

# Základní úloha na Tokamaku Golem

Sára Rosecká, Richard Šulc, Matěj Ivánek, Martin Sochor

30. 4. 2018

## 1 Pracovní úkoly

- seznámit se s tokamakem GOLEM a jeho webovým rozhraním
- osadit tokamak diagnostickými prostředky
- vytvořit samostatné el. pole (výboj bez plynu)
- vytvořit komplexní zadání pro výboj
- odhadnout ohmický odpor komory
- znázornit časový průběh proudu a vývoj teploty

## 2 Teorie

### 2.1 Plazma a jeho ohřev

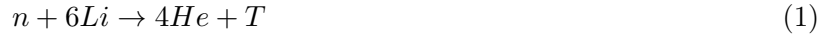
- Plazma je soubor částic s volnými nosiči nábojů, který je globálně neutrální a vykazuje kolektivní chování
- elektricky vodivé, reaguje na magnetické pole, samo může generovat elektrické a magnetické pole, probíhají v něm složité elektro- a magnetodynamické procesy (elektro- a magnetodynamickými procesy se rozumí, že jednotlivé části plazmatu spolu v tokamaku interagují prostřednictvím dalekodosahových magnetických a elektrických polí, tudíž na každou částici najednou působí velké množství jiných částic na vzdálenosti řádově až metrů)
- nejrozšířenější forma látky, až 99% pozorované atomární hmoty vesmíru
- médium pro termojaderné reakce
- kolektivní chování poukazuje na reakci plazmatu na přítomnost elektromagnetických polí jako celek

### 2.2 Lawsonovo kritérium

Požadavek kladený na teplotu plazmatu  $T$ , hustotu iontů v plazmatu  $n$  a dobu udržení plazmatu  $\tau$ , který zabezpečuje, aby při termonukleární fúzi v plazmatu vzniklo větší množství energie než je potřebné k ohřevu a náhradě ztrát zářením. zabránit dotyku horkého plazmatu a stěny komory magnetickým udržením (viz níže) sloučení jader dostat jádra na vzdálenost menší než urychlovačem nebo zahřátím na zápalnou teplotu

### 2.3 Magnetické udržení

Překonáním problémů s udržením přijde na řadu řešení problémů technologického charakteru. 1. Materiály stěn 2. Tritium: Rozpadá se beta rozpadem s poločasem 12.3 let. Na Zemi se prakticky nevyskytuje, je možné ho vytvořit neutronovou aktivací :



Druhá reakce je důležitá, protože se při ní produkuje další neutron, který může dále reagovat. Je tak v principu možné využít neutrony vznikající při DT reakci pro tvorbu dostatečného množství tritia. 3. Magnety: Objem prostoru, ve kterém je požadováno vysoké magnetické pole je z ekonomického hlediska nejvýznamější faktor limitující velikost fúzních zařízení.

### 2.4 Výpočet parametrů

Maximální teplotu jsme zjistili ze vztahu:

$$T_e = \left( \frac{I}{U} \right)^{1/3} \quad (3)$$

Průměrnou hustotu  $\bar{n}$  jsme zjistili ze vztahu:

$$\bar{n} = \frac{2p}{k_b T_p}, \quad (4)$$

kde  $p$  je tlak plynu v komoře,  $k_b = 8.61 \cdot 10^{-5} [JK^{-1}]$  je Boltzmannova konstanta,  $T_p = 24,4^\circ C$  je pokojová teplota.

Celkovou tepelnou energii plazmatu  $W_{TH}$  jsme zjistili ze vztahu:

$$W_{TH} = \frac{1}{3} n \cdot k_B \cdot T_E^{MAX} V_{tor}, \quad (5)$$

kde  $T_e$  je maximální elektronová teplota,  $V_{tor}$  je objem toroidu, jehož hodnotu dostáváme ze vztahu:

$$V_{tor} = 2\pi^2 Rr, \quad (6)$$

kde  $R$  je vzdálenost od středu trubice ke středu toroidu,  $r$  je poloměr trubice.

Odpor plazmatu jsme spočítali podle:

$$R_P = \frac{U}{0.7I_P}, \quad (7)$$

kde  $I_P$  je el. proud plazmatem. (spíš v plazmatu?)

Ohmický příkon spočítáme ze vztahu:

$$P_{OH} = \frac{R_p}{I_p^2} \quad (8)$$

$P_{loss}$  se v tomto případě rovná  $P_{OH}$  Doba udržení plazmatu  $\tau_e$

$$\tau_e = \frac{W_{TH}}{P_{loss}} \quad (9)$$

## 3 Pomůcky

Tokamak GOLEM, Rogowského pásek, cívečka, závit vodiče ve výbojové trubici, fotodioda s H-alfa filtrem.

