

# Základy diagnostiky vysokoteplotního plasmatu na tokamaku GOLEM

M. Horáková, J. Skalka, V. Sklenár, L. Šírová  
Arcibiskupské gymnázium, Gymnázium Jírovcova 8,  
Gymnázium Terézie Vansovej, Mensa gymnázium  
marie.horakova06@gmail.com, skalkaj@jirovcovka.net,  
sklenar.vladimir05@gmail.com, ludmila.sirova@email.cz

## Abstrakt

V této práci se zabýváme základní diagnostikou plasmatu na tokamaku GOLEM. Za pomoci různých diagnostických zařízení jsme provedli měření, ze kterých jsme odvodili dobu udržení energie plasmatu. Tato doba je jedním z parametrů určujících kolik energie tokamak vyprodukuje. V dnešní době zatím žádný tokamak nevyprodukoval více energie než sám spotřeboval, změnit by to měl až plánovaný tokamak ITER.

## 1 Úvod

Lidská spotřeba energie se stále zvyšuje. Neobnovitelné zdroje, jak ostatně napovídá jejich název, nejsou nevyčerpatelné, obnovitelné zdroje zase neumožňují dostatečnou efektivitu k naplnění našich požadavků. Jedním z možných řešení by mohla být jaderná fúze, kdy se velké množství energie uvolňuje ze slučování jader lehkých prvků, v našem případě deuteria a tritia. Na podobném principu fungují termojaderné reakce v nitru hvězd. Aby fúze mohla proběhnout, je nutné nejprve překonat odpudivé elektromagnetické síly, čehož lze na Zemi dosáhnout výrazným urychlením částic, tzn. jejich zahřátím na vysokou teplotu.

## 2 Jak funguje tokamak?

Tokamak je zařízení, na kterém by mohla probíhat jaderná fúze v zemských podmínkách. Ve středu zařízení se nachází primární část transformátoru, kterou prochází střídavý proud. Vodivá plasma se chová jako sekundární část tohoto transformátoru - díky magnetickému poli z primární části transformátoru se v plynu indukuje proud. Průchodem elektrického proudu se plyn zahřívá až se z něj na krátkou dobu stane plasma. V této chvíli může probíhat termojaderná fúze.

Žádný materiál ale nevydrží dlouhodobé vystavení této extrémní teplotě. Je proto nutné zabránit kontaktu plasmatu a stěn komory. Díky indukovanému proudu v plasmatu vzniká poloidální magnetické pole, které působí okolo proudu plasmatu. Pomocí toroidálních cívek se vytváří toroidální magnetické pole ve smeru proudu plasmatu. Kombinace těchto dvou magnetických polí nutí plasma levitovat uprostřed komory tokamaku.

### 3 Diagnostika

#### Měřené veličiny

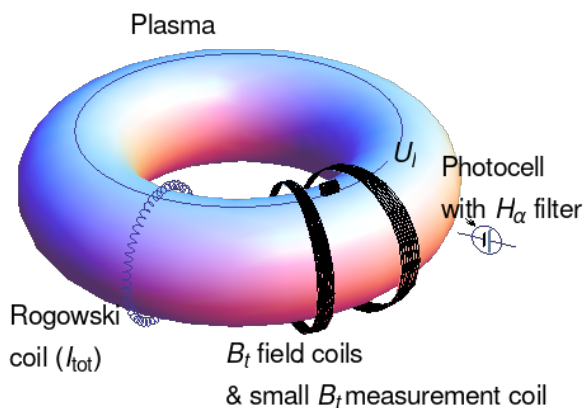
**Napětí na závitu ( $U_l$ )** představuje napětí k udržení plasmatu indukované transformátorem. Pro měření jsme použili jednozávitovou cívku položenou na horní části komory tokamaku. Její umístění tedy kopírovalo proud plasmatu. Výstup měření tedy není nutné nijak převádět, naměřené hodnoty jsou přímo hodnotami napětí.

