

Odhad elektronové teploty na tokamaku GOLEM

Jan Masák - jan2001masak@gmail.com,
Antonín Rousek - tonikrousek@gmail.com,
Daniel Staník - sojmarkov@centrum.cz,
Štěpán Skalka - stepanskalka@gmail.com,
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT

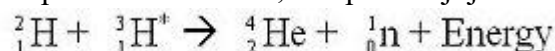
Abstrakt:

V této práci se zabýváme analýzou plazmatu z tokamaku GOLEM. Ze začátku ihned po objasnění základních pojmů a principů jako jsou například fúze a tokamak popisujeme postupy i výsledky našich měření. Zaznamenali jsme průběh napětí, proud v komoře a v plazmě, z čehož jsme dokázali vyvodit odpor plazmatu a z něj teplotu a posléze i dobu udržení.

1 Úvod a objasnění pojmů

Naším úkolem bylo vyzkoušet si práci na tokamaku GOLEM a poté se seznámit se základními diagnostickými metodami a jejich pomocí naměřit průběh základních parametrů plazmatu. Nejprve, než přejdeme k našim měřením je však třeba objasnit některé důležité pojmy.

Termojaderná Fúze: Jaderná fúze je reakce, probíhající obvykle za vysokých teplot, při které dojde ke sloučení dvou a více jader za uvolnění či pohlcení velkého množství energie. Tyto reakce jsou velice důležité a pohání hvězdy. Lidstvo se snaží fúzi provozovat v pozemských podmínkách, často za účelem jejího budoucího využití pro energetiku. V dnešní době se nejvíce uvažuje a zkoumá využití reakce deuteria a tritia při které vzniká helium, neutron a velké množství energie (v řádech MeV). Pro průběh reakce je třeba velmi vysoká teplota (stovky milionů kelvinů – což je ale pořád o dost méně, než potřebují jiné fúze).

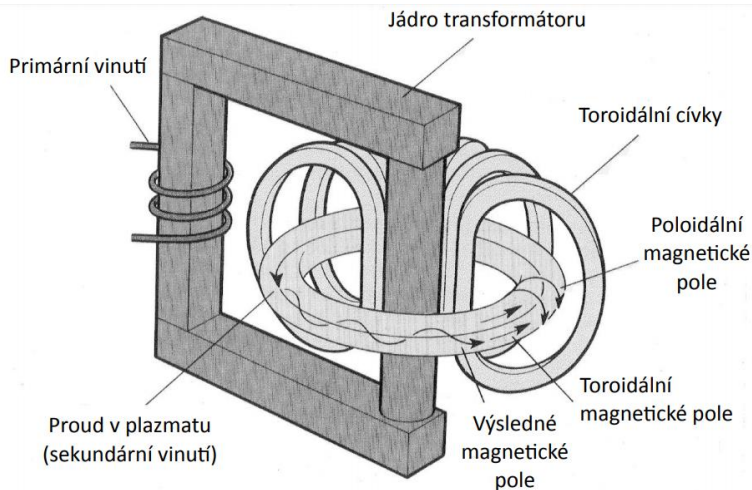


Problém spočívá v tom, že při takto obrovských teplotách bude náš pracovní plyn (směs deuteria a tritia) ve formě ionizovaného plynu – plazmatu.

