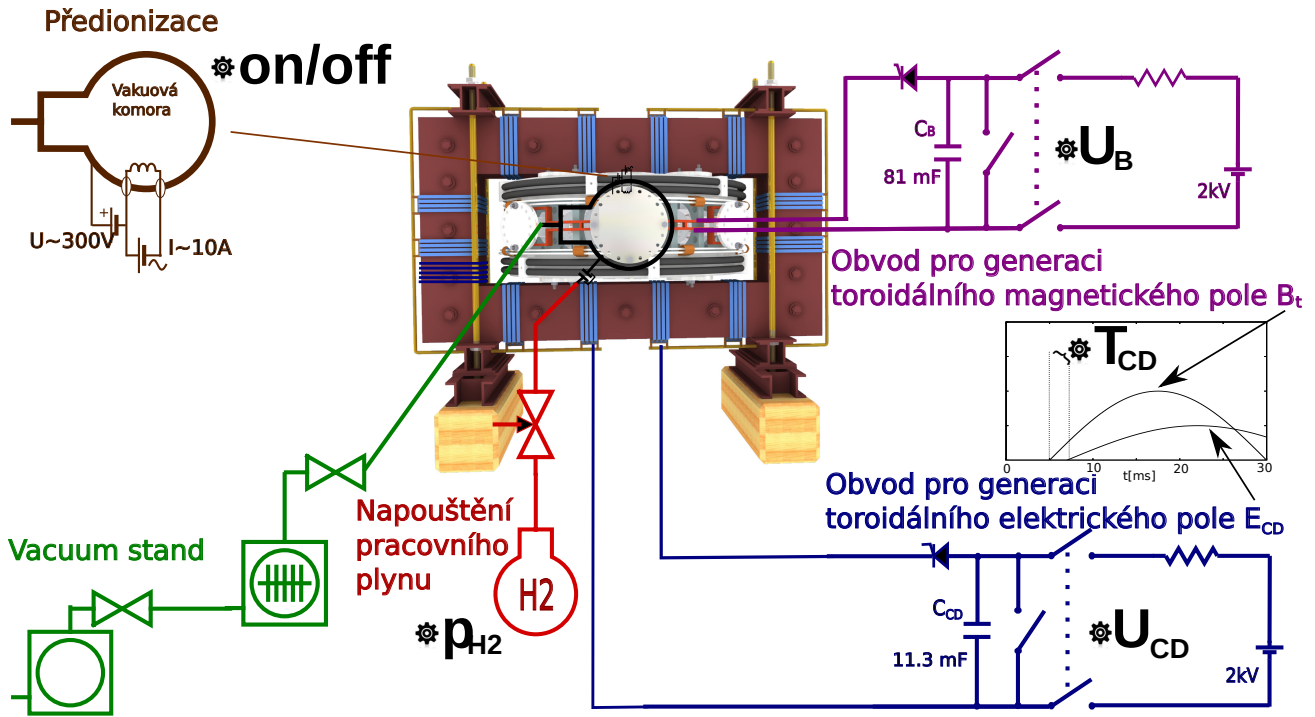
a následně i dobu udržení energie definovanou jako

$$\tau_E(t) \equiv \frac{W_{th}(t)}{P_{\text{loss}}(t)}. \quad (10)$$

V momentě maxima energie plazmatu je člen s derivací v rovnici (9) roven 0, tudíž ohmický příkon P_{OH} je roven ztrátám P_{loss} .

Doba udržení plazmatu je důležitým parametrem popisujícím globální energetickou rovnováhu plazmatu a představuje charakteristickou dobu vychladnutí plazmatu $P_{\text{loss}} = W_{th}/\tau_E$. Pokud by $\tau_E(t)$ bylo konstantní, po vypnutí ohřevu by plazma chladlo exponenciálně s touto časovou konstantou.