## 4 Pracovní postup

Před spuštěním reakce (vypuštěním plynu) jsme obsadili tokamak příslušnými pomůckami. Rogowského pásek jsme upevnili na tělo Tokamaku a spojili lepicí páskou. Cívečku jsme připevnili k tělu tokamaku tak, aby směr proudu plazmatem mířil do vnitřku cívečky. Napětí na závit jsme měřili pomocí jednoho závitu vodiče který jsme umístili soustředně s komorou tokamaku.

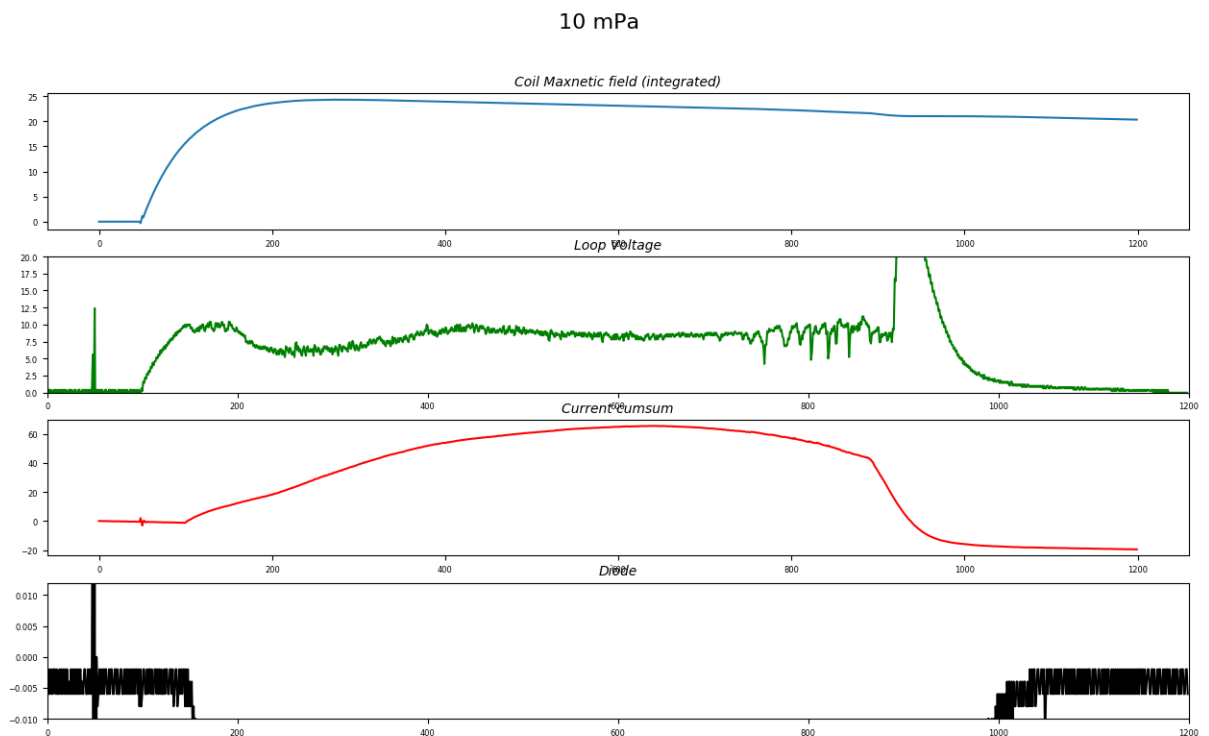
Po osazení tokamaku jsme všechny měřicí přístroje připojili k osciloskopu a při prvním výboji nastavili rozlišení. Zajímá nás vliv změny tlaku pracovního plynu v komoře na ostatní námi měřené parametry. Hodnoty tlaku jsme měnili v internetovém rozhraní.