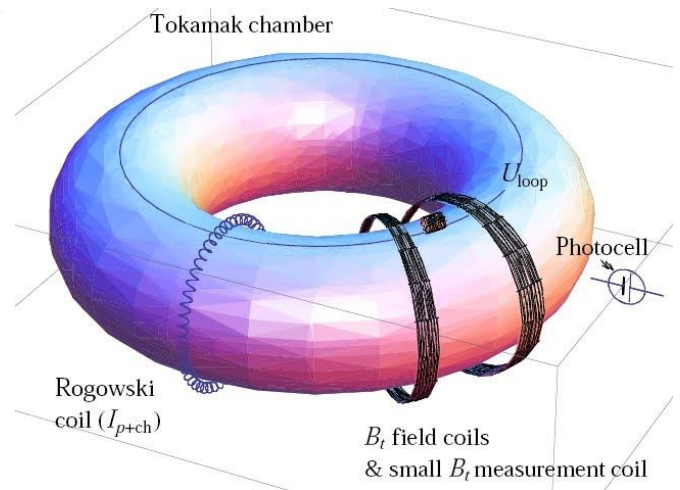
Plazma: Plazma je, jak již bylo zmíněno ionizovaný plyn, což znamená, že jednotlivé atomy plynu byly zionizovány (tj. zbaveny jednoho či více valenčních elektronů. Například teplem, zářením či srážkami). Dokonalé plazma je tedy směs iontů a elektronů. Existují plazma nízko a vysokoteplotní, naše plazma v tokamaku, ve kterém chceme zkoumat fúzi, je se svými stovkami milionů kelvinů plazma vysokoteplotní. Jeden z problémů, se kterým se musí tokamaky vyrovnávat spočívá v udržení plazmatu, plyn o takto vysoké teplotě odpaří libovolný materiál vyskytující se na zemi.

Tokamak: Tokamak je jedno z nejpokročilejších a nejnadějnějších řešení provozu jaderné fúze v zemských podmínkách. Zabránění kontaktu plazmatu řeší vhodnou konstrukcí a magnetickým polem. Komora, ve které chceme mít plazma má tvar toroidu, v něm totiž můžeme plazma „chytit do pasti“, kdy magnetickým polem zajistíme, aby plazmatu uvnitř toroidu levitovalo a nedotýkalo se stěn. Z vnější části vakuové komory je primární část transformátoru, kterou prochází proud, který se v čase mění. Sekundární částí tohoto transformátoru je právě plazma, jež je díky volným elektronům vodivé. Díky proměnnému proudu se mění magnetické pole v okolí primární části transformátoru a zapřičiňuje indukci

proudu (elektrického pole) v plazmatu. Tento indukovaný proud zapříčiňuje vznik magnetického poloidálního pole, které „omotává“ nádobu tokamaku a zabraňuje svými silovými účinky kontaktu plazmatu se stěnou nádoby (Obr.1). Svým účinkem také přispívají torodiální cívky okolo toroidu a vytváří superpozicí s poloidálním mag. polem celkové magnetické pole kýžené helikální konfigurace. Celkové magnetické pole působí na plasma Lorentzovo silou $j \times B$, kde j je proudová hustota v plazmatu.



Obr. 1: Schéma tokamaku. Převzato z [1].



Obr. 2: Základní diagnostický systém tokamaku. Převzato z [1].

2 Základní diagnostiky

K měření základních údajů charakterizujících výboje v tokamaku jsme používali čtyři základní diagnostické nástroje (obr. 2), pomocí nichž jsme měřili napětí na závitěch, proud a torodiální magnetické pole v plazmatu společně s jeho elektromagnetickým vyzařováním.

Průběh napětí v plazmatu jsme zaznamenávali pomocí drátu, který jsme umístili jako závit sekundárního vinutí kolem magnetického jádra nad komorou. Napětí, které bylo shodné s tím v plazmatu, jsme pak mohli měřit díky magnetické indukci vyvolané v změnu magnetického pole transformátoru. Signál jsme následně digitalizovali a vynásobili kalibrační konstantou.

Na měření proudu plazmatem jsme používali Rogowského pásek, který jsme ovinuli kolem průřezu komory a opět měřili indukované napětí (obr. 2). Naměřené hodnoty odpovídaly změně celkového proudu, který probíhal komorou a plazmatem. Při analýze signálu jsme ho zintegrovali, opět upravili kalibrační konstantou a započítali vliv komory.

Torodiální magnetické pole jsme měřili cívkou umístěnou mezi cívkami vytvářejícími torodiální pole tokamaku (obr.2). Integrací výboje indukovaného napětí v cívce a jeho kalibrací jsme nakonec získali kýžený signál.

