

Číslo úlohy: 13

Skupina: 4

Kruh: Středa 15:30

Jméno: Denis Krapivin

Datum měření: 4.5.2022

Kolega: Kseniia Politskovaia

Klasifikace:

## 1 Pracovní úkoly

1. **DŮ:** Learn how to access and manipulate the remote data files from GOLEM measurements according to [1]. Then use the link at [1] to access the web-based virtual control room and get familiar with the web interface. At least one group member must have the remote file access already set up and tested when the experiment begins.
2. Connect to the web control interface of your group's oscilloscope (the link will be provided to you on the spot) and set up your oscilloscope for measurement. Use [2] as a reference.
3. Using the remote control room, execute a test tokamak discharge with arbitrary values of  $U_B$ ,  $U_C D$  and  $p_0$ , pre-ionisation on. Plot the time traces of the individual diagnostic signals:
  - loop voltage  $U_l$  (channel 1)
  - voltage induced on the small  $B_t$  measuring coil (channel 2)
  - voltage induced on the Rogowski coil (channel 3)
  - voltage of the photodiode with an  $H_\alpha$  filter measuring the plasma radiation intensity (channel 4)
4. Using the remote control room, execute 10 discharges with 5 different values of  $U_B$ , 2 different values of  $U_C D$ , arbitrary but constant  $p_0$  and  $T_C D$  and pre-ionisation on. This discharge series may be shared between the present groups so that the laboratory as a whole takes less time.
5. Process the oscilloscope data as described in sections 5 and 6. Compare standard GOLEM diagnostics output with processed oscilloscope data for one discharge.
6. For each of the discharges, calculate the energy confinement time  $\tau_E$  and the toroidal magnetic field  $B_t$  during the quasi-stationary discharge phase. Plot a  $(B_t, \tau_E)$  scatterplot with the errorbars representing the standard deviation (see section 6.2). Calculate the mean confinement time  $\tau_E$  and compare it to the Neo-Alcator scaling law [3, page 1131], which relates the ratio of the confinement time  $\tau_E$  and the electron density  $n_e$  to the tokamak major radius  $R$  and minor radius  $a$ .

## 2 Pomůcky

The GOLEM tokamak, basic GOLEM diagnostics ( $U_l$  wire,  $B_t$  coil, Rogowski coil, photodiode with  $H_\alpha$  filter), RIGOL oscilloscope, device for remote tokamak operation (laptop).

### 3 Teoretický úvod

Tokamaky jsou stroje se silným magnetickým polem, jejichž úkolem je jednoho dne stát se palivem pro fúzní reaktory čisté a bezpečné elektrárny. Jednou ze základních charakteristik tokamaků je úbytek energie. Čím pomalejší je úbytek energie, tím lépe je omezena energie plazmy. Kvalita omezení je tedy charakterizována veličinou  $\tau_E$ , která je doba zadržení energie nebo jen doba zadržení. Dobu zadržení  $\tau_E$  lze podle teorie [1] vypočítat ze znalosti základních měřených diagnostik  $U_l$  a  $I_p$  jako

$$\tau_E = \frac{0,3en_eV_p}{U_l^{\frac{5}{3}}I_p^{\frac{1}{3}}}, \quad (1)$$

kde  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C je nábojem elektronu [3],  $V_p$  je objem plazmy a  $n_e$  je střední hustota elektronů uvnitř tokamaku.

Pro odhad střední hustoty elektronů  $n_e$  uvnitř tokamaku se používá [1] vztah

$$n_e = \frac{2p_0V_{ch}}{k_B T_0 V_p}, \quad (2)$$

kde  $p_0$  je tlak uvnitř tokamaku,  $k_B = 1,380649 \cdot 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup> je Boltzmannova konstanta [4],  $T_0 = 300$  K je pokojová teplota [1],  $V_{ch} = 150$  l je objem vakuové komory [1].

