



Jméno: **Michal Červeňák** Kolega: Ondřej Glac
Kruh: **Útorok** Číslo skup.: 1
Měřeno: **18.4.2017** Zpracování: 15 h Klasifikace:

1 Pracovní úkoly

1. V domácí přípravě se naučte manipulaci se vzdálenými datovými soubory [?]. Pokud máte možnost, přineste si s sebou na měření notebook, na kterém máte tyto funkce manipulace se vzdálenými soubory dat zprovozněné. Na stejné stránce najdete přidělené web rozhraní, ze kterého budete ovládat tokamak. Seznamte se s ním.
2. V laboratoři tokamaku se seznamte fyzicky s tokamakem GOLEM a zmapujte na něm jeho základní prvky: komoru, transformátorové jádro, cívky toroidálního magnetického pole, primární cívky, čerpací systém, energetický zdroj, kondenzátorové baterie, systém napouštění pracovního plynu, řídicí systémy, datový sběr a server. S pomocí asistenta prověřte funkci jednotlivých komponent infrastruktury tokamaku:
 - a) vypněte a zapněte čerpání tokamaku,
 - b) napusťte do tokamaku pracovní plyn,
 - c) vyzkoušejte předionizační trysku.
3. V laboratoři tokamaku osad'te tokamak základními diagnostickými prostředky (drát na měření napětí na závit U_l , cívečka měření toroidálního magnetického pole B_t , Rogowského pásek pro měření I_p a fotodiodu s H_α filtrem), napojte vše na 4-kanálový osciloskop Tektronix (resp. na datové sběry) a zaznamenávejte časové vývoje signálů jednotlivých diagnostik. Proveďte následující seznamovací experimenty (pro přístup k datům na vzdáleném serveru použijte metodu z pracovního úkolu č.1):
 - Vygenerujte na tokamaku samostatné toroidální elektrické pole E_t a zaznamenejte časový průběh napětí na závit $U_l(t)$. Z jeho průběhu a signálu z Rogowského pásku $I_{tot}(t)$ odhadněte z Ohmova zákona v prvním přiblížení odpor komory R_{ch} se zanedbáním její indukčnosti.
 - Vygenerujte na tokamaku samostatné toroidální magnetické pole B_t a zaznamenejte časový průběh napětí na měřicí cívce $U_B(t)$.
 - Vytvořte komplexní zadání pro výboj (pracovní plyn + předionizace + toroidální elektrické pole + toroidální magnetické pole) v tokamaku a zadejte k provedení. Z napětí na závit $U_l(t)$ a průběhu proudu na Rogowského pásku $I_{tot}(t)$ vypočítejte časový vývoj proudu plazmatem $I_p(t)$ se zanedbáním jeho indukčnosti. Následně znázorníte časový vývoj elektronové teploty $T_e(t)$.

Všechny závislosti získané z improvizované diagnostiky srovnávejte s původním diagnostickým osazením tokamaku GOLEM.

4. Vzdáleným řízením proveďte 10 výbojů, ve kterých se budete snažit pokrýt maximálně prostor parametrů (zadávejte co nejpestřejší spektrum parametrů výbojů), přičemž se pokuste dosáhnout co nejvyšší elektronové teploty.
5. Doma, při zpracovávání výsledků vytvořte tabulku 5 výstřelů s nejvyšší T_e a u každého uveďte vámi vypočtené parametry: délku výboje, maximální proud plazmatem, maximální elektronovou teplotu, maximální ohmický příkon, maximální energii plazmatu a dobu udržení v době maxima energie plazmatu.

2 Pomůcky

Pomůcky: Zařízení pro generaci a udržení vysokoteplotního plazmatu – tokamak GOLEM, pracovní plyn – vodík, U_l cívka, B_t cívka, Rogowského pásek, fotodioda, H_α filtr, měrka vakua, systémy datových sběrů, osciloskop Tektronix.

3 Teoretický úvod

Kompltný teoretický úvod je dostupný na [1]¹.

3.0.1 Spracovanie chýb merania

Označme $\langle t \rangle$ aritmetický priemer nameraných hodnôt t_i , a Δt hodnotu $\langle t \rangle - t$, pričom

$$\langle t \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad (1)$$

a chybu aritmetického priemeru

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \langle t \rangle)^2}{n(n-1)}}, \quad (2)$$

pričom n je počet meraní.

