

# Základy diagnostiky plazmy na tokamaku GOLEM

O.Kohút, *Gymnázium Vídeňská*, Brno

Ondrejkuhut@gmail.com

M. Lelák, *Gymnázium J. A. Raymana*, Prešov

Lelak.michal@gmail.com

M. Moravčík, *Evanjelické gymnázium Juraja Tranovského*, Liptovský Mikuláš

marian.moravcik@alconet.sk

## **Abstrakt**

V tomto projekte jsme se soustředili na výpočet teploty plazmatu z naměřených parametrů plazmatu na tokamaku GOLEM. Jeden z dalších úkolů bylo zjišťování, co konkrétně ovlivňuje dobu udržování energie v plazmatu.

## **1 Úvod**

Tokamak je zariadenie, ktoré slúži ako magnetická nádoba na vznik a uchovávanie horúcej plazmy za účelom termojadrovej fúzie, čo by mohlo byť v budúcnosti hlavným zdrojom energie. Nato je potrebné zahriať plazmu na veľmi vysokú teplotu (stovky miliónov stupňov Celsia) a udržať ju v tejto nádobe čo najdlhšie. Preto je našim hlavným cieľom zistiť teplotu plazmy a čas udržania energie v tokamaku.

## **2 Teória**

### **Termojadrová fúzia**

Jedná sa všeobecne o dej, pri ktorom dochádza k syntéze (zlúčovaniu) jadier s nižšou atomovou hmotnosťou do jadra s vyššou hmotnosťou. Jadrá sa dostávajú do tesnej blízkosti, kedy prekonávajú vzájomné elektrostatické bariéry a následne dochádza k ich zlúčeniu.



Jadrová fúzia v pozemských podmienkach by teda mohla byť zdrojom čistej energie bez vzniku nebezpečného odpadu.

Jadrová fúzia prebieha prirodzene vo hviezdach. Čím je hviezda väčšia a hmotnejšia, tým rýchlejšie premena prvkov prebieha.

## Plazmový výboj

Prebieha v nasledujúcich krokoch:

1. Vyčerpanie komory  
Komora sa vyčerpáva pomocou rotačnej a turbomolekulárnej vývevy na tlak približne 1 mPa.
2. Napustenie pracovného plynu  
Komoru napustíme vodíkom cez webové rozhranie na hodnotu 8 až 15 mPa.
3. Zapnutie predionizácie  
Aby došlo k prerazeniu, musí plyn obsahovať nabitú časticu. Uskutočníme to pomocou rozžeraveného wolfrámového vlákna emitujúceho elektróny prostredníctvom elektrónovej termoemisie.
4. Iniciácia toroidálneho magnetického poľa  
Horúca plazma sa nesmie dotýkať stien komory, pretože by veľmi rýchlo vychladla. Plazma musí teda v komore levitovať – je potrebné vygenerovať magnetické pole, čo uskutočníme vybitím kondenzátora napojeného na 28 toroidálnych cievok. Odporúčané napätie na kondenzátore je  $U_B \leq 1300$  V.
5. Iniciácia elektrického poľa  
Plazmu vytvoríme a zohrejeme pomocou elektrického poľa a to vybitím kondenzátora napojeného na primárnu cievku transformátora. Odporúčané napätie na kondenzátore je  $U_{CD} \leq 600$  V.

## 3 Experimenty

### Meranie

Tokamak sme osadili týmito základnými diagnostickými prostriedkami: kábel na meranie napätia na závit  $U_l$ , cievka na meranie toroidálneho magnetického poľa  $B_t$ , Rogowskeho pásik na meranie prúdu plazmou  $I_p$ , fotodióda na meranie intenzity žiarenia plazmy. Dáta sme zberali pomocou štvorkanálového osciloskopu Rigol a následne spracovali v programovacom jazyku Python.

