

Datum měření: 17.3.2014

Skupina: 7

Jméno: David Roesel

Kroužek: ZS 7

Spolupracovala: Tereza Schönfeldová Klasifikace:

## 1 Pracovní úkoly

1. Nalezněte optimální parametry pro nastavení rozmítacího zdroje, aby se proměřovala především iontově nasycená část V-A charakteristiky. Zdůvodněte vámi zvolené parametry.
2. Vykonejte sérii výbojů s různým nastavením parametrů plazmatu. Do protokolu vyneste časovou závislost  $U_{fl}$ ,  $\overline{T_e}$ ,  $U$  a  $I$  pro tři z nich (t.j. 1 graf s 3 křivkami pro  $U_{fl}$ , 1 takový graf také pro  $\overline{T_e}$ , atd.)
3. V každém ze tří výbojů předešlého úkolu si vyhlédněte oblast s relativně stálým  $U_{fl}$  a  $\overline{T_e}$ . Pro každý výstřel vyneste do grafu V-A charakteristiku přes tyto intervaly. Naftujte horní část V-A charakteristiky dle vztahu (7) a určete lokální  $T_e$ . Srovnejte s  $\overline{T_e}$ .
4. Zvolte si pevně sadu parametrů výboje a vykonejte další sérii alespoň tří stejných výstřelů. Po každém výstřelu prohodte rozmítací obvod na sondu na jiné pozici (tj. jiném  $r$ ). Zvolte si pevně časový interval a určete lokální  $T_e$  v tomto čase metodou z úkolu 3 pro každý z těchto výbojů.
5. Vztahem (2) určete z teplot z předešlého úkolu hloubku sondy v plazmatu. Do protokolu vyneste závislost hloubky určené z teploty na poloze sondy a proložte tuto závislost vztahem  $y = Ax + B$ . Diskutujte parametry  $A$  a  $B$ .

## 2 Vypracování

### 2.1 Použité přístroje

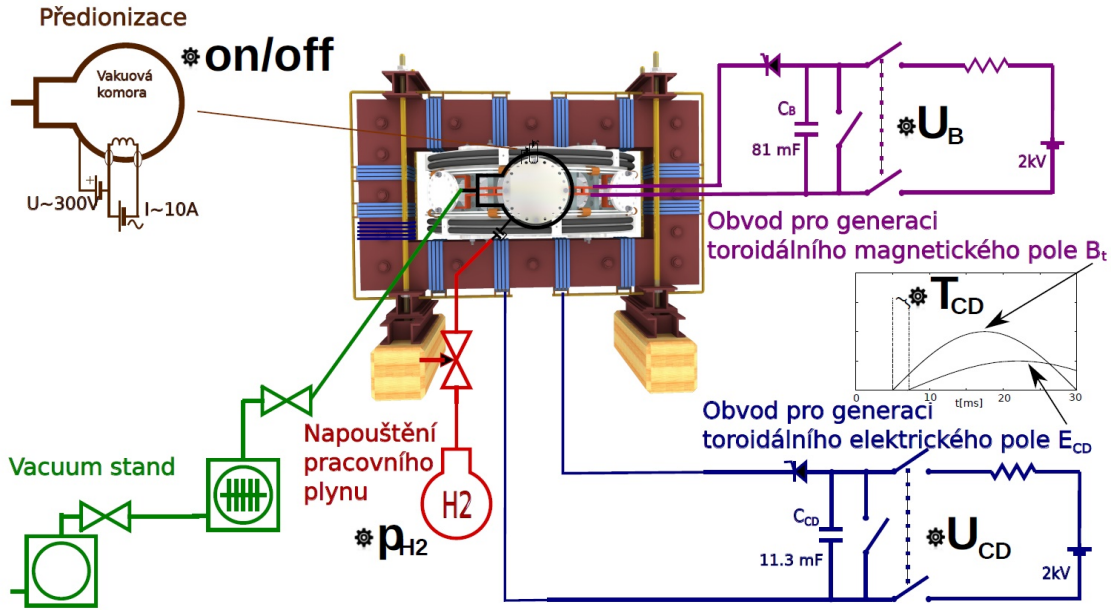
Tokamak GOLEM s diagnostikou a datovými sběry, frekvenční generátor, napěťový zesilovač, dělič napětí 1:100, stejnosměrný zdroj 50 V, osciloskop, proměnný odpor, regulační transformátor, **prsteneč** 16 Langmuirových sond na vertikálním manipulátoru, programy *GNUplot*, *Enthought Canopy* a *Python*.

### 2.2 Teoretický úvod

#### 2.2.1 Plazma

Plazma je kvazineutrální (jeho makroskopický náboj je nulový a reaguje jako celek na přítomnost elektromagnetických polí) plyn složený převážně z elektronů a iontů. Vlastnosti plazmatu se, hlavně z důvodu odlišných interakcí, liší od klasického plynu. Jednotlivé části plazmatu spolu v tokamaku interagují prostřednictvím magnetických a elektrických polí o dalekém dosahu (až metry).

Vysokoteplotní plazma se typicky generuje v zařízení zvaném *tokamak*, jehož zapojení je znázorněno na Obr. 1. Jedná se o transformátor, který má za svůj jediný sekundární závit právě vysokoteplotní a dobře vodivé plazma. To je uzavřeno ve vakuové nádobě toroidálního tvaru, na kterém je navinuta cívka vytvářející toroidální magnetické pole.



Obr. 1: Schéma tokamaku GOLEM s naznačeným průběhem vybití kondenzátorových baterií a zobrazením nastavitelných parametrů experimentu. Převzato z [1].