4 Výsledky merania

4.1 Vákuový výboj

4.1.1 Numerická integrácia

Na začiatku bol spracovaný vákuový výboj (#23719 podľa [2]). Numericky boli vyintegrované hodnoty $\frac{dB_t(t)}{dt}$ a $\frac{dI'_{tot}(t)}{dt}$, čím sme dostali $B_t(t)$ a $I'_{tot}(t)$. Za integračný krok bola použité smplovacia frekvencia dát z osciloskopu $\Delta t = 1 \cdot 10^{-7}$ s.

¹Nepodarilo sa mi rozbehnúť preklad toho zdrojáku.

4.1.2 Kalibrácia Rogowského pásku

Pomocou porovnanie maxim $I'_{tot_{max}}$ s referenčnými dátami $I_{tot_{max}}$ [2], určil kalibračný koeficient Rogowského pásku.

$$C = \frac{I_{tot_{max}}}{I'_{tot_{max}}} = 2,75 \cdot 10^6 \cdot ^2 \quad (3)$$

Touto kalibračnou konštantou boli preškálované všetky hodnoty $I_{tot}(t)$ pre všetky nasledujúce merania.

4.1.3 Odpor komory

Zo závislosti napätia $U_l(t)$ na prúde $I_{tot}(t)$, ktorý je pri vákuovom výboji rovný prúdu komorou, bol zistený odpor komory

$$R = (14,308 \pm 0,001) \text{ m}\Omega,$$

kalibračná krivka spolu so závislosťou $U_l(t)$ na $I_{tot}(t)$ je v grafe Obr. 1.

4.2 Výboj s pracovným plynom

Namerané pre všetkých 6 výbojov boli najskôr vyintegrované hodnoty $\frac{dB_t}{dt}$ a $\frac{dI_{tot}}{dt}$ rovnako ako v predchádzajúcom prípade. Prúd $I_{tot}(t)$ bol zkalibrovaný pomocou kalibračnej konštanty zo vzťahu 3.

4.2.1 Prúd plazmou

Pre výpočet prúdu plazmou sme využili vzťah (15) z [1] A našli sme si jeho maximálnu hodnotu.

4.2.2 Teplota plazmy

Podľa vzťahu (4) z [1] sme určili teplotu plazmy $T(t)$.

4.2.3 Ohmický príkon

Ohmický príkon sme určili z napätia $U_l(t)$ a prúdu plazmou $I_p(t)$ ako $P_{OH}(t) = I_p(t) U_l(t)$.

4.2.4 Energia plazmy

Energiu plazmy $W_{th}(t)$ sme určili podľa vzťahu (7) z [1], kde n sme určili pre každý výstrel zo vzťahu (5) z [1]. Pričom teplotu je potrebné previesť z [eV] na [K].

²Zároveň $1/2C$ z [1]

4.2.5 Doba udržania

Doba udržania τ_E bola určená v čase t_0 , kde $W_{th}(t)$ nadobúda svoje maximum, teda

$$\frac{dW_{th}(t)}{dt} = 0,$$

potom vzťah (9) z [1] prechádza na $P_{loss}(t) = P_{OH}(t)$, a teda

$$\tau_E = \frac{W_{th}(t_0)}{P_{OH}(t_0)}. \quad (4)$$

4.2.6 Doba udržania

Doba udržania bola vypočítaná pomocou dvoch thresholdov z $H_\alpha(t)$ radiácie. Čas začiatku a konca života plazmy.

