

Fyzikální praktikum

FJFI ČVUT v Praze



Úloha: 3. Měření rezonanční křivky sériového a vázaného rezonančního obvodu

Datum měření: 24.2.2014

Kruh: 1

Skupina: 3, Alena Harlenderová a Filip Nechanský

Autor: Alena Harlenderová

Klasifikace:

Pracovní úkoly

1. V domácí přípravě se naučte manipulaci se vzdálenými datovými soubory, viz. [1]. Pokud máte možnost, přinesre 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 systém, datový sběr a server. 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, cívečka měření toroidálního magnetického pole, Rogowského pásek pro měření I_p a fotodiodu na měření záření), napojte vše na 4-kanálový osciloskop Tektronix a zaznamenávejte časové výboje 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 zaznamenjte 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 zaznamenávejte časový průběh napětí na měřící 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 výboj proudu plazmatem $I_p(t)$ se zanedbáním jeho indukčnosti. Následně znázorněte časový výboj elektronové teploty $T_e(t)$.

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

4. Vzdáleným řízením z praktik proved'te (třeba ve spolupráci s dalšími skupinami) určitý počet výbojů, ve kterém se budete snažit pokrýt maximální prostor parametrů (zadávejte co nejpestřejší spektrum parametrů výbojů), přičemž se pokuste dosáhnout co nejvyšší elektronové teploty.
5. Doma při postzpracování výsledků:
 - Z vybraného vakuového výboje spočítejte (s příslušnou chybou) odpor a indukčnost komory. Doporučujeme provést fit v Gnuplotu.
 - Vytvořte tabulku 10 výstřelů s nejvyšší T_e . U každého uveďte délku výboje, maximální proud plazmatem (se započtením indukčnosti komory a sloupce plazmatu), maximální elektronovou teplotou, maximální ohmický příkon, maximální energii plazmatu a maximální dobu udržení.

Pomůcky

Zařízení pro generaci a udržení vysokoteplotního plazmatu - tokamak GOLEM, pracovní plyn - vodík, U_l cívka, B_t cívka, Rogowského pásek, fotodioda, měrka vakua, datový sběr, osciloskop Tektronix.

Teorie

Cílem fúzního výzkumu je vytvoření a udržení vysokoteplotního plazmatu. K tomu nám pomáhá tokamak, zařízení určené právě pro tyto účely. Za předpokladu, že ve vysokoteplotním plazmatu dochází k jaderné přeměně lehčích prvků na těžší, můžeme získávat energii. Pokud se výzkum v této oblasti posune ještě o pár kroků dále, mohou tokamaky jednou sloužit jako prakticky nevyčerpatelný, k přírodě šetrný a poměrně bezpečný zdroj energie.

Jak můžeme vidět na obrázku (1) převzáného z [1], základ celého tokamaku tvoří transformátor generující toroidální magnetické pole a vakuová magnetická výbojka stočená do kruhu. Změna proudu v primárním vinutí vyvolává toroidální elektrické pole uvnitř výbojky. Pokud překonáme určitou mez, pracovním plynem o nízkém tlaku začne díky ionizaci téct proud. Ten ohřívá plazma na vysoké teploty. S rostoucí teplotou však klesá odpor plazmatu, takže nelze ohmicky plazma ohřívát do nekonečna. Komoru před poškozením horkým plazmatem chrání toroidální magnetické pole, které generují cívky umístěné kolem komory. Pro účely tohoto protokolu postačí takovýto stručný úvod. Více je možno se dočíst v [1].

Tokamak lze osadit základní diagnostikou. Zpracování signálů je pak založeno na Faradayově zákonu.

$$U = \oint E \mathit{r} \mathit{m} \mathit{d}l = \frac{d}{dt} \int B(t) dS = -S_{eff} \frac{dB(t)}{dt}, \quad (1)$$

ke S_{eff} je efektivní plocha cívky kolmá na směr magnetického pole. My jsme měřili následující parametry:

- Napětí na závit U_l . To se měří pomocí jediného závitu cívky namotaného po obvodu komory. Na této cívce se indukuje stejné napětí jako na komoře, protože se jedná o sekundární transformátor.

- Magnetické toroidální pole B_t lze zjistit pomocí malé cívky umístěné na povrchu tokamaku tak, aby toroidální magnetické pole protékalo jejím vnitřkem kolmo k závitům. Vlivem změny toku toku toroidálního magnetického pole se na této cívce indukuje napětí. Časovou integrací signálu a přenásobením kalibrační konstantou pak dostaneme magnetické pole B_t . Signál je však třeba zbavit offsetu.
- Celkový proud I_t tekoucí plazmatem i komorou změříme pomocí změny poloidálního magnetického pole pomocí cívky namotané kolem komory. Této cívce se jemnuje Rogowskéhoho.
- Intenzita měřená pomocí fotodiody.

Při výbojích teče část proudu komorou. Parametry komory jako je odpor komory R_{ch} a indukčnost komory R_{ch} lze zjistit pomocí vakuového výstřelu. Průběh napětí na závit U_l je při takovém výstřelu dáno vztahem

$$U_l(t) = R_{ch} \cdot I_{tot}(t) + L_{ch} \frac{dI_{tot}(t)}{dt} \quad (2)$$

Jelikož známe $U_l(t)$, $I_{tot}(t)$ a $\frac{dI_{tot}(t)}{dt}$, lze použít 2D metodu nejmenších čtverců. Další možností je najít místo, kde je derivace $I_{tot}(t)$ nulová. V tom případě platí $\frac{dI_{tot}(t_0)}{dt} = 0$. Z toho plyne

$$R_{ch} = \frac{U_l(t_0)}{I_{tot}(t_0)}. \quad (3)$$

Komora a plazma představují dva paralelní LR obvody. Proto lze obvod popsat soustavou rovnic

$$U_l(t) = R_{ch} \cdot I_{ch}(t) + L_{ch} \frac{dI_{ch}(t)}{dt} \quad (4)$$

$$U_l(t) = R_p(t) \cdot I_p(t) + L_p(t) \frac{dI_p(t)}{dt} \quad (5)$$

$$I_{tot} = I_p(t) + I_{ch}(t) \quad (6)$$

Parametry komory jsou konstantní, parametry plazmatu se však mění. Pro účely tohoto protokolu postačí zjednodušení, kdy $L_{ch} = L_p(t) = 0$. Tím dostáváme soustavu rovnic

$$U_l(t) = R_{ch} \cdot I_{ch}(t) \quad (7)$$

$$U_l(t) = R_p(t) \cdot I_p(t) \quad (8)$$

$$I_{tot} = I_p(t) + I_{ch}(t), \quad (9)$$

ze které lze lehce zjistit proud komorou i plazmatem za předpokladu, že známe odpor komory R_{ch} .