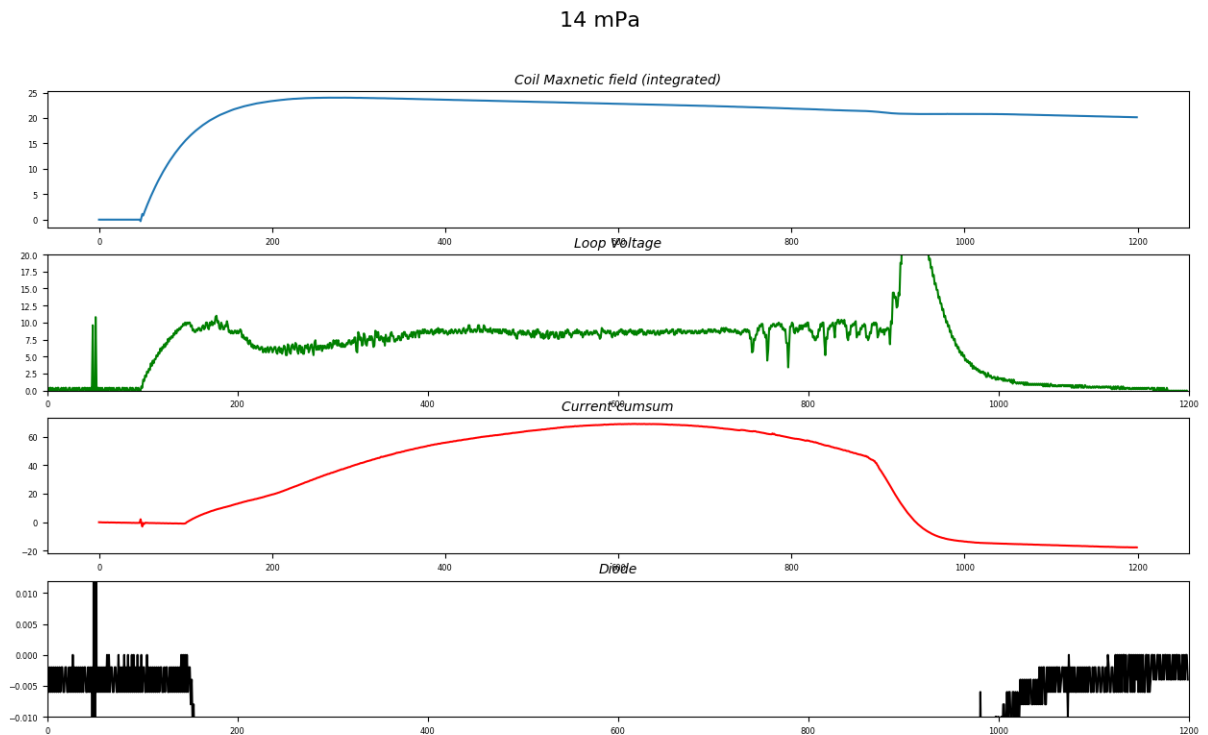
## 5 Výsledky

$P$ [mPa]	$P_r$ [mPa]	$T_e$ [eV]	$T_p$ [°C]	$\bar{n}$ [ $n/m^3$ ]	$W_{TH}$ [J]	$R_p$ [ $\Omega$ ]	$P_{OH}$ [W]	$P_{loss}$ [W]	$\tau_e$ [ms]	$I_P$ [kA]
0	1,77	375	24,4	1685	8,58	7,14	0,01	0,01	751	17
1	2,24	19	24,4	2132	0,54	4,76	0,02	0,02	32	16
2	3,53	17	24,4	3361	0,76	4,76	0,02	0,02	44	14
4	5,58	13	24,4	5312	0,92	0,14	0,14	$10^{-3}$	0	18
6	6,57	19	24,4	6255	1,61	0,14	7,15	$10^{-3}$	0	17
8	2,55	241	24,4	2430	7,96	7,15	0,01	0,01	696	12
10	11,44	494	24,4	10891	73,22	7,15	0,01	0,01	6403	25
14	13,88	$10^6$	24,4	13200	$1,96 \cdot 10^5$	0,07	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$4287 \cdot 10^5$	796

Table 1: Naměřené a vypočítané hodnoty veličin při několika výbojích v tokamaku.  $P$  je požadovaný tlak,  $P_r$  je skutečný tlak,  $T_e$  je elektronová teplota,  $\bar{n}$  je průměrná hustota,  $W_{TH}$  je celková tepelná energie plazmatu,  $R_p$  je odpor plazmatu,  $P_{OH}$  je příkon ohmického ohřevu,  $P_{loss}$  je ztrátový výkon,  $\tau_e$  je doba udržení plazmatu a  $I_P$  je proud procházející plazmatem

V následujících grafech můžeme vidět časový průběh výboje (údaje na ose x jsou ve  $100\mu s$ ).





První křivka znázorňuje průběh magnetického pole, druhá vývoj napětí, třetí proud plazmatem a čtvrtá slouží jako indikátor světelného projevu plazmatu. Můžeme si povšimnout, že na TOKAMAKU Golem dochází k průrazu asi v 8. ms. Vybrali jsme pouze dva grafy, u kterých je průběh výboje nejjasnější a sice výboje při tlaku 10 a 14 mPa.

## 6 Diskuse

Obecně nepovažujeme naše měření za úspěšné, protože je faktograficky irelevantní. Myslíme si, že hlavní chyba byla ve sběru a zpracování. Výhledově plánujeme svou práci reorganizovat a časově lépe rozložit, což, jak doufáme, povede k lepším výsledkům. Náš původní záměr změřit elektronovou teplotu při měnícím se tlaku pracovního plynu se nesetkal s úspěchem, protože jsme se pravděpodobně při výpočtech dopustili hrubých chyb, což se na výsledných hodnotách teploty výrazně podepsalo.

## 7 Zdroje

[wiki] Toroid [online]. 2017 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Torus>