Poloidální magnetické pole má dvě složky: pole  $B_{p,p}$  generované proudem plazmatu  $I_p$  a pole  $B_{p,ch}$  generované toroidálním proudem  $I_{ch}$  indukovaným smyčkovým napětím v komoře tokamaku. Příslušné proudy jsou pak úměrné jejich magnetickému poli podle Biot-Savartova zákona. Současný příspěvek komory je nežádoucí a musí být odstraněn. Tím pádem proud plazmy  $I_p$  lze najít jako

$$I_p(t) = C_{RC} \int_0^t U_{RC}(\tau) d\tau - \frac{U_l(t)}{R_{ch}}, \quad (3)$$

kde  $R_{ch} = 0,0097 \Omega$  je měrný odpor komory tokamaku,  $U_{RC}$  je napětí na Rogovského cívce,  $C_{RC}$  je kalibrační konstanta a  $t$  je čas.

Podle Faradayova indukčního zákona při změně magnetického toku procházející vodivou smyčkou se mění i napětí na smyčce. Poté magnetickou indukčnost toroidálního magnetického pole  $B_t$  lze najít jako

$$B_t(t) = C_{B_t} \int_0^t U_{B_t}(\tau) d\tau, \quad (4)$$

kde  $U_{B_t}$  je měřené napětí a  $C_{B_t}$  je kalibrační konstanta.

### 4 Postup měření

Drátěnou smyčku pro měření napětí  $U_l$  položíme na tokamak podél plazmového prstence. Kleště pro měření časové derivaci toroidálního magnetického pole umístíme mezi dvě cívky toroidálního pole. Drát Rogovského cívky protáhneme speciálním otvorem blízko středu tokamaku a uvážeme ji kolem kamery. Fotodiodu s Ha filtrem umístíme na skleněnou okénko na boční stěně tokamaku. Každou ze diagnostik po pořadě připojíme k kanálům osciloskopu.

Aparatura tokamaku je ovládána pomocí webového velínu GOLEM. Ve spolupráci s dalšími skupinami postupně uděláme celkem 10 výbojů pro 5 různých hodnot napětí  $U_B$  (800 – 1000 V) a 2 různé hodnoty  $U_{CD}$  (400 V a 550 V) při konstantním tlaku  $p_0 = 20$  mPa. Dobu zpoždění  $T_{CD}$  zvolíme nulovou.

## 5 Vypracování

Vypočtené hodnoty magnetické indukce  $B_t$ , proudu  $I_p$  a doby udržení plazmy  $\tau_E$  jsou v Tab. 1.

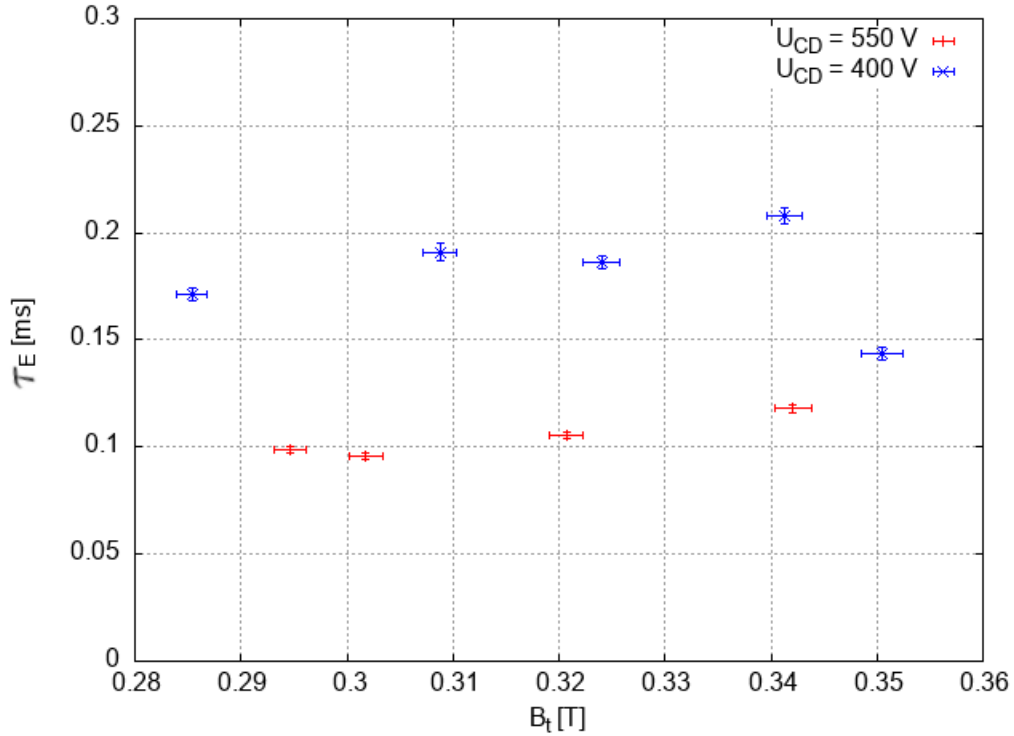
Naměřené napětí  $U_1(t)$  a získané podle (4)  $B_t(t)$  a podle (3)  $I_p(t)$  jsou zprůměrovány přes kvazistacionární fázi výboje. Chyby jsou chybami aritmetického průměru [2]. Vzpočtený časový vývoj magnetické indukce  $B_t(t)$  a proudu plazmy  $I_p(t)$  v tokamaku GOLEM při nastavených hodnotách napětí  $U_{CD} = 550$  V a  $U_{B_t} = 850$  V je na Obr. 2.