$$I_{ch}(t) = \frac{U_l(t)}{R_{ch}} \quad (10)$$

$$I_p(t) = I_{tot}(t) - I_{ch}(t) = I_{tot}(t) - \frac{U_l(t)}{R_{ch}} \quad (11)$$

Důležitou charakteristikou je plazmatu je mimo jiné elektronová teplota T_e . Nejvyšší bývá uprostřed plazmatu. Pro naše měření jsme použili tokamak GOLEM. Na něm se rutinně neměří profil elektronové teploty. Pro naše účely však poslouží přibližný vzorec určený pro GOLEM založený na předpokladu parabolického průběhu elektronové teploty.

$$T_e(0, t) = \left(0, 7 \frac{I_p(t)}{U_l(t)}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (12)$$

Dosadíme-li proud plazmatem $I_p(t)$ v ampérech a napětí na závit $U_l(t)$ ve voltech, vyjde elektronová teplota v elektronvoltech.

Časový vývoj ohmického výkonu plazmatu je dán vzorcem

$$P_{OH}(t) = R_p(t) \cdot I_p^2(t) = U_l(t)I_p(t) - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} L_p(t) I_p^2(t) \quad (13)$$

Se zanedbáním $L_p = 0$ máme tedy

$$P_{OH}(t) = R_p(t) \cdot I_p^2(t) = U_l(t)I_p(t). \quad (14)$$

Další charakteristikou je celková tepelná energie plazmatu W_p , která se za předpokladu parabolického průběhu elektronové teploty T_e a dalších zanedbání dá vypočítat ze vzorce

$$W_p(t) = \frac{1}{3} \bar{n} k_B T_e(0, t) V, \quad (15)$$

kde \bar{n} je průměrná elektronová hustota, k_B Boltzmanova konstanta a V objem plazmatu. Přímou ze stavové rovnice můžeme vypočítat průměrnou elektronovou hustotu

$$\bar{n} = 2 \frac{p_0}{k_B T_{ch}}, \quad (16)$$

kde p_0 je tlak neutrálního plynu v komoře a T_{ch} elektronová teplota. Objem plazmatu získáme ze vzorce pro objem toroidu z [5].

$$V = 2\pi^2 R r^2, \quad (17)$$

kde r je průměr „trubice toru“ a R vzdálenost jeho středu od „středu trubice toru“. Pro tokamak GOLEM platí $R = 0,25\text{m}$ a $r = 0,085\text{m}$. Nesmíme také zapomenout na přepočty teploty $T_{ch} = 294\text{K}$ na elektronvolty pomocí přibližného vztahu $1\text{eV} = 11600\text{K}$. Ze vzorců (15) až (17) získáme konečný vzorec pro výpočet celkové tepelné energie

$$W_p(t) = \frac{4\pi^2 p_0 R r^2}{3 T_{CH}} T_e(0, t). \quad (18)$$

Energetické ztráty plazmatu dostaneme pomocí vztahu

$$P_{loss} = P_{OH}(t) - \frac{dW_p(t)}{dt}. \quad (19)$$

A nakonec dobu udržení plazmatu získáme pomocí

$$\tau_E(t) = \frac{W_p(t)}{P_{loss}(t)} = \frac{W_p(t)}{P_{OH}(t) - \frac{dW_p(t)}{dt}}. \quad (20)$$

Doba udržení plazmatu je parametr určující globální stabilitu plazmatu.

Vypracování

Nejprve jsme osadili tokamak základní diagnostikou uvedenou v teoretickém úvodu. Tu jsme napojili na osciloskop. Poté jsme vygenerovali samostatné toroidální elektrické pole E_t . Průběh napětí na závit $U_l(t)$ je zobrazen na obrázku (2), průběh $I_{tot}(t)$ na obrázku (3). Průběh R_{ch} vypočítaného ze vzorce (3) je na obrázku (4). Na obrázku (4) vidíme, že $I_{tot}(t)$ má nulovou derivaci zhruba před čtvrtou milisekundou. Kolem tohoto času se pohybuje hodnota R_{ch} kolem hodnoty $R_{ch} = 0,011\Omega$. Také je z obrázku vidět, že nemůžeme vliv indukčnosti při výpočtu odporu komory zanedbávat v jiných místech než tam, kde je derivace $I_{tot}(t)$ nulová.

Dále jsme vygenerovali samostatné toroidální magnetické pole a zaznamenali časový průběh napětí $U_B(t)$, který můžete pozorovat na obrázku (5).

Poté jsme vytvořili vakuový výboj. Z jeho parametrů lze vypočítat odpor komory R_{ch} a indukčnost L_{ch} pomocí 2D metody nejmenších čtverců. To jsem provedla pomocí rovnice (2) v Gnuplotu. Výsledek je $L_{ch} = (5,6 \pm 0,2)10^{-7}H$ a $R_{ch} = (10,493 \pm 0,004)m\Omega$, což se velice podobá předchozímu odhadu odporu komory.

č.	$t[ms]$	max $I_p[A]$	max $T_e[eV]$	max $P_{OH}[kW]$	max $W[J]$	max $\tau[s]$	$p_0[mPa]$
14336	8,0	1700	27	17	0,43	2,3	16,10
14337	8,0	1750	27	18	0,43	2,4	16,10
14338	8,0	1750	28	18	0,42	2,3	15,60
14344	9,0	1500	24	15	0,23	2,5	10,43
14345	7,5	1450	24	15	0,43	2,0	19,58
14346	7,0	2100	31	22	0,30	2,8	10,16
14350	4,5	1550	29	14	0,23	3,0	8,35
14353	4,5	1750	31	16	0,15	2,8	5,29
14355	8,5	1950	31	20	0,32	2,6	12,50
14360	9,0	2400	31	29	0,19	2,6	6,61

Tabulka 1: Tabulka s číslem výboje, dobou výboje $t[ms]$, max. proudem plazmatem $I_p[A]$, max. elektronovou teplotou $T_e[eV]$, max. ohmickým příkonem $P_{OH}[kW]$, max. energií plazmatu $W[J]$, max. dobou udržení $\tau[s]$ a příslušnými tlaky $p_0[mPa]$.