**Proud procházející plasmatem ( $I_p$ )** jsme změřili pomocí Rogowského pásky (ve své podstatě cívky dlouhé okolo 1 m), která byla omotána kolem komory a procházela středním otvorem. Páska ale měří pouze napětí vyvolané změnou proudu. K získání aktuální hodnoty proudu je třeba sečíst všechny předcházející změny (předpokládáme počáteční proud roven 0), což lze vyjádřit jako integraci. Po integrování dat získáme celkový proud  $I_{tot}$  kovové komory i plasmatu dohromady. Potřebuji tedy odečíst proud procházející komorou, který podle Ohmova zákona závisí na napětí a odporu komory -  $U$  známe a  $R_{kom}$  můžeme snadno změřit pokud v tokamaku provedeme měření bez výboje.

$$I_p = I_{tot} - \frac{U_l}{R_{kom}} \tag{1}$$

**Intenzita toroidálního magnetického pole ( $B_t$ )** je pole udržující plasma uprostřed komory, aby nepoškodilo stěny komory. Na detekci změn jsme použili kleště s cívkou, které byly uchyceny mezi boční cívky tokamaku. Cívka opět změřila jen změny magnetického pole, nikoliv hodnotu magnetického pole samotného. K získání hodnoty magnetického pole je stejně jako u měření proudu potřeba získaná data vyintegrovat.

**Identifikace plasmatu ( $U_{photodiode}$ )** je měření, ze kterého zjistíme, v jakém čase se plasma v komoře vyskytovalo z intenzity jeho záření. Pro měření jsme použili fotodiodu, která snímala světelný záblesk a převedla jej na elektrické napětí. Fotodioda byla vybavena filtrem zachycujícím pouze část světelného spektra (čáru  $H\alpha$ ), ve které vyzařuje použitý plyn - vodík.



Obrázek 1: Schéma umístění měřících zařízení, převzato z [1].

## Výpočet doby udržení

Doba udržení vyjadřuje čas, po který udržíme v tokamaku vysokou teplotu (nikoliv dobu existence plasmatu, kterou lze snadno odečíst z fotodiody). Z obecného vzorce pro výkon můžeme vyjádřit čas udržení  $\tau$  jako poměr energie plasmatu  $E$  a výkonu ztrát  $P_z$

$$P = \frac{E}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{E}{P_z}. \quad (2)$$

Plasma se z energetického hlediska chová jako plyn, proto

$$E = pV. \quad (3)$$

Známe objem tokamamu  $V = 80$  l. Odhadneme energii jako

$$E \approx \frac{1}{3} en_e TV. \quad (4)$$

kde  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C je konstanta elementárního náboje,  $n_e$  je elektronová hustota plasmatu, kterou můžeme změřit pomocí zabudovaného interferometru a  $T$  je teplota plasmatu. Teplota je přímo úměrná odporu tokamaku, který odhadneme jako

$$T \approx 0,9 \left( \frac{U_l}{I_p} \right)^{-\frac{2}{3}}. \quad (5)$$

Pokud je plasma v rovnovážném stavu (tzn. teplota se ani nezvyšuje ani nesnižuje) znamená to, že dodáváme stejně energie jako se ztrácí. Plasma se v tomto případě chová jako elektrický obvod. Proto je výkon ohřevu  $P_o$  roven výkonu ztrát

$$P_z = P_o = U_l I_p. \quad (6)$$

Nakonec tedy můžeme vypočítat  $\tau$  jako

$$\tau = \frac{en_e TV}{3U_l I_p} = \frac{0,3en_e V}{U_l^{5/3} I_p^{1/3}}. \quad (7)$$