Doba udržení plazmy  $\tau_E$  je nalezená podle (1) a (2), chyba je chybou nepřímého měření [2].

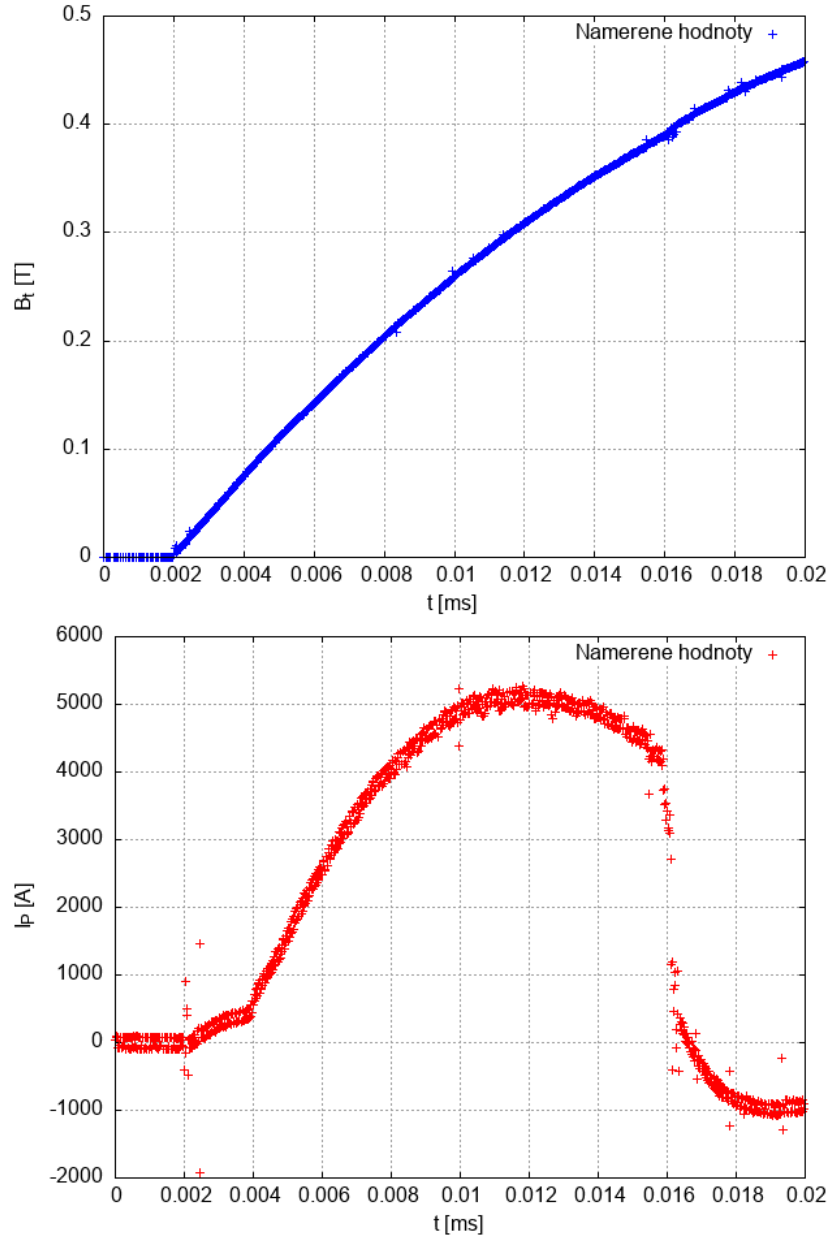
$U_{CD}$ [V]	$U_B$ [V]	$B_t$ [T]	$U_1$ [V]	$I_p$ [A]	$\tau_E$ [ms]
550	800	$0,2947 \pm 0,00015$	$9,15 \pm 0,09$	$5432 \pm 11$	$0,0990 \pm 0,0016$
550	850	$0,3018 \pm 0,00016$	$9,47 \pm 0,09$	$5018 \pm 13$	$0,0959 \pm 0,0015$
550	900	$0,3207 \pm 0,00016$	$8,80 \pm 0,08$	$5433 \pm 8$	$0,01056 \pm 0,0016$
550	950	$0,3421 \pm 0,00017$	$8,21 \pm 0,08$	$5545 \pm 9$	$0,1180 \pm 0,0020$
400	800	$0,2854 \pm 0,00014$	$7,02 \pm 0,07$	$3976 \pm 9$	$0,1710 \pm 0,0030$
400	850	$0,3088 \pm 0,00016$	$6,81 \pm 0,08$	$3301 \pm 9$	$0,1911 \pm 0,0040$
400	900	$0,3240 \pm 0,00017$	$6,75 \pm 0,07$	$3748 \pm 7$	$0,1860 \pm 0,0030$
400	950	$0,3413 \pm 0,00017$	$6,23 \pm 0,07$	$4024 \pm 7$	$0,2080 \pm 0,0040$
400	1000	$0,3505 \pm 0,00019$	$8,07 \pm 0,09$	$3352 \pm 9$	$0,1433 \pm 0,0030$