Následovně jsme vytvořili kompletní zadání pro výboj a snažili se dosáhnout co nejvyšší elektronové teploty $T_e(t)$. Bohužel už se však náš čas na praktiku chýlil ke konci, protože jsme před tím dlouho řešili problémy s osciloskopem. Neměli jsme proto mnoho času ani dat k vyzkoumání nějaké závislosti. Většina našich výbojů proběhla totiž až poté, co jsme odešli z praktika. Z [6] jsem pak doma stáhla data získaná z jednotlivých výstřelů. Vybrala jsem deset výstřelů s nejvyšší elektronovou teplotou. U nich jsem určila několik parametrů pomocí zobrazení dat v Gnuplotu. Tyto parametry jsou: délka výboje určená z průběhu $I_p(t)$, maximální proud plazmatem pomocí vzorce (9), maximální elektronová teplota pomocí (12), maximální ohmický příkon díky (14), maximální energii plazmatu pomocí (18) a maximální dobu udržení za použití (20). Na obrázcích () až () jsou uvedeny grafy k výboji 14360. Všechny tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce (1). Spolu s nimi jsou tam uvedeny i tlaky p_0 používané

ve vzorci (18).

Diskuze

Odhad odporu vyšel pomocí zanedbání indukčnosti komory L_{ch} celkem pěkně. Z obrázku (4) je však vidět, že pro výpočet odporu komory vážně musíme vyučít oblast maxima $I_{tot}(t)$, jinak nelze zanedbat indukčnost komory. Průběhy $U_l(t)$ a $I_{tot}(t)$ se shodují s průběhy původních diagnostik tokamaku, až na to, že proud v původní diagnostice je vyšší. Místo maxima 1100A má maximum asi 1250A. Pravděpodobně je to způsobeno hlavně nepřesnou přepočtovou konstantou napětí na proud $2 \cdot 10^{-6} A/V$, kterou jsme používali.

Průběh napětí $U_B(t)$ se shoduje s průběhem $\frac{dB_t(t)}{dt}$ z diagnostiky. Hodnoty jsou samozřejmě jiné, což není překvapující, protože neznáme přepočtovou konstantu naší cívky.

Doby trvání plazmatu v tokamaku určení z naší a původní diagnostiky jsou velice podobné. Nejsou vždy stejné, protože jsem dobu t odhadovala od oka z průběhu $I_p(t)$.

I u výstřelů s kompletním zadáním je průběh $I_p(t)$ stejný u obou diagnostik až na to, že ten z původní diagnostiky je vyšší, což jen potvrzuje teorii o špatné přepočtové konstantě. Z toho samého důvodu v naší diagnostice vychází větší maximální elektronové teploty T_e , a to zhruba o 5eV. Také to zapříčiňuje zvýšení hodnot $P_{OH}(t)$ a $W_p(t)$. Nevysvětluje to však to, proč je ohmický výkon plazmatu z původní diagnostiky asi dvojnásobný než ten náš. Pravděpodobně na tom mají velký podíl některá zanedbání. Co však přesně má jaký vliv si netroufám odhadovat.

Na obrázku (10), kde je zobrazena doba udržení si lze všimnout okrajových jevů. Doba udržení plazmatu jsem určila jako vrchol píku pohybuující se kolem doby 0,001s.

Závěr

Průběh $U_l(t)$ a $I_{tot}(t)$ výboje s elektrickým toroidálním polem jsou vidět na obrázcích (2) a (3). Odhad odporu komory R_{ch} vyšel $R_{ch} = 11m\Omega$. Z

Průběh napětí na měřící cívce $U_B(t)$ během výboje s toroidálním magnetickým polem naleznete na obrázku (4).

Časový vývoj proudu plazmatem $I_p(t)$ výboje 14360 je na obrázku (6), jeho elektronová teplota na obrázku (7).

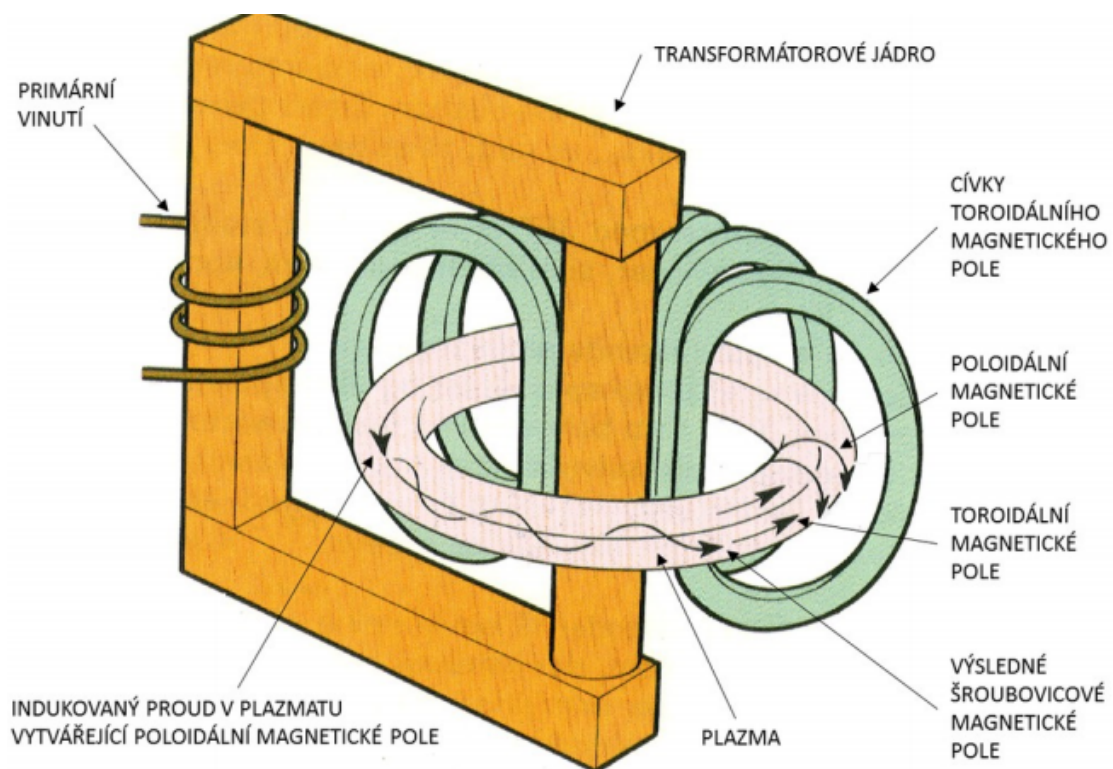
Pomocí 2D fitu v Gnuplotu vyšly parametry komory $L_{ch} = (5,6 \pm 0,2)10^{-7}H$ a $R_{ch} = (10,493 \pm 0,004)m\Omega$.