Dosažení vyšších dob udržení je středem zájmu tokamakového výzkumu. Čas udržení na velkých tokamacích je 0.1 – 1 s, na tokamaku GOLEM by měl být menší než 1 ms.



Obr. 2: Schéma tokamaku GOLEM s naznačeným průběhem vybití kondenzátorových baterií a zobrazením nastavitelných parametrů experimentu.

4 Experimentální uspořádání a postup měření

4.1 Tokamak GOLEM – technologické schéma

Minimalistickým cílem tohoto zařízení je současná generace plazmatu s proudem $I_p \sim 10^3$ A za účelem jeho ohřevu a toroidálního magnetického pole $B_t \sim 3 \cdot 10^{-1}$ T za účelem jeho udržení. K tomuto účelu se na tokamaku GOLEM před výbojem po jistou dobu nabíjí dvě kondenzátorové baterie (C_B a C_{CD})⁶ a současně se plní komora pracovním plynem - vodíkem. Takto uložená energie v kondenzátorech se impulzně během několika desítek milisekund vybijí proudem I_{TFC} do 28 cívek generace toroidálního magnetického pole B_t a dále proudem I_{PC} do cívek primáru transformátorového jádra generující toroidální elektrické pole E_t . Takto se vytvoří potřebná, pro tokamak charakteristická (Obr. 1) konfigurace elektromagnetického pole E_t a B_t , jejímž působením se může zažehnout a po nějakou dobu udržet plazmatický výboj. Schéma celého experimentu a jeho popis včetně nastavení a doporučených ovládacích hodnot jsou na Obr. 2 a v Tab. 2.

Velký poloměr komory	$R_0 = 0,4$ m
Malý poloměr komory	$r_0 = 0,1$ m
Poloměr plazmatu (limiterový)	$a = 0,085$ m
Toroidální magnetické pole	$B_t \approx 0,3$ T
Počet cívek generujících B_t	$N = 28$
Toroidální magnetické pole	$B_t \approx 0,3$ T
Proud plazmatem	$I_p \approx 1$ kA
Délka výboje	$\tau \approx 10$ ms
Centrální elektronová teplota	$T_e \approx 40$ eV

Tab. 1: Základní parametry tokamaku GOLEM.

4.2 Tokamak GOLEM – základní diagnostika

Nezákladnější diagnostika plazmatu je založená na měření magnetických polí a magnetického toku v blízkém okolí plazmatu. Proto je každý tokamak vybaven sadami speciálních cívek, ve kterých se vlivem změn magnetického pole v průběhu výboje indukuje napětí. Vztah mezi napětím U_z a

⁶ B = magnetické pole, CD = current drive – vlečení proudu

Scénář provedení výboje	Technologie	Nastavení	Doporučené hodnoty
Vyčerpání komory	Dvoustupňový vakuový systém (rotační a turbomolekulární vývěva) čerpající komoru na tlak ≈ 1 mPa.	automatické	–
Napustit pracovní plyn	Standardní průmyslová láhev s vodíkem, napojená přes počítačem řízený jehlový ventil do komory.	Součet tlaku reziduálního plynu a tlaku pracovního plynu parametrem " p_{H_2} ".	$p_{H_2} \in (8, 15)$ mPa.
Zapnout předionizaci, usnadňující průraz neutrálního plynu do plazmatu	Rozžhavené wolframové vlákna, emitující elektrony prostřednictvím elektronové termoemise (viz <i>Měření teploty wolframového vlákna</i> , úloha 11 [6]).	Volba "Preionization" na hodnotě "Bottom el. gun".	ON/OFF
Iniciovat toroidální magnetické pole B_t , pro magnetické udržení plazmatu	Elektrický obvod, tvořený kondenzátorem ($C_B = 81$ mF) připojeným přes počítačem řízený tyristor na 28 toroidálních cívek generujících magnetické pole $B_t < 0.5$ T. Jedná se tedy o LC obvod, takže časový průběh bude mít harmonický charakter (viz <i>Sériový a vázaný rezonanční obvod</i> , úloha 3 [9]).	Napětí na které se nabije kondenzátor " U_B ". Zhruba platí, že $\max B_t \sim U_B/2$ [T, kV].	$U_B \leq 1300$ V.
Iniciovat toroidální elektrické pole E_t , pro průraz neutrálního plynu do plazmatu a jeho následný ohřev	Elektrický obvod, tvořený kondenzátorem ($C_{CD} = 11.3$ mF) připojeným přes počítačem řízený tyristor na primární cívku transformátorového jádra generující v tokamaku elektrické pole $E_t < 5$ V/m. Jedná se tedy o LC obvod, takže totéž jako u B_t .	Napětí na které se nabije kondenzátor " U_{CD} " a časové zpoždění, se kterým se sepne tyristor pro E_t za tyristorem pro B_t " T_{CD} ."	$U_{CD} \leq 600$ V $T_{CD} \in (0, 10)$ ms.

