

# Základy diagnostiky vysokoteplotního plazmatu na tokamaku Golem

Lucie Sladká, VOŠ, SPŠ a JŠ s právem SJZ, Kutná Hora,  
[sladlu1@seznam.cz](mailto:sladlu1@seznam.cz)

Veronika Rečková, Gymnázium Jura Hronca, Bratislava Boženy  
Němcové 13, [veronika.reckova13@gmail.com](mailto:veronika.reckova13@gmail.com)

Jan Buryanec, Gymnázium Dobruška, [BurdisXD1998@seznam.cz](mailto:BurdisXD1998@seznam.cz)

## **Abstrakt:**

Náplní našeho miniprojektu bylo se naučit se základními diagnostikami vysokoteplotního plazmatu. Pomocí těchto diagnostik jsme byli schopni změřit potřebná data k určení některých vlastností plazmatu. Dále jsme se snažili o dosažení největší elektronové teploty a zároveň co nejdelší doby udržení plazmatu na základě širokého výběru možných parametrů tokamaku.

## **1 Úvod**

V tomto laboratorním cvičení jsme si mohli ukázat důkaz toho, že je možné v pozemských podmínkách realizovat tzv. termojadernou fúzi stejnou jako v naší nejbližší hvězdě Slunci. Tato problematika a výzkum v oblasti plazmatu a termojaderné fúze je velmi aktuální téma, protože se lidstvo snaží najít nové alternativní zdroje energie. Odpovědí by mohli být právě fúzní elektrárny, které by jednak nevyprodukovali tolik nebezpečného odpadu, a také by byli bezpečné oproti klasickým jaderným elektrárnám. V rámci našeho miniprojektu jsme pomocí příslušných diagnostik měřili teplotu tohoto plazmatu a dobu udržení. V závěru tohoto cvičení jsme se snažili co nejvíce maximalizovat tyto parametry.

## **2 Práce se základními diagnostikami**

### **2.1 Příprava na měření**

V první řadě museli naši lektori připravit pracovní prostředí tokamaku, jako vyčerpání pracovní komory tokamaku, oživení systému apod. Tomu se říká tzv. pomalá fáze. Ve fázi druhé jsme už měli za úkol osadit tokamak základními diagnostikami, které jsme poté připojili k digitálnímu čtyřkanálovému osciloskopu. Osadili jsme tedy tokamak čtyřmi různými diagnostickými zařízeními. Použili jsme vodič zvaný flux loop osazený podél komory v toroidálním směru pro zjištění průběhu napětí na závit, Rogowského pásku pro zjištění průběhu napětí jehož integrací získáme proud plazmatem, dále tzv. cívečku pro měření toroidálního magnetického pole a nakonec fotodiodu díky níž budeme schopni zjistit jak dlouho bylo plazma přítomné v komoře. Po usazení všech zmíněných diagnostik nastala tzv. super rychlá fáze a to už samotné střelení z tokamaku.

## 2.2 Sběr dat

Při prvním sběru dat jsme si museli příslušně nastavit všechny kanály našeho osciloskopu pro další sběr dat. Data se nám automaticky přeposílala do školní databáze a poté jsme mohli s nimi dále pracovat.

## 2.3 Zpracování dat

Použitelná data úspěšných výbojů jsme dále zpracovávali a vykreslovali do grafů pomocí programovacího jazyka Python. Data jsme zbavovali možných naměřených chyb v podobě šumů a dalších možných chyb měření.

### 2.3.1 Vzorečky použité pro výpočty

Průběh napětí na závit pro vakuový výstřel je dán rovnicí:  $U_1(t) = R_{ch} \cdot I_{tot}(t)$

kde  $R_{ch}$  = odpor komory,  $U_1(t)$  = napětí na závit,  $I_{tot}(t)$  = celkový proud změřený Rogowského páskou. Celkový měřený proud je součtem proudu plazmatem a proudu komorou:  $I_{tot}(t) = I_{pl}(t) + I_{ch}(t)$ .