Údaje o elektromagnetickém vyzařování plazmatu jsme sbírali pomocí fotodiody. Fotodioda byla vybavena H_α filtrem, díky kterému jsme mohli oddělit spektrum pocházející z čistého plazmatu od záření nečistot a pozadí. Díky získaným datům jsme mohli přesněji odhadnout dobu udržení. [1]

3 Odhad teploty plazmatu

Z námi naměřených veličin, kterými jsou U_L , tedy napětí na závit, I_{tot} , proud protékající celým tokamakem, jsme se postupně propočítali až k teplotě elektronů v plazmatu.

K výpočtu teploty plazmatu naší metodou jsme potřebovali určit jeho odpor. Ten můžeme spočítat z obyčejného Ohmova zákona, neboť napětí i proud známe. Je zde však jediný problém, a to v tom, že I_{tot} zahrnuje proud protékající i komorou. Abychom tedy získali jen proud protékající plazmatem, bylo třeba zjistit odpor komory, a tedy i hodnotu proudu v samotné komoře. Odpor komory jsme získali z měření výstřelu v tokamaku bez plazmatu. Jeho hodnota se pohybuje okolo $R_k = 9,7 \text{ m}\Omega$. Odpor plazmatu tedy již snadno dopočítáme:

Pro proud čistě v plazmatu platí:

$$I_p = I_{tot} - I_k$$

Když rozepíšeme proud komorou pro známé hodnoty:

$$I_p = I_{tot} - \frac{U_L}{R_k}$$

A z toho odpor plazmatu:

$$R_k = \frac{U_L}{I_{tot} - \frac{U_L}{R_k}}$$

Mezi teplotou a odporem platí vztah, jehož odvození by bohužel bylo složité, ale po dosazení všech konstant platí následující vztah:

$$T_e = 0,9 \times R_k^{-\frac{2}{3}}$$

4 Odhad doby udržení energie

Primární cílem naší diagnostiky bylo získat data potřebná k odhadnutí doby udržení energie. Jedná o charakteristickou dobu chladnutí plazmatu a pro výzkum fúzních reaktorů esenciální, protože úzce souvisí s účinností tokamaku.

Dobu udržení energie lze vyjádřit jako

$$\tau_E = \frac{W_p}{P_z}$$

Celková energie plazmatu W_p je rovna tlaková energie plazmatu, kterou můžeme s pomocí rovnice ideálního plynu definovat vztahem

$$W_p = pV = nkTV$$

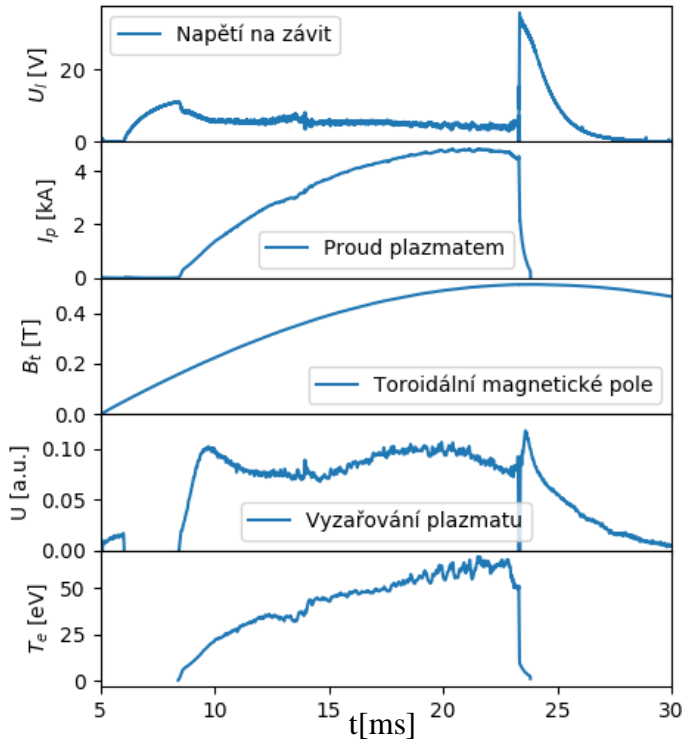
Jediným výkonem ohřevu P_o je v našem tokamaku ohmický ohřev, který je ve stavu energetické rovnováhy roven ztrátovému výkonu P_z . Pro ohmický ohřev pak platí jednoduchý vztah