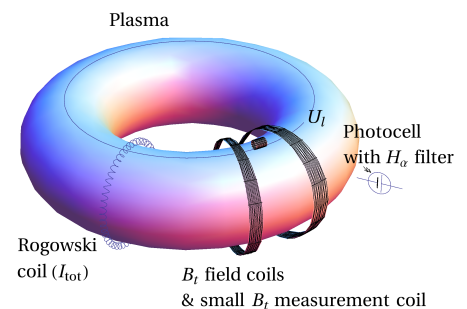
Tab. 2: Scénář postupu provedení výboje na tokamaku GOLEM s odkazem na příslušnou technologii a způsob nastavení na webovém rozhraní.

měřeným magnetickým polem \mathbf{B}_m jedním kruhovým závitem cívky je dán Faradayovým zákonem

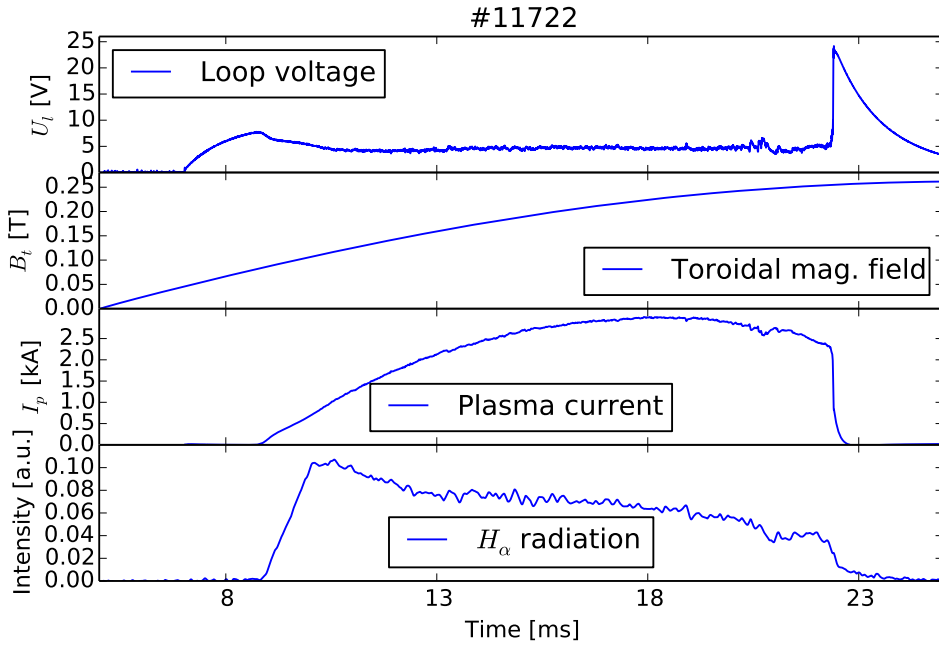
$$U_z = \oint_{\text{závit}} \mathbf{E}^{ind} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B}_m(t) \cdot d\mathbf{S} = -S_{\text{eff}} \frac{dB_m(t)}{dt}, \quad (11)$$

kde S_{eff} je efektivní plocha cívky kolmá na směr magnetického pole. Napětí je pak digitalizováno (případně nejdříve integrováno) a nakonec uloženo do databáze.