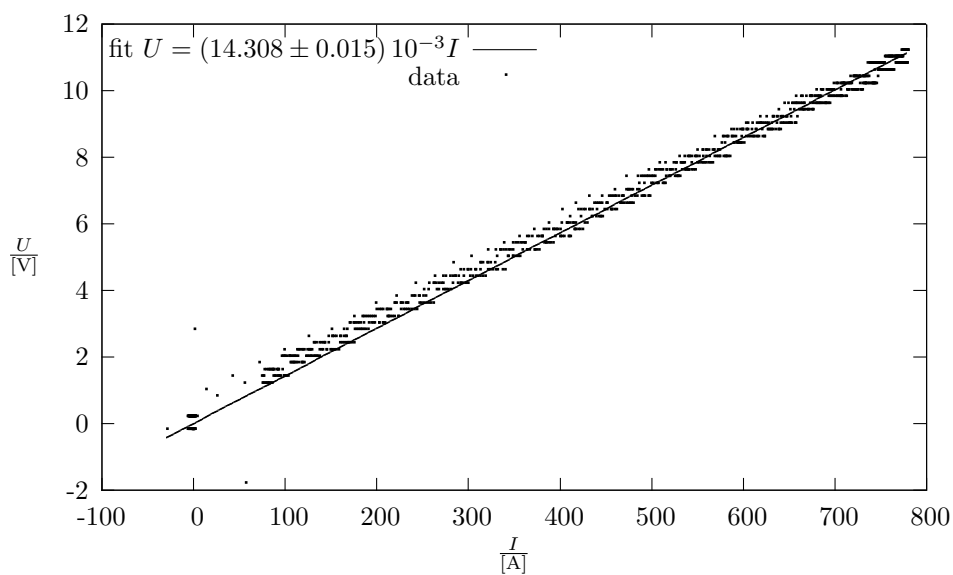
Výstrel ID podľa [2]	$\frac{T_{max}}{[eV]}$	$\frac{I_{pmax}}{[kA]}$	$\frac{W_{max}}{[10^{-3}J]}$	$\frac{\tau_E}{[10^{-3}ms]}$	$\frac{P_{ohmax}}{[kW]}$	$\frac{t}{[ms]}$
#23728	$39,33 \pm 0,04$	$2,901 \pm 0,03$	$93,69 \pm 0,09$	$3,96 \pm 0,01$	$30,35 \pm 0,03$	6,30
#23729	$40,44 \pm 0,04$	$3,453 \pm 0,03$	$74,66 \pm 0,07$	$2,30 \pm 0,01$	$44,29 \pm 0,04$	5,65
#23730	$46,60 \pm 0,05$	$3,837 \pm 0,04$	$93,99 \pm 0,09$	$3,40 \pm 0,01$	$49,74 \pm 0,05$	6,30
#23731	$36,47 \pm 0,04$	$2,325 \pm 0,02$	$144,11 \pm 0,14$	$10,51 \pm 0,02$	$20,63 \pm 0,02$	6,31
#23732	$36,11 \pm 0,04$	$2,756 \pm 0,03$	$146,32 \pm 0,15$	$15,05 \pm 0,02$	$36,87 \pm 0,04$	4,90
#23733	$31,44 \pm 0,03$	$2,478 \pm 0,02$	$104,13 \pm 0,10$	$8,94 \pm 0,02$	$31,45 \pm 0,03$	4,64

Tab. 1: Parametre jednotlivých výstrelů, kde T_{max} je maximálne elektronová teplota plazmy, I_{pmax} je maximálny prúd plazmou, W_{max} je maximálna energia plazmy, τ_E je čas udržania plazmy a P_{OHmax} je maximálna hodnota ohmického odporu a t doba života plazmy.