Tedy pro proud plazmatem platí:  $I_{pl}(t) = I_{tot}(t) - U_1(t)/R_{ch}$ . Pro výpočet teploty plazmatu pro tokamak golem platí vztah:  $T_e(0, t) = \left( 0,7 \cdot \frac{I_p(t)}{U_1(t)} \right)^{\frac{2}{3}}$  [eV; A, V]

$T_e$  = elektronová teplota,  $I_p$  = proud plazmatem,  $U_1$  = napětí na závit v transformátoru

Mezi další parametry patří elektronová hustota, kterou lze vyjádřit vztahem:  $\bar{n} = 2p_0/k_B \cdot T_{ch}$  [počet částic/m<sup>3</sup>, Pa, K]

kde  $n$  = průměrná hustota,  $p_0$  = tlak neutrálního plynu,  $k_B$  = Boltzmanova konstanta,  $T_{ch}$  = teplota komory

Zdrojem ohřevu plazmatu na tokamaku GOLEM je pouze ohmický ohřev daný vztahem:  $P_{OH}(t) = R_p(t) \cdot I_p^2(t) = U_r \cdot I_p(t)$

kde  $P_{OH}$  = ohmický výkon,  $R_p$  = odpor plazmatu,  $I_p$  = odpor plazmatu

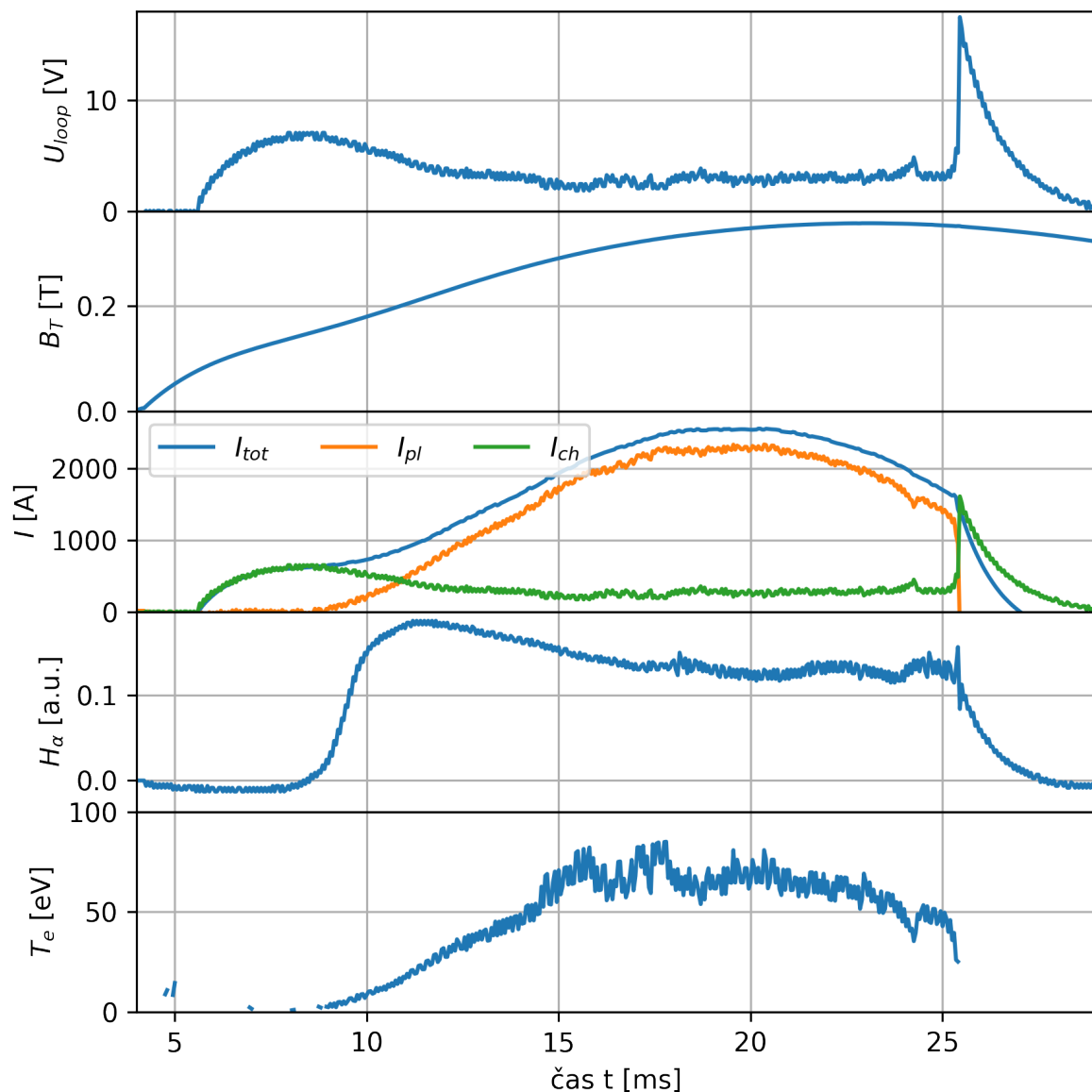
Celkovou tepelnou energii plazmatu  $W_{th}$  spočteme z ekvipartičního teorému:  $W_{th}(t) = 1/3nk_B T_e(0, t)V$  [J; m<sup>-3</sup>, K, m<sup>3</sup>]