$$P_o = U_L I_p$$

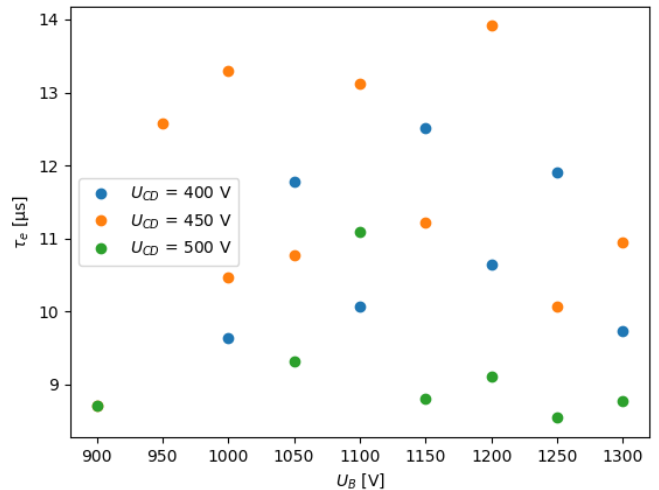
Kombinací výše uvedených vztahů můžeme odhadnout τ_E již pomocí naměřených veličin a platí tedy že

$$\tau_E = \frac{W_p}{P_z} = \frac{nkTV}{P_o} = \frac{nkTV}{U_L I_p}$$

Když jsme tento vztah implementovali do námi vytvořeného programu na analýzu dat, dostali jsme přibližné hodnoty doby udržení energie, které můžeme společně se základní diagnostikou vidět na obr. 3. Závislost doby udržení na nabití kondenzátorů napájejících cívky toroidálního magnetického pole je zobrazen na obr. 4 a nevykazuje žádné známky korelace.



Obr. 3: Grafy závislosti parametrů plazmatu na čase



Obr. 4: Závislost odhadu doby udržení na napětí kondenzátoru generujícího magnetické pole

4 Závěr

Podařilo se nám získat potřebná data, takže jsme z nich byli schopni vypočítat veličiny, které jsme hledali – elektronovou teplotu i dobu udržení plazmatu, a znázornit je v závislosti na čase a na napětí kondenzátoru generující toroidální magnetické pole. Naučili jsme se tak základní metody měření na tokamaku, pochopili základní principy tvorby a udržování plazmatu a zároveň se naučili ovládat výboje v tokamaku přes webové rozhraní. Při našich výbojích jsme dosáhli teploty až 60 eV, což odpovídá zhruba 700 000 K. V závislosti doby udržení plazmatu na napětí cívek jsme nenašli žádnou pravidelnost. Lze si však všimnout, že napětí U_{CD} již ovlivňuje tuto dobu s určitou pravidelností. Pro nejvyšší námi měřené napětí – 500V je doba udržení nejmenší (8-11 μ s). Jako optimální hodnotu jsme vyhodnotili napětí mezi 400 a 450 V, kde byla doba udržení nejdelší (až 14 μ s).

Poděkování

Úplně na závěr bychom chtěli všichni poděkovat všem organizátorům Týdne vědy a FJFI za zprostředkování tohoto miniprojektu a zejména Ing. Jaroslavu Čerovskému za dohled a cenné rady.

Reference

- [1] *The use of Nuclear Fusion Technology in the 21st Century*, 2010, https://www.weather.gov.hk/m/article_e.htm?title=ele_00315
- [2] *Vysokoteplotní plazma na tokamaku GOLEM*, 2018, <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/Universities/CTU.cz/PRA2/15/Basics/uloha13A.pdf>
- [3] *Fykos – seriál 26. ročníku*, 2019, <https://fykos.cz/rocnik26/serial/start>