Tabulka deseti výstřelů je tabulka (1).

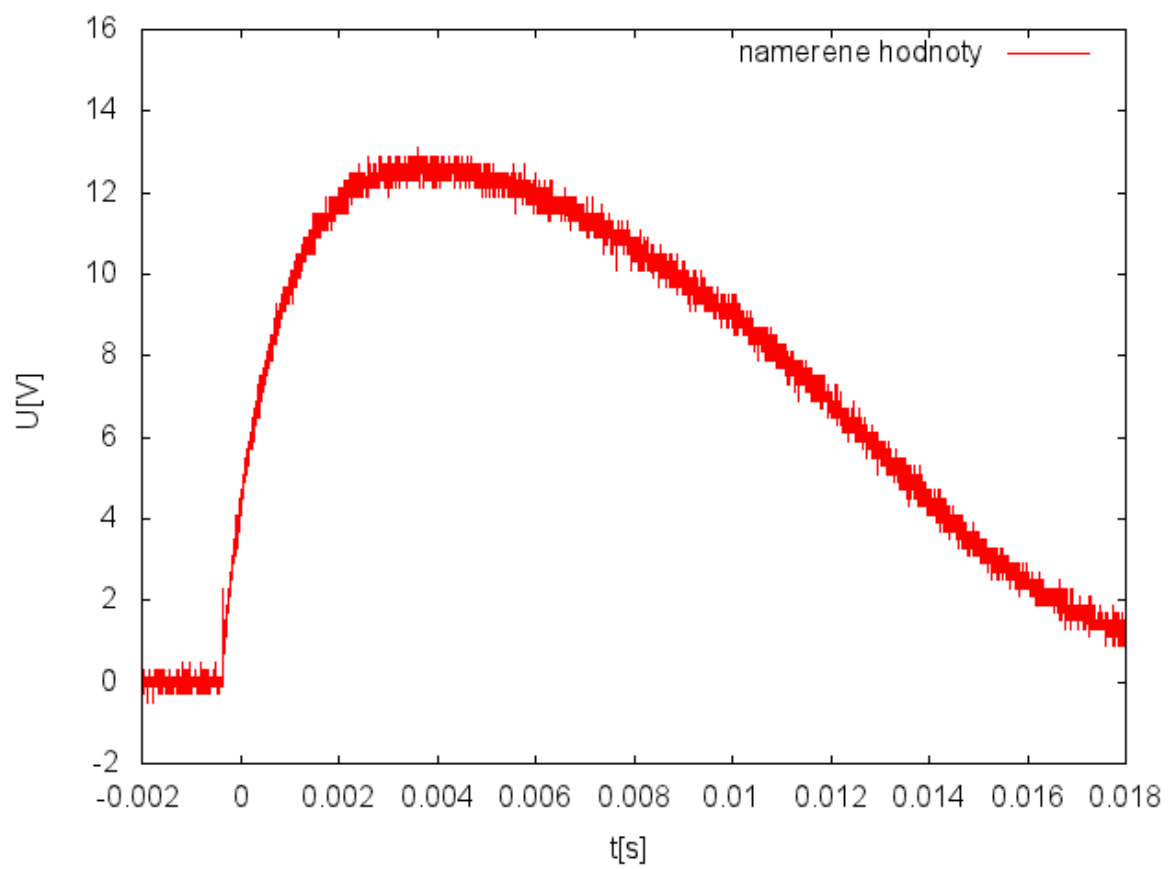
Reference

- [1] Uloha 13A: Vysokoteplotní plazma na tokamaku GOLEM, 4.3.2014, <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/KFpract/index>, kol. autorů z FJFI
- [2] Jak zpracovávat data (h2.pdf), 6.10.2013, <https://www.dropbox.com/sh/zio4ucmrvx5vfbn/SPZECualWi>, P. Chaloupka
- [3] Jak zpracovávat data (h3.pdf), 6.10.2013, <https://www.dropbox.com/sh/zio4ucmrvx5vfbn/SPZECualWi>, P. Chaloupka

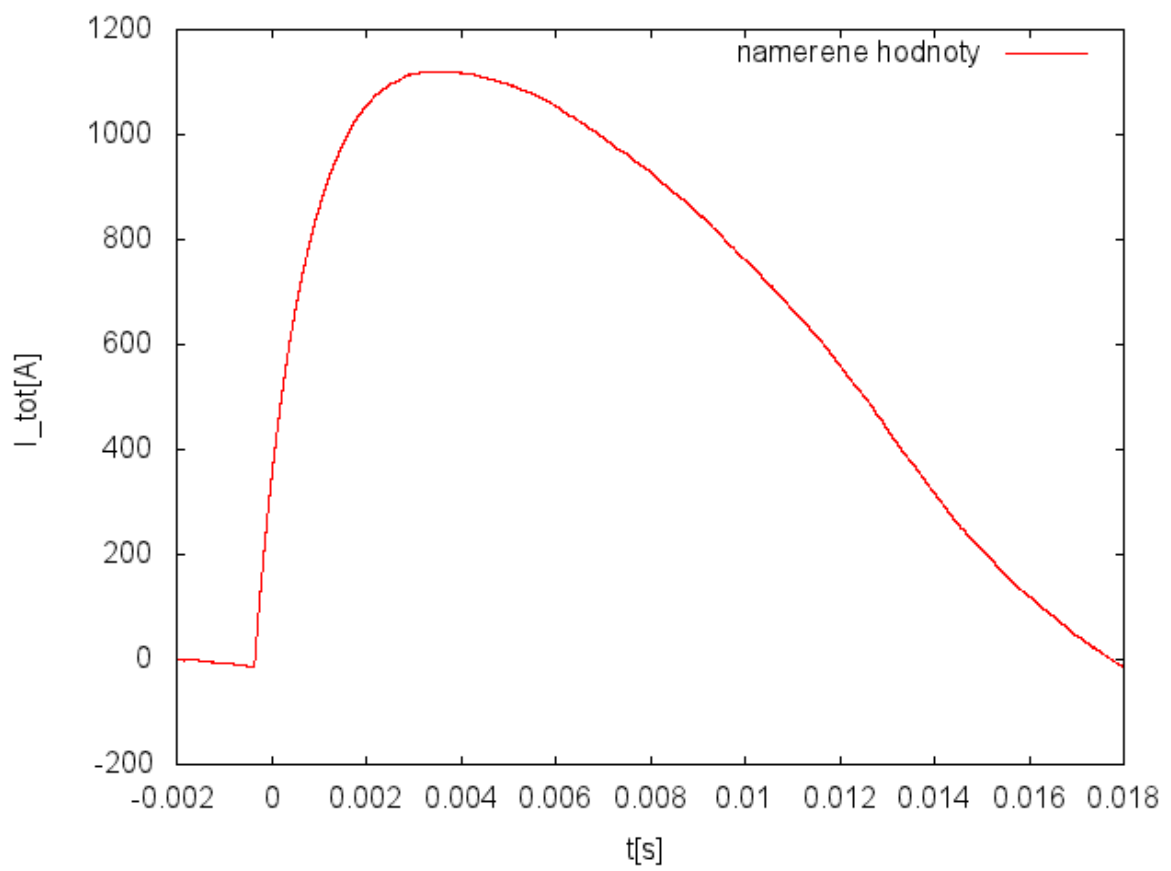
- [4] Návuk manipulace se vzdálenými datovými soubory, 9.3.2014, <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/SW/gnuplot/training/index>, kol. autorů z FJFI
- [5] Torus, 9.3.2014, <http://cs.wikipedia.org/wiki/Torus>, kol. autorů
- [6] Pondělí dopoledne, 8.3.2014, <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/KFpract/index>, kol. autorů z FJFI