### Výpočty

Pri experimente sme merali 4 parametre, a to: napätie komory  $U_l$ , celkový elektrický prúd  $I$ , toroidálne magnetické pole  $B_t$  a intenzitu žiarenia. Ako prvé sme vypočítali odpor komory pomocou vákuového výboja zo vzťahu:

$$R_{ch} \approx \frac{U_l(t)}{I_{ch}(t)}$$

Následoval výpočet prúdu v plazme  $I_p(t)$  vzťahom:

$$I_p(t) = I_{ch+p}(t) - I_{ch}(t) = I_{ch+p}(t) - \frac{U_l(t)}{R_{ch}(t)}$$

Kde  $I_{ch}$  je elektrický prúd komory. Z Ohmovho zákona sa dá vypočítať odpor plazmy  $R_p(t)$ :

$$R_p(t) = \frac{U_l(t)}{I_p(t)}$$

Aby sme mohli vypočítať čas udržania energie, museli sme sa dopracovať k hodnotám energetických strát  $P_{loss}$  a energie plazmy  $W_p(t)$ . Celkové energetické straty  $P_{loss}$  sme vypočítali vzťahom:

$$P_{loss}(t) = P_{OH}(t), \text{ kde } P_{OH}(t) = R_p(t) \times I_p^2(t)$$

$P_{OH}$  – Výkon ohmického ohreву

Pre výpočet energie plazmy  $W_p(t)$  platí vztah:

$$W_p(t) = V_p \frac{n_e(t) \times k_B \times T_e(0,t)}{3}, \text{ kde } T_e(0,t) = 0,9 \times R_p(t)^{-2/3}$$

$T_e$  – Centrálna elektronová teplota

$n_e$  – elektrónová hustota

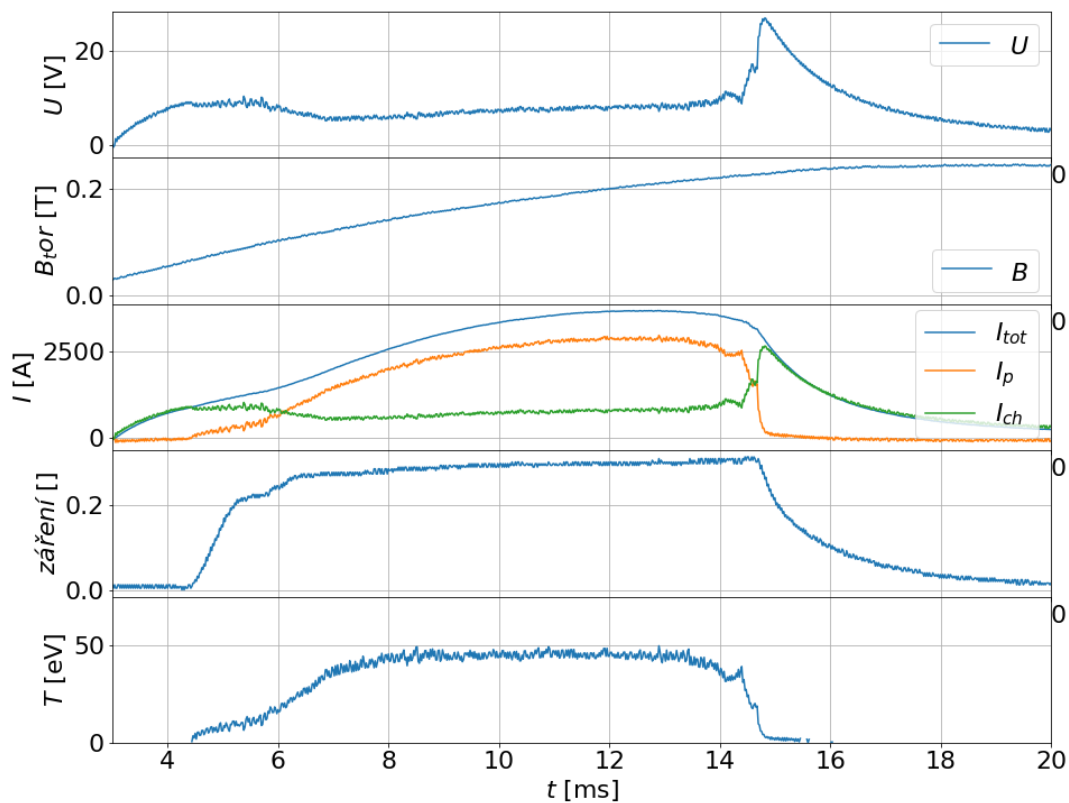
$V_p$  – objem komory

Po vypočítaní  $W_p(t)$  a  $P_{loss}$  už stačilo len dosadiť dané hodnoty do vzťahu pre výpočet času udržania energie:

$$\tau_E(t) = \frac{W_p(t)}{P_{loss}(t)}$$

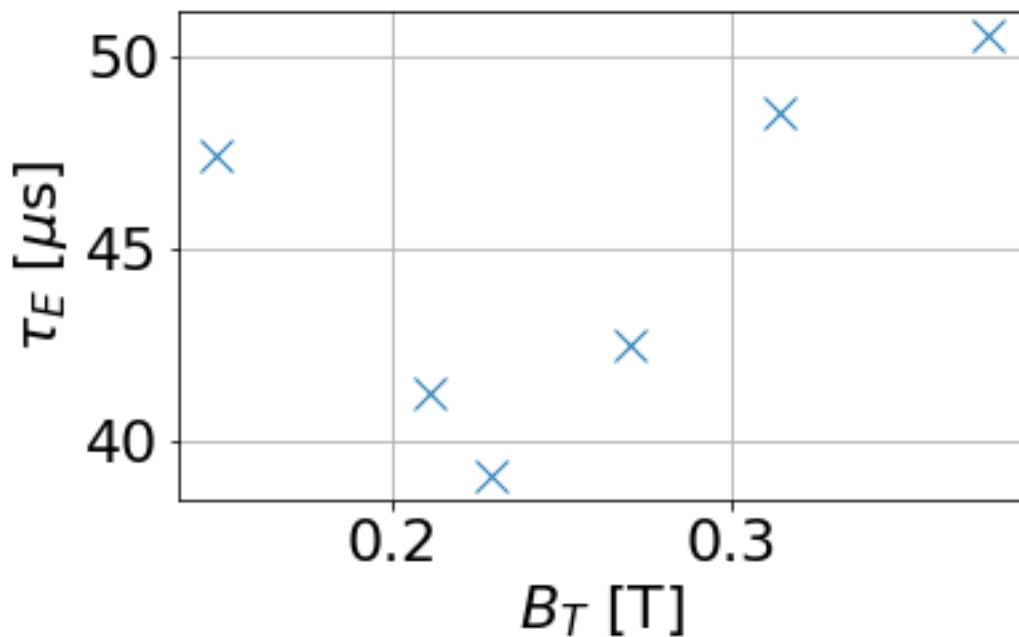
### Výsledky:

Během práce s tokamakem jsme naměřili hodnoty napětí na komoře, naindukované magnetické pole a celkový naměřený proud. Následující grafy snázorňují chování veličin v závislosti na čase.



Obrázek 1: parametry výboje na tokamaku č. 27535 při napětí 550 V

Z těchto grafů lze přečíst, že maximální teplota vytvořeného plazmatu dosahuje až 50 eV, což je 500 000 °C. Mezitím se doba celého výboje pohybuje okolo 16 ms.



Obrázek 2: Závislost doby udržení energie na velikosti magnetického pole. Čím větší napětí naindukované na toroidální mag. poli, tím silnější mag. pole a tím delší udržení plazmatu.

#### 4 Závěr

Při práci na tokamaku GOLEM jsme se naučili jak takový tokamak uvést do provozu. Tím se myslí zapojení Rogowského pásku, fotodiody, obvod napětí namotaný na závit a osazení cívky na měření toroidálního magnetického pole. Po získání výsledků z měření jsme úspěšně spracovali data a vypočítali teplotu plazmy a zaznamenali dobu jejího udržení. Ze záznamů více měření jsme dále zjistili jaký vliv má rostoucí síla toroidálního magnetického pole na celkové době udržení plazmatu v tokamaku.

#### 5 Referencie

[1] <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/KFpract/15/Basics/uloha13A.pdf>

[2] <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/KFpract/18/docum.pdf>