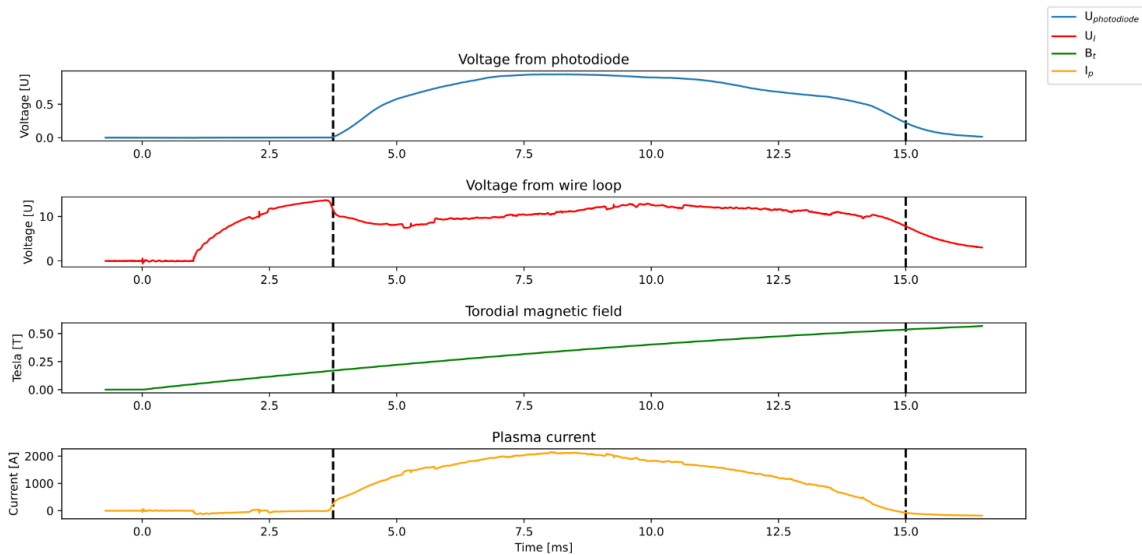
## Odpor komory

Odpor komory jsme vypočetli z hodnot  $U_l$  a  $I_{tot}$  během vakuového výstřelu číslo #42477 (v komoře tedy nebylo žádné plasma). Zjistili jsme  $R_{kom} = 0,0097 \Omega = 9,7 \text{ m}\Omega$ . Hodnotu odporu komory pak použijeme ke spočtení proudu na komoře, který potřebujeme oddělit od proudu v plasmatu.

## 4 Naměřené hodnoty

Pro dosažení do vzorce (7) použijeme aritmetický průměr hodnot proudu a napětí během existence plasmatu. Stejně tak zprůměrujeme i elektronovou hustotu získanou z interferometru.

výstřel	$U_l$	$I_p$	$n_e$	$\tau$
#42474	9,875 V	1868,315 A	$4,054 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$	27,843 $\mu\text{s}$
#42478	10,62 V	1413,093 A	$4,356 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$	29,094 $\mu\text{s}$



Obrázek 2: Naměřená data ve výboji #42478.

## 5 Diskuze měření

Výstřely se lišily mj. v hodnotách proudu a napětí v plasmatu i v elektronové hustotě. Tyto veličiny závisí mj. na tlaku plynu v komoře tokamaku. V prvním výstřelu byl tlak plynu a tedy i všechny zmíněné veličiny vyšší, proto je nižší i doba udržení. Rozdíl ve vstupních hodnotách ale není moc velký, proto se výrazně neliší ani doba udržení.

## 6 Závěr

Změřili jsme základní charakteristiky vysokoteplotního plasmatu v tokamaku GOLEM. Konkrétně jsme určovali napětí na závitě, proud procházející plasmatem, intenzitu toroidálního magnetického pole, přítomnost a intenzitu záření plasmatu. Z naměřených hodnot jsme vypočítali dobu udržení energie plasmatu. Tato doba vychází velmi krátká - to je důvod, proč tokamaky ještě nejsou používány jako elektrárny.

## Poděkování

Chtěli bychom tímto poděkovat našemu garantovi panu Ing. Marku Tunklovi a panu Ing. Vojtěchu Svobodě, CSc.

## Reference

- [1] GOLEM Wiki contributors. Magnetic confinement of high temperature plasma at the GOLEM tokamak.  
<http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/Education/GMinstructions/extracts/Universities/CTU.cz/PRA2/docum.pdf> , 2022.
- [2] Výklad Ing. Marka Tunkla a Ing. Vojtěcha Svobody, CSc.