Na základě znalosti energie plazmatu  $W_{th}$  a ohmického příkonu  $P_{OH}$  lze ze zákona zachování energie spočítat energetické ztráty plazmatu:  $P_{loss}(t) = P_{OH}(t) - \Delta W_{th} / \Delta t$ . Protože neznáme  $P_{loss}$  ale pouze ohmický příkon pro výpočet doby udržení energie  $\tau_E(t)$

definovanou jako:  $\tau_E(t) \equiv W_{th}(t) / P_{loss}(t)$

použijeme okamžik kdy je energie plazmatu maximální a jeho časová změna rovna nule. Poté platí  $\tau_E(t) \equiv W_{th}(t) / P_{OH}(t)$

## 2.4 Naměřená data v grafech



## 2.5 Výsledky

Při pokusu se nám podařilo zrealizovat pár úspěšných výbojů a jeden nejlepší výše uvedený z nich jsme prozkoumali blíže a určili jsme dané parametry. V prvním grafu můžeme vidět vývoj velikosti napětí na závit, dále v druhém grafu lze vidět vývoje elektrického proudu protékajícím plazmatem a komorou a  $I_{tot}$  reprezentuje součet těchto proudů naměřený z rogowského cívky, ve třetím si můžeme povšimnout vývoji vyzařovaného záření v komoře při reakci a nakonec v posledním grafu je vývoj teploty plazmatu. Teplota plazmatu byla spočtena přibližně okolo 50-60 elektronvoltů v centru plazmatu. Elektronová hustota nám vyšla přibližně  $9.6 \times 10^{18}$  částic/m<sup>3</sup>, celková tepelná energie plazmatu 2,2 J a doba udržení 412 mikrosekund.

### 3 Shrnutí

Úspěšně se nám podařilo nastavit parametry tokamaku GOLEM tak, že jsme provedli několik plazmatických výbojů. Průběh jednoho z nich jsme detailněji prozkoumali a zpracovali. Určili jsme nejvyšší a průměrnou teplotu plazmatického vlákna v komoře tokamaku. Během experimentu jsme se naučili pracovat s diagnostickými zařízeními, jako např. umístění měřících cívek a drátů na tělo tokamaku a správně sbírat naměřená data z osciloskopu.

### Poděkování

Tímto bychom chtěli poděkovat katedře fyziky za umožnění přístupu k tokamaku a jeho provozu.

### Reference:

[1] Fyzikální praktikum FJFI. Vysokoteplotní plazma na tokamaku GOLEM  
Dostupné na internetu:

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

[2] Tokamak GOLEM. Webová databáze výstřelů

<http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/> "číslo výstřelu"