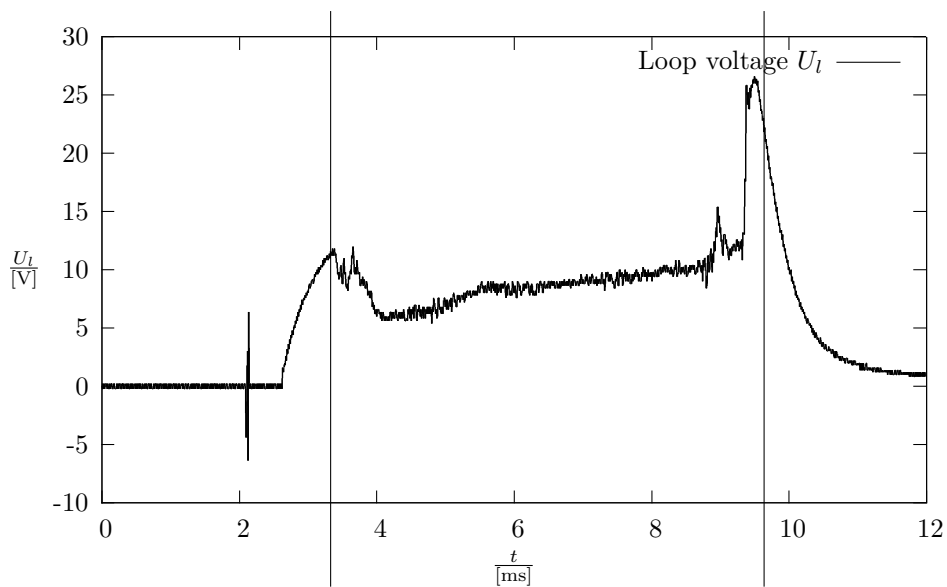
5 Diskusia

5.1 Určenie času

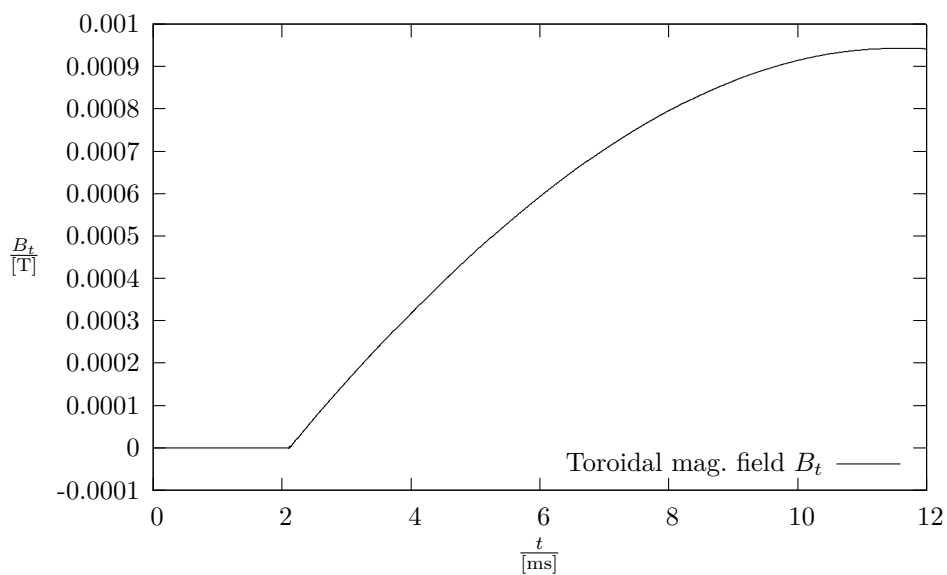
Surová dáta z osciloskopu sú bez časovej „osi“ (značky) a teda nieje známa samplovacia frekvencia, táto sa určila porovnaním s referenčnými dátami na [2], kde bola odhadnutá vzdialenosť maxim $U_l(t)$ a porovnaná s maximami v dátach. Obecné zlé predpoklad, ale v našom prípade nevyhnutý, bol ten že dáta majú 1200 riadkov a osciloskop má mriežku rozdelenú na 12 dielikov, z čoho sa dalo usudzovať, že na jeden dielik bude pripadať okrúhly časový interval.



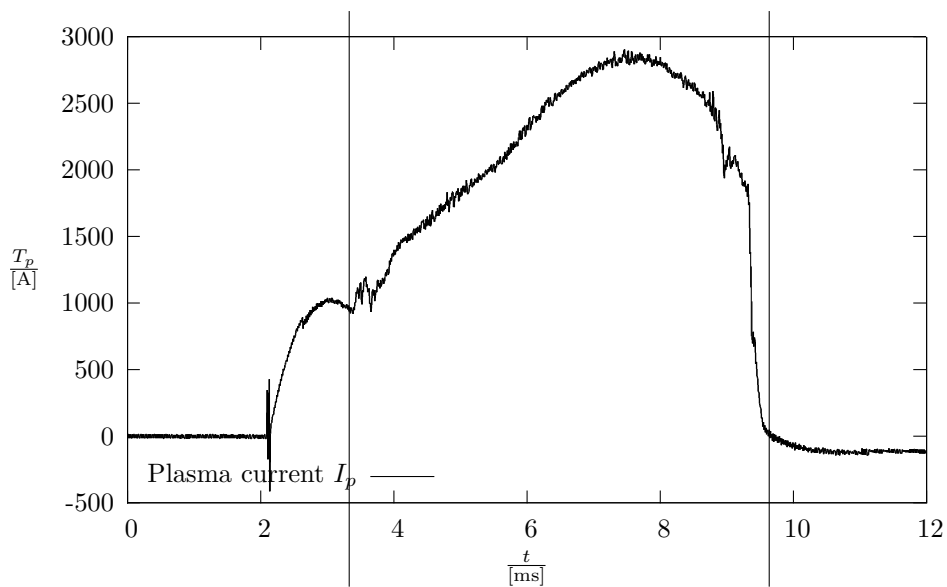
Obr. 1: Volt-amperová charakteristika komory, preložená fitom $U = (14.308 \pm 0.015) 10^{-3} I$, kde smernica predstavuje odpor komory R .