Tab. 1: Vypočtené hodnoty magnetické indukce  $B_t$ , proudu  $I_p$  a doby udržení plazmy  $\tau_E$ .  $U_{CD}$  a  $U_B$  jsou nastavené hodnoty napětí a  $U_1$  jsou naměřené hodnoty napětí na cívice podél plazmového prstence.

Vypočtené hodnoty doby udržení  $\tau_E$  v závislosti na velikosti magnetické indukce  $B_t$  toroidálního magnetického pole pro dva různá nastavení napětí  $U_{CD}$  jsou zobrazeny na Obr. 1.



Obr. 1: Vypočtené hodnoty doby udržení  $\tau_E$  v závislosti na velikosti magnetické indukce  $B_t$  toroidálního magnetického pole.



Obr. 2: Vypočtený časový vývoj magnetické indukce  $B_t(t)$  (červené body) a proudu plazmy  $I_p(t)$  (modré body) v tokamaku GOLEM při nastavených hodnotách napětí  $U_{CD} = 550$  V a  $U_{B_t} = 850$  V.

## 6 Diskuze

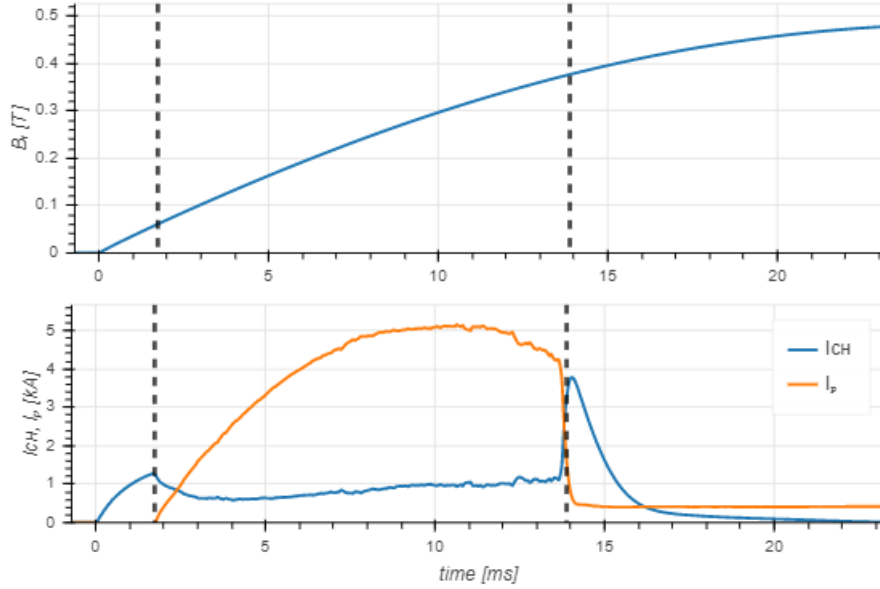
Hodnoty napětí ze základních diagnostik tokamaku GOLEM jsme považovali za přesné. Před výpočty jsme od všech napěťových signálů odečetli pozadí podle postupu v návodu [1].

Při porovnání časového vývoje proudu plazmy  $I_p(t)$  Obr. 2 a Obr. 3 je vidět, že ve kvazistacionární fázi výboje výsledky se celkem shodují. Velký rozdíl vypočtených námi hodnot a hodnot automaticky zpracovaných lze pozorovat na kraji časového intervalu do a po kvazistacionární fázi. Pravděpodobně tento rozdíl je způsoben metodou zpracování vstupních dat (odečtení od proudu nalezeného integrací  $U_{RC}$  hodnoty proudu  $I_{ch}$ ).

Při porovnání časového vývoje magnetické indukce  $B_t(t)$  Obr. 2 a Obr. 3 je vidět, že ve kvazistacionární fázi výboje výsledky se shodují velice dobře.