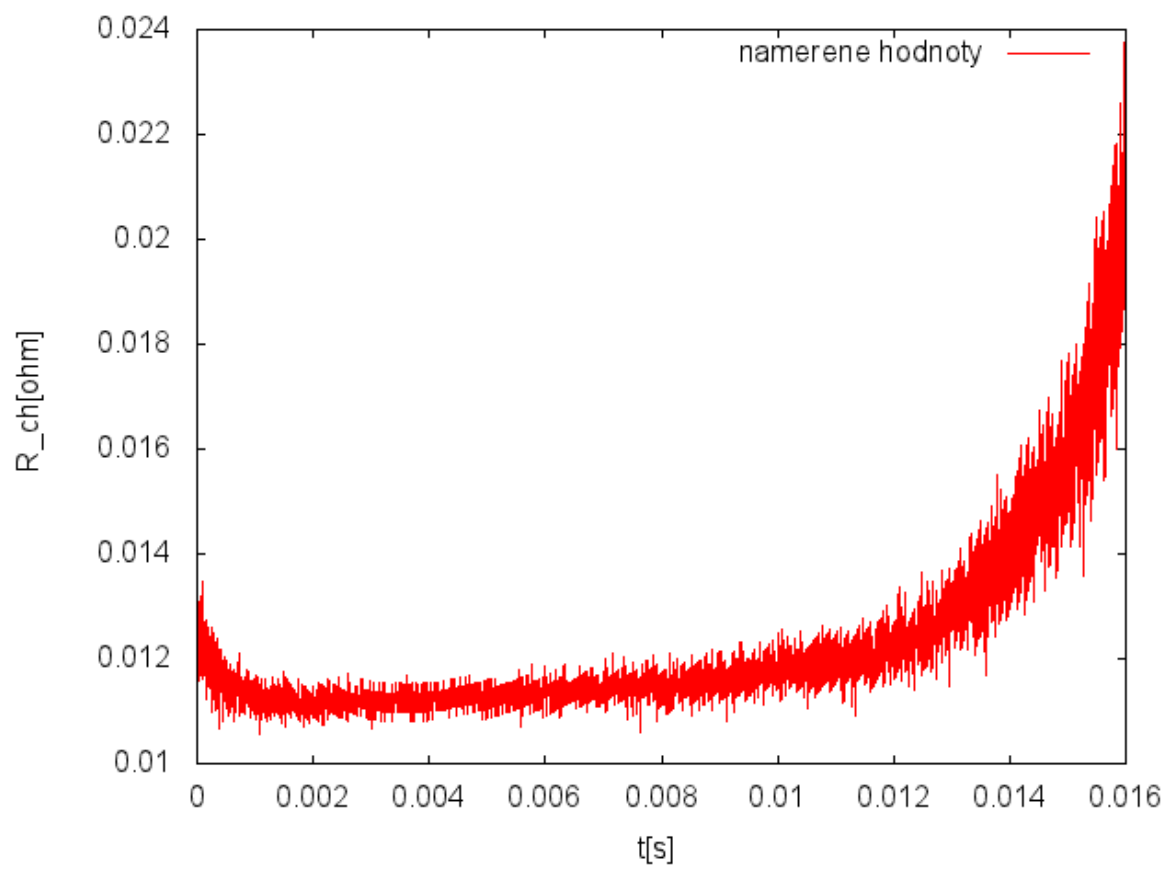
Obrázek 1: Základní schéma tokamaku. Obrázek je převzat z [1].