Vhodnou orientací a tvarem cívek (viz Obr. 3) lze měřit následující parametry: i) Napětí na závit U_l (reflektující \mathcal{E}^{ind} , resp. E_t – vztah (1) v základním popisu tokamaku). Jedná se o jediný závit cívky (v toroidálním směru) umístěný po obvodu komory. Tato cívka stejně jako komora představuje sekundár transformátoru a indukuje se na ní proto stejné napětí jako na komoře. Signál je veden přes dělič napětí, digitalizován a vynásoben kalibrační konstantou. ii) Magnetické pole B_t . Na malé cívce umístěné na komoře se indukuje napětí vlivem změny toku toroidálního magnetického pole. Samotné magnetické pole je dáno časovou integrací signálu. Před integrací musí být signál pečlivě zbaven offsetu. Až potom je integrován a přenásoben kalibrační konstantou. iii) Celkový proud I_{tot} (plazmatem i kovovou komorou) je měřen skrze změnu toku poloidálního magnetického pole. Jedná se o důmyslně namotanou cívku obepínající komoru v poloidálním směru, jež si vysloužila název Rogowského pásek viz ([10]). Signál je upraven



Obr. 3: Základní diagnostický systém tokamaku GOLEM.



Obr. 4: Časový průběh základních diagnostik plazmatu na tokamaku GOLEM.

stejně jako signál pro B_t . Pro získání proudu plazmatem I_p je potřeba znát elektromagnetické vlastnosti komory (sekce 4.3). iv) Fotodioda s H_α filtrem monitoruje záření plazmatu v oblasti spektra odpovídající přechodu elektronů mezi druhou a třetí energetickou hladinou vodíku $\lambda = 656.3$ nm (viz *Balmerova série*, úloha 4 [1]). Časový záznam zapálení a udržení plazmatického výboje #11722 v tokamaku GOLEM lze vidět na Obr. 4. Zapálení plazmatu lze identifikovat v čase cca 9 ms po dobu cca 14 ms. Svědčí o tom pokles napětí na závit U_l , signál z fotodiody s H_α filtrem a nárůst proudu I_p . Signál B_t představuje průběh vnějšího magnetického pole sloužícího k udržení plazmatu v komoře a signál I_p monitoruje proud plazmatem. Jednotlivé průběhy jsou dostupné na homepage individuálního výboje jednoduchým odkazem <http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/#ShotNo>, kde "#ShotNo" je nutno nahradit konkrétním pořadovým číslem výboje.

4.3 Měření základních parametrů komory

Při výbojích v tokamaku teče část proudu komorou. Tento fakt musíme brát v úvahu při interpretaci experimentálních výsledků. Zjištění elektromagnetických vlastností komory je možné provést během vakuového výstřelu (výstřel bez pracovního plynu), kdy celkový měřený proud teče pouze komorou. Průběh napětí na závit v momentě maximálního proudu komorou, kdy můžeme pro jednoduchost výpočtu zanedbat vlastní indukčnost komory, pro vakuový výstřel je dán rovnicí

$$U_l(t) = R_{ch} \cdot I_{tot}(t), \quad (12)$$

kde R_{ch} je odpor komory a I_{tot} je celkový proud změřený Rogowského páskem. Použitím měření napětí na závit a Rogowského pásku známe časový průběh U_l i I_{tot} . Pro určení parametrů lze použít metodu nejmenších čtverců a pro fitování lze použít například program Gnuplot [8].