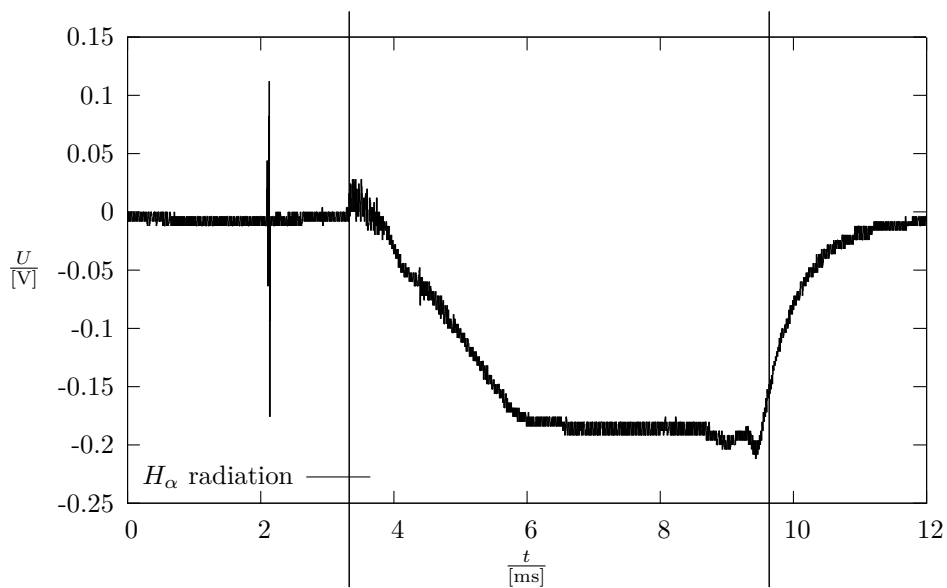
Obr. 2: Závislosť napätia $U_l(t)$ na čase t pre výstrel #23728. S určenými časmi začiatku a konca života plazmy.



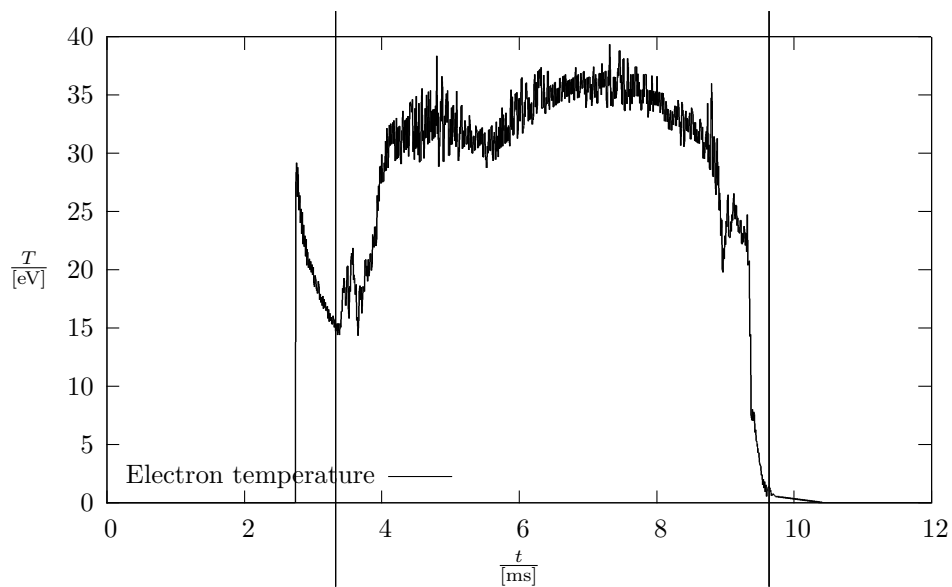
Obr. 3: Nekalibrovaná závislosť toroidálneho magnetického poľa $B_t(t)$ na čase t pre výstrel #23728.



Obr. 4: Závislosť prúdu plazmy $I_p(t)$ na čase t pre výstrel #23728. S určenými časmi začiatku a konca života plazmy.



Obr. 5: Závislosť napätia na $H_\alpha(t)$ dióde na čase t pre výstrel #23728. S určenými časmi začiatku a konca života plazmy.



Obr. 6: Závislosť teploty plazmy $T(t)$ na čase t pre výstrel #1. S určenými časmi začiatku a konca života plazmy.