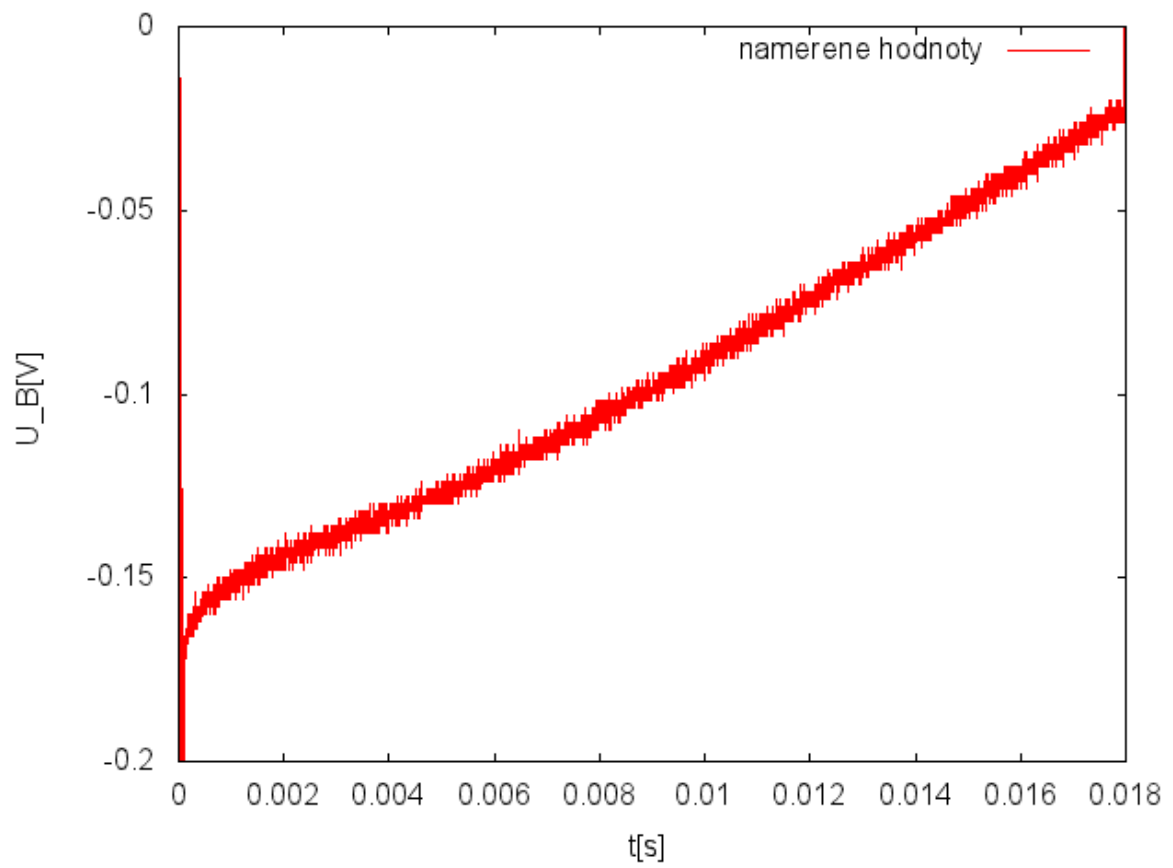
Obrázek 2: Průběh napětí na závit $U_l(t)$. Vygenerováno samostatné toroidální elektrické pole.



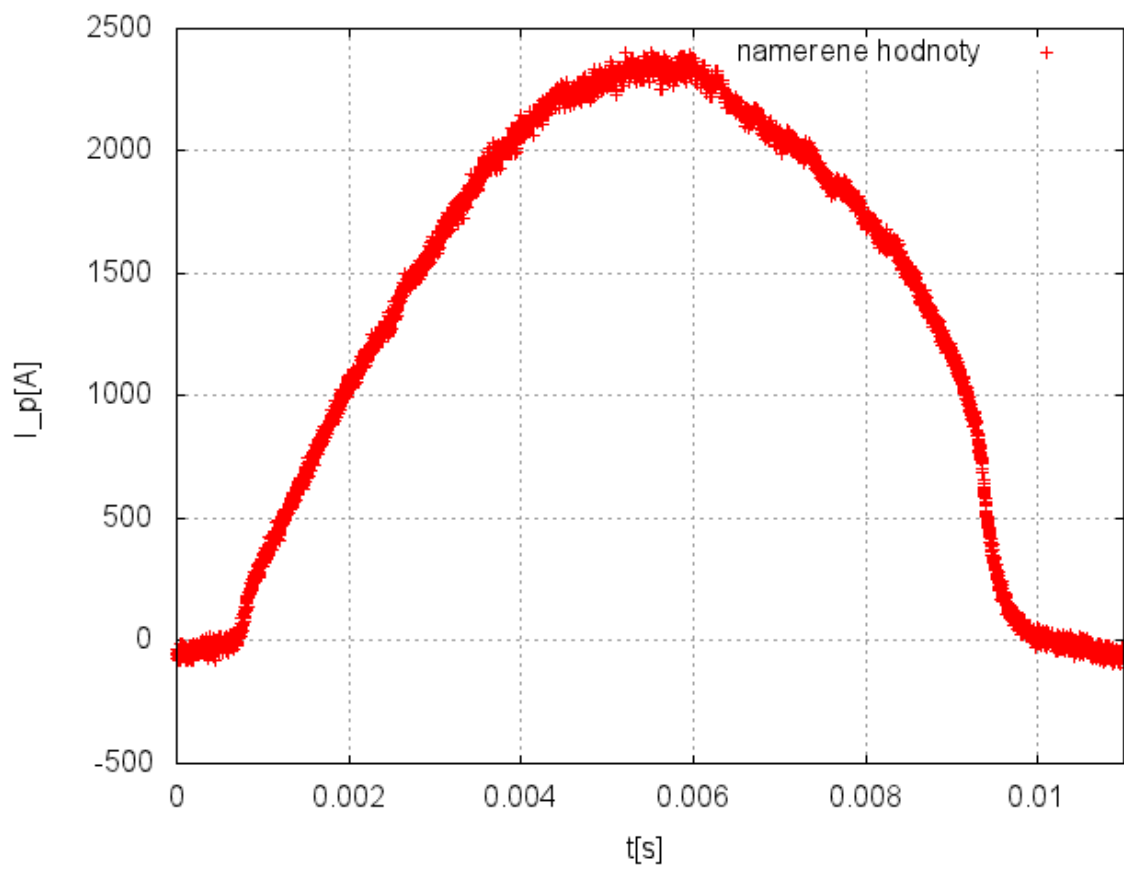
Obrázek 3: Průběh proudu komorou $I_{tot}(t)$. Vygenerováno samostatné toroidální elektrické pole.