Předpokládaná závislost doby udržení  $\tau_E$  na velikosti magnetické indukce  $B_t$  toroidálního magnetického pole Obr. 1 je spíše lineární, ovšem kvůli malému počtu dat nelze jednoznačně rozhodnout o druhu této závislosti. Ovšem

je vidět, že doba udržení  $\tau_E$  je závislá na hodnotě napětí  $U_{CD}$ .



Obr. 3: Automatické zpracované časový vývoj magnetické indukce  $B_t(t)$ , proudu plazmy  $I_p(t)$  a proudu  $I_{CH}(t)$  v tokamaku GOLEM při nastavených hodnotách napětí  $U_{CD} = 550$  V a  $U_{B_t} = 850$  V [5].

## 7 Závěr

Seznámili jsme s tokamakem GOLEM a základními diagnostiky plazmy.

Z naměřených základních diagnostikami dat jsme určili dobu udržení tokamaku  $\tau_E$  a magnetickou indukci  $B_t$  pro různá nastavení napětí  $U_{CD}$  a  $U_{B_t}$  Tab. 1. Závislost mezi  $\tau_E$  a  $B_t$  jsme vynesli do grafu na Obr. 1.

## Literatura

- [1] GOLEM Wiki contributors, *Magnetic confinement of high temperature plasma at the GOLEM tokamak*, [online, cit.8.5.2022] - <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/Education/GMinstructions/extracts/Universities/CTU.cz/PRA2/docum.pdf>
- [2] Petr Chaloupka, *Základy fyzikálních měření*, prezentace [online, cit.8.5.2022] - <https://people.fjfi.cvut.cz/chalopet/ZFM/ZFM.pdf>
- [3] WolframAlpha, *Charge of electron*, [online, cit.8.5.2022] - <https://www.wolframalpha.com/input?i=electron+charge>
- [4] WolframAlpha, *Boltzmann constant*, [online, cit.8.5.2022] - <https://www.wolframalpha.com/input?i=Boltzmann+constant>
- [5] GOLEM Wiki contributors, Tokamak GOLEM - Shot Database - #39019, webové stránky [online, cit.8.5.2022] <http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/39019/>