5.2 Určenie kalibračnej konštanty Rogowského pásku

Pri určovaní kalibračnej konštanty Rogowského pásku sme predpokladali, že náš pásik bude mať kalibračnú krivku lineárnu³. Chybou v našom prípade bolo predovšetkým, že sme porovnávali len maximá. Pri našom kalibrovanom mohla byť poloha maxim ovplyvnená fluktuáciami a ich veľkosť ovplyvnená toroidálnym magnetickým poľom vid' 5.4. Bohužiaľ sa mi k surovým dátam nepodarilo dostať, čo by skvalitnilo našu kalibráciu, preto je táto chyba zaťažená veľmi veľkou ($\sim 20\%$) systematickou chybou.

5.3 Určenie odporu komory

Pri určovaní odporu komory sme použili už predchádzajúce dve kalibrácie teda času a prúdu na základe Rogowského pásku, z čoho môže plynúť istá nepresnosť a systematická chyba. Pri určovaní odporu komory sme robili lineárny fit, ktorý prechádzal počiatkom⁴. Z grafu Obr. 1 môžeme vidieť, že pri tejto kalibrácii môžeme plne zanedbať indukčnosť komory a kalibračná priamka sa kryje s dátami na celom rozsahu, a predovšetkým pre vysoké prúdy a napätia teda v maxime I_p , kde $U_L(t) = -L \frac{dI(t)}{dt} = 0$. Z rovnice fitu vidíme, že chyba fitu je v ráde promile.

5.4 Rušenie od toroidálneho magnetického poľa

Na grafe Obr. 4 je vidieť približne od 1,75 ms do 2,25 ms rušenie od toroidálneho magnetického poľa, ktoré sa naintegrovalo a zachytilo. Aj napriek niekoľkých pokusoch sa nám nepodarilo polohu Rogowského pásku upraviť tak aby toto rušenie úplne vymizlo. Rušenie má vplyv predovšetkým na hodnoty maximálneho prúdu plazmou, ktorý je vďaka tomuto vyšší. Oddelenie a vyfiltrovanie je taktiež náročné a dalo by sa riešiť extrapoláciou hodnôt $dI_p(t)/dt$ do problémovej oblasti, vzhľadom ale na nepresnosti tejto metódy bo bolo vhodné pri pre presnejšie meranie zkalibrovať a zistiť veľkosť tohoto parazitného toku Φ v závislosti na B_t bez poloidálneho poľa.

5.5 Určenie životného času

Prvý z thresholdov, teda štartovací, bol určený ako bod kedy napätie na fotodióde prvý krát presiahne hodnotu 0,01 V ale po čase 3,5 ms od začiatku merania, tento dôvod bol na potlačenie počiatočného šumu.

Druhý teda konečný threshold, je problematický, je určený ako moment, kedy je napätie nižšie ako 0,15 V ale až najmenej $\Delta t = 3$ ms za prvým thresholdom. Práve tento čas Δt sa mení od výstrelu k výstrelu a nedá sa nastaviť obecné. Ako riešenie bez takýchto nechutných podmienok je skúmať deriváciu tohoto napätia z jeho rapídneho nárastu alebo poklesu určiť, tieto thresholdy.

³čo nie isté

⁴Predpoklad z Ohmovho zákona $U = RI$

5.6 Energie plazmy a doba udržania

K určení energie plazmy sme potrebovali určit čas t_0 , kde je $W_{th}(t)$ maximálne, namiesto určovania jednej hodnoty, ktorá môže byť fluktuáciami skreslená a nepresná. Lepším spôsobom by bolo zobrať $O(t_0, \varepsilon)$ okolie t_0 a v tomto okolí napočítať, priemernú hodnotu τ_E podľa vzťahu 4.

5.7 Záverom

Všetky naše merania sú závislé na počiatočnej kalibrácii, ktorá sa pri tomto meraní ukazuje ako najväčší problém. Jej kvalitné a presné prevedenie by výrazne spresnilo meranie. Všetkým aj napriek nepresnej kalibrácii nám časový priebeh základných diagnostik výrazne neovplyvnilo vid' Obr. 2, Obr. 3, Obr. 4, Obr. 5 a Obr. 6.

6 Záver

Z tabuľky 1 vidíme, že najvyššiu teplotu dostávame pre výboj s ID #23730.

Reference

- [1] Vysokoteplotní plazma na tokamaku GOLEM [cit. 28.04.2017] Dostupné po prihlásení na :<http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/KFpract/15/Basics/uloha13A.pdf>
- [2] GOLEM @ FJFI.CVUT [cit. 28.04.2017] Vojtěch Kusý :<http://golem.fjfi.cvut.cz/>