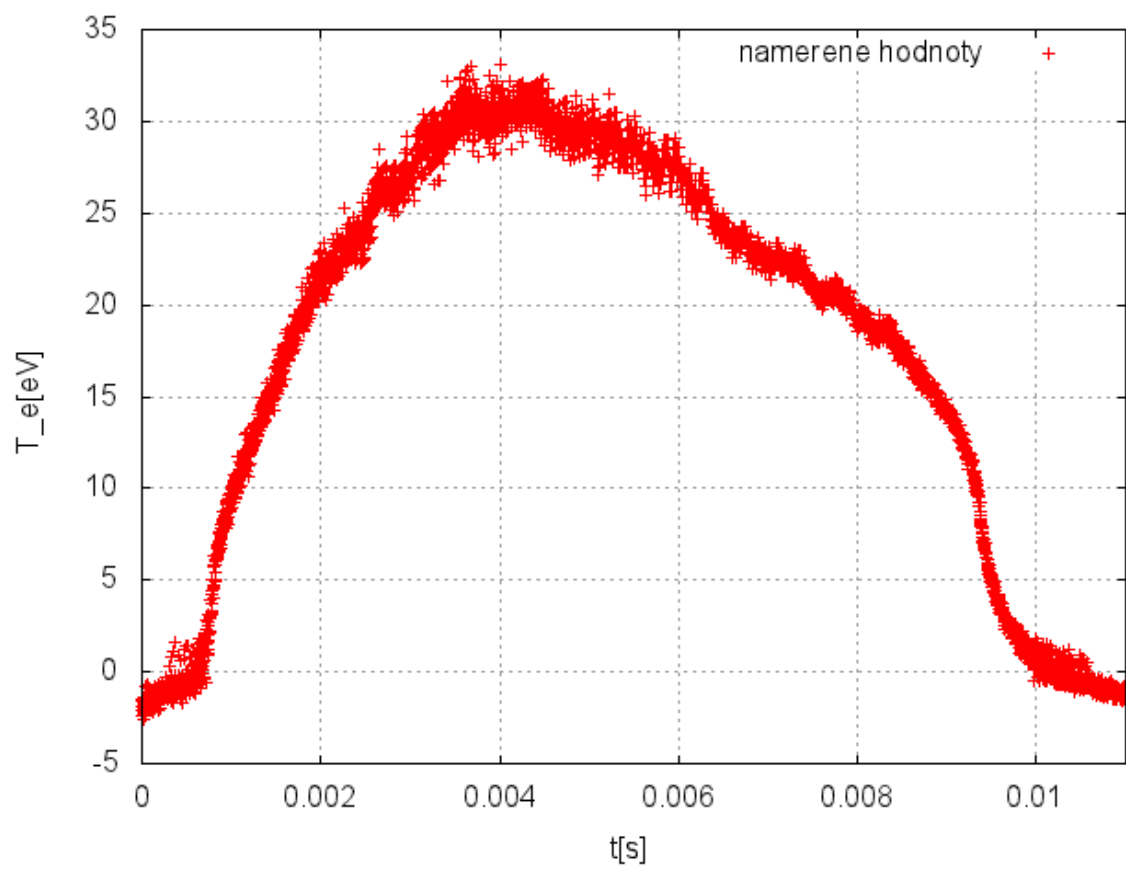
Obrázek 4: Průběh odhadu odporu komory $R_{ch}(t)$. Vygenerováno samostatné elektrické pole.



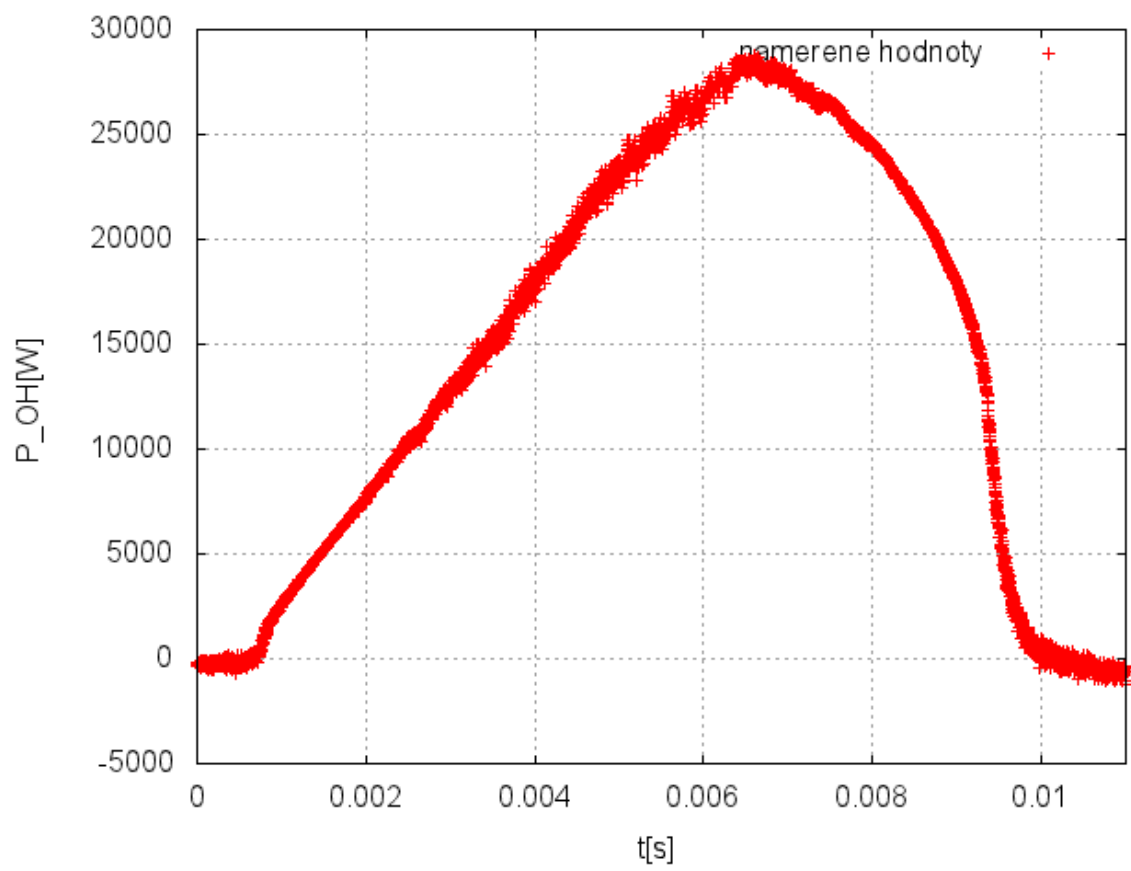
Obrázek 5: Průběh napětí na cívce $U_B(t)$. Vygenerováno samostatné toroidální magnetické pole.