4.4 Měření proudu plazmatem I_p

Proud tekoucí plazmatem a komorou představuje dva paralelní LR obvody (komoru tokamaku a samotné plazma) připojené jako sekundár transformátoru. Obvod lze popsat systémem rovnic

$$U_l(t) = R_{ch} \cdot I_{ch}(t), \quad (13)$$

$$U_l(t) = R_p(t) \cdot I_p(t), \quad (14)$$

$$I_{tot}(t) = I_p(t) + I_{ch}(t). \quad (15)$$

Zatímco indukčnost a odpor komory je konstatní a obě veličiny mohou být změřeny při vakuovém výstřelu, parametry plazmatu se liší výboj od výboje.

5 Poznámky

1. Žádáme studenty, aby si prostudovali doprovodné stránky k úloze, které najdou na <http://golem.fjfi.cvut.cz/KFprakt> [3]. Především je důležité se připravit teoreticky (třeba i na případné dotazy) a určitě je nutné dopředu zvládnout práci se vzdálenými datovými soubory.
2. Rozsah parametrů, které je možno volit při provozu tokamaku, je jistěn. Není tedy nutné se obávat, že by mohlo dojít nějakou nevhodnou kombinací k poškození zařízení.
3. Bezpečnostní upozornění: příprava na výboj je indikována hlasovým upozorněním a světelnými výstražnými signály. Po jejich zaznění/rozsvícení je nutno bezpodmínečně opustit místnost tokamaku.
4. Kalibrační konstanta improvizovaného Rogowského pásku má hodnotu $1.1 \cdot 10^7$ A/V (integrační krok $2 \cdot 10^{-6}$ s).
5. Zařazení této úlohy do základních praktik KF FJFI je pro tým tokamaku GOLEM ctí a výzvou. Budeme velmi vděčni všem studentům, kteří úlohu absolvují, za připomínky a podněty, které by mohly vést ke zkvalitnění této úlohy v praktiku. Prosíme o jejich poslání na adresu svoboda@fjfi.cvut.cz. Jménem týmu předem děkuje Vojtěch Svoboda, vedoucí experimentu.

Odkazy

- [1] *Balmerova série*. Úloha č. 4. Praktikum KF FJFI II, <http://praktikum.fjfi.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=193>.
- [2] Brotankova, J. "Study of high temperature plasma in tokamak-like experimental devices". In: (PhD. thesis 2009).
- [3] Golem Wiki contributors. *Doprovodná www stránka pro úlohu Tokamak GOLEM ve Fyzikálním praktiku KF FJFI*. [Online; accessed 30-January-2014]. 2014. URL: <http://golem.fjfi.cvut.cz/KFprakt>.
- [4] G. McCracken a P. Stott. *Fúze – energie vesmíru*. MF, 2006.
- [5] *Měrný náboj elektronu*. Úloha č. 12. Praktikum KF FJFI II, <http://praktikum.fjfi.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=201>.
- [6] *Měření teploty wolframového vlákna*. Úloha č. 11. Praktikum KF FJFI II, <http://praktikum.fjfi.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=3149>.
- [7] *NRL plasma formulary*. Naval Research Laboratory, 2009.
- [8] *Návod pro Gnuplot*. Doprovodné dokumenty pro Praktikum, http://praktikum.fjfi.cvut.cz/documents/navod_gnuplot.pdf. URL: http://praktikum.fjfi.cvut.cz/documents/navod_gnuplot.pdf.
- [9] *Rezonanční obvody*. Úloha č. 3. Praktikum KF FJFI II, <http://praktikum.fjfi.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=192>.
- [10] *Rogowski coil*. Wikipedia (v české verzi je špatný obrázek, používejte anglickou) http://en.wikipedia.org/wiki/Rogowski_coil. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Rogowski_coil.
- [11] I. Štoll. *Elektrina a magnetismus*. Vydavatelství skript ČVUT, Praha, 1998.