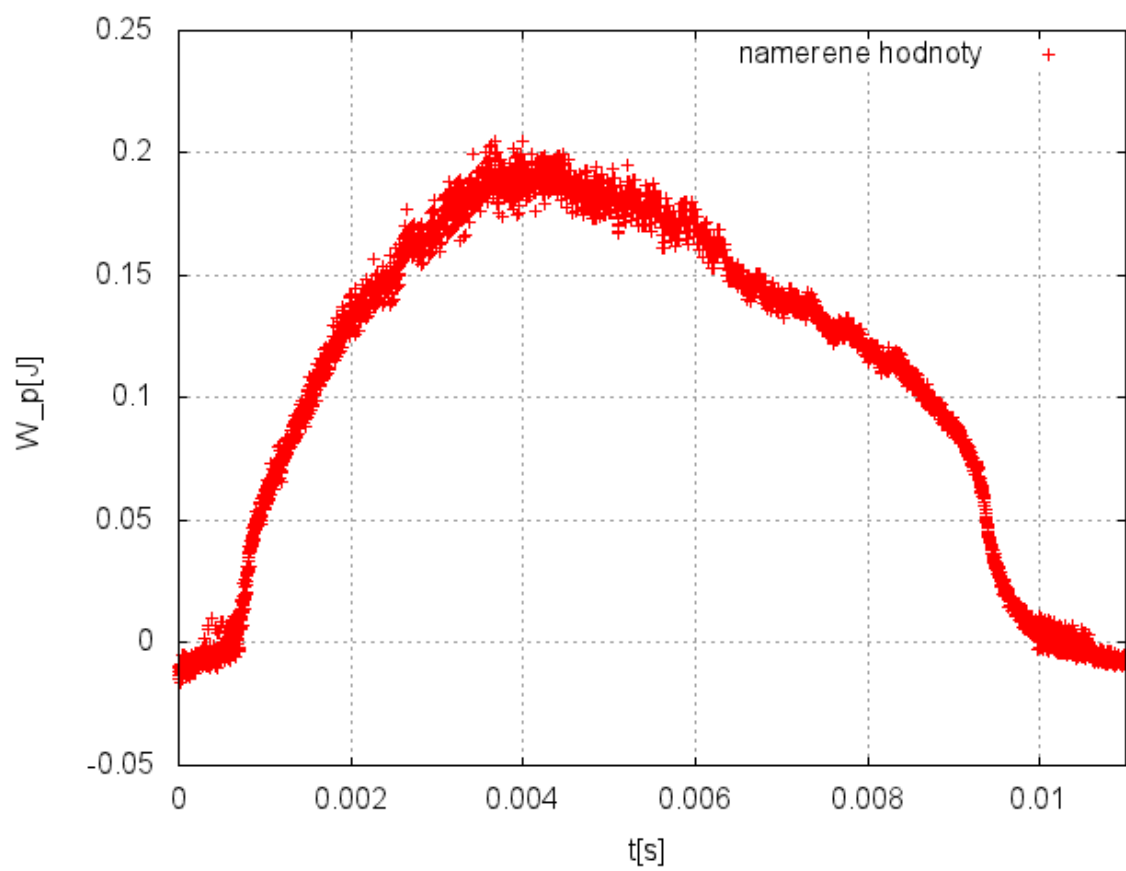
Obrázek 6: Průběh proudu plazmatem $I_p(t)$ pro kompletní výboj 14360 z [6].



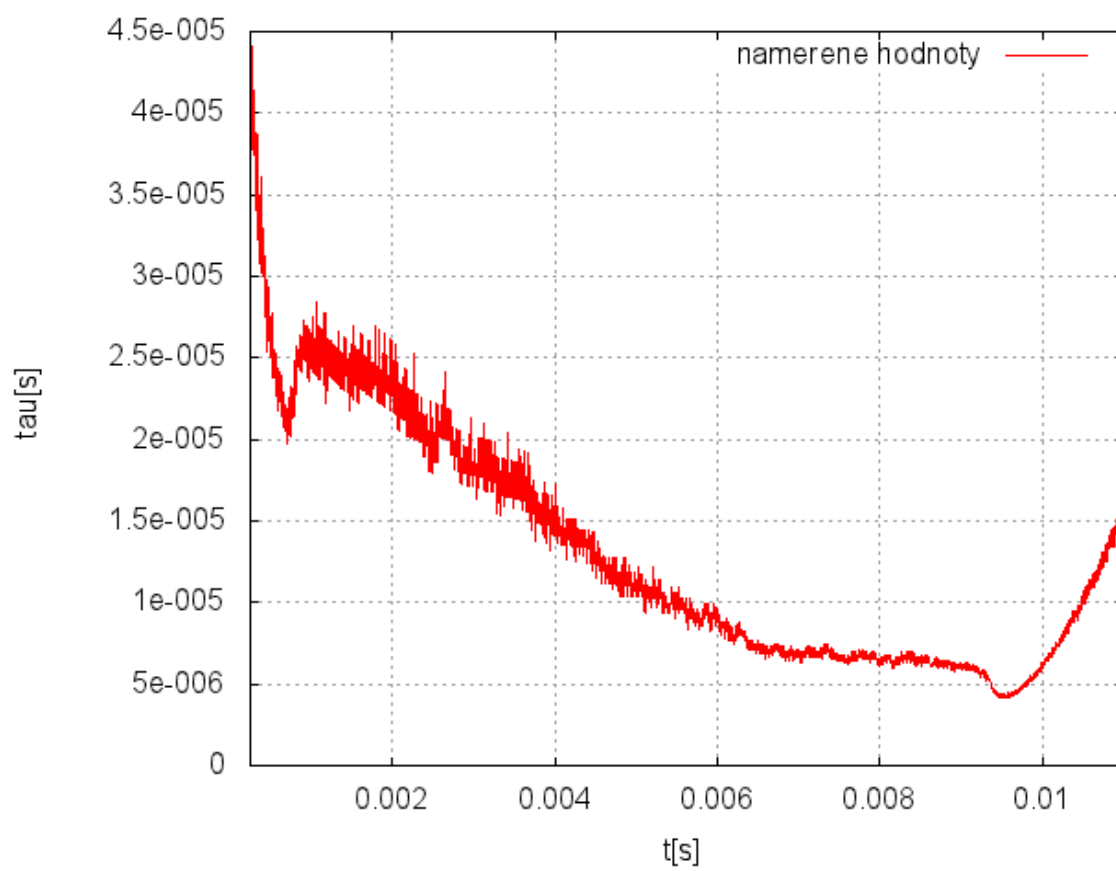
Obrázek 7: Průběh elektronové teploty $T_e(t)$ pro kompletní výboj 14360 z [6].



Obrázek 8: Průběh ohmického příkonu plazmatu $I_{OH}(t)$ pro kompletní výboj 14360 z [6].



Obrázek 9: Průběh tepelné energie plazmatu $W_p(t)$ pro kompletní výboj 14360 z [6].



Obrázek 10: Průběh doby udržení $\tau_E(t)$ pro kompletní výboj 14360 z [6].