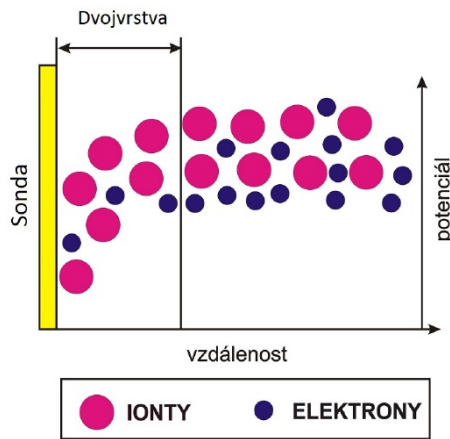
### 2.2.2 Určení $\overline{T_e}$ plazmatu



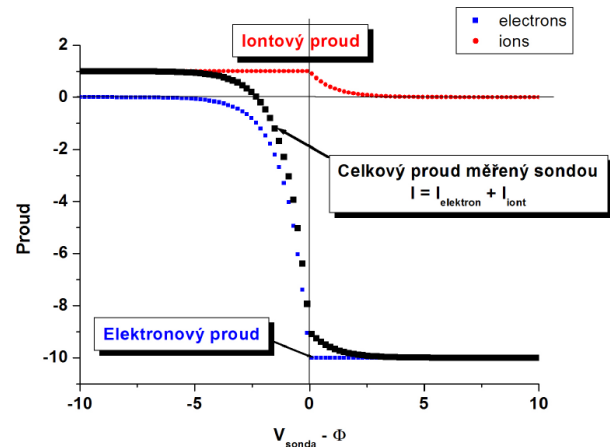
Průměrnou elektronovou teplotu plazmatu  $\overline{T_e}$  můžeme vypočítat pomocí vztahu

$$\overline{T_e} [\text{eV}] = 0,214 \left( \frac{Z_{eff} I_p}{U_{loop}} \right)^{2/3}, \quad (1)$$

kde  $Z_{eff} \approx 2,5$  je efektivní náboj vodíkového plazmatu,  $U_{loop}$  napětí na závit a  $I_p$  proud plazmatem.



Obr. 2: Elektrická dvoivrstva v okolí plovoucí sondy. Převzato z [1].



Obr. 3: Volt-ampérová charakteristika Langmuirovy sondy v plazmatu. Převzato z [1].

### 2.2.3 Sondová měření lokální teploty

Pokud není plazma příliš horké, lze do něj na nějaký čas zasunout takzvanou *Langmuirovu sondu* a měřit pomocí ní lokální  $T_e$ . Jedná se principem o vodič vnořený do plazmatu, na který dopadají ionty a elektrony. Vzhledem k

tomu, že tepelná rychlost je pro elektrony o dva řády vyšší než pro ionty, dopadne jich na nenabitou sondu za určitý čas víc a dojde tak v důsledku k vytvoření takzvané *plazmové dvojvrstvy*, která je znázorněna na Obr. 2. Díky ní bude v plazmatu vůči zemi (v našem případě komoře) na *plovoucím potenciálu*  $U_{fl}$ , pro který platí  $0 < U_{fl} < \phi$ , kde  $\phi$  je nenulový potenciál plazmatu.

#### 2.2.4 Určení lokální $T_e$ plazmatu

Určení lokální teploty provádíme pomocí tzv. *rake probe*, na které je umístěných 16 Langmuirových sond se vzájemnými vzdálenostmi 2,5 mm. Sonda samotná **se od středu komory nachází 72 mm**.

Pro vztah mezi  $T_e$  a  $\bar{T}_e$  platí

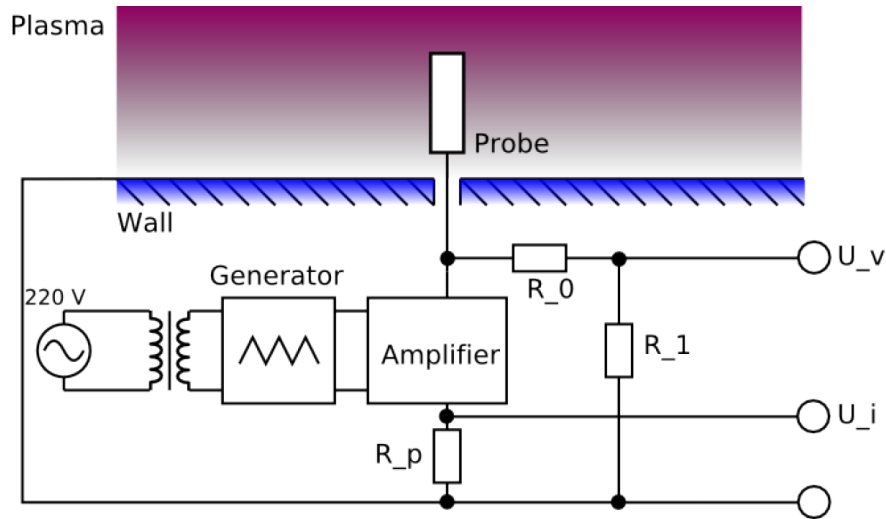
$$T_e(r) = 2\bar{T}_e \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) \quad \rightarrow \quad r = \sqrt{1 - \frac{T_e(r)}{2\bar{T}_e}}, \quad (2)$$

kde  $r$  je poloha sondy v plazmatu a  $a = 0,085$  m poloměr plazmatu (limiterový). Závislost hloubky určené z teploty na poloze sondy prokládáme lineárním fitem ve tvaru

$$y = A \cdot x + B, \quad (3)$$

kde  $A$  udává poměr a  $B$  posunutí polohy zjištěné z teploty vůči hloubce sondy. Hodnota  $A$  se dá očekávat  $A \approx 1$ ,

**$B$  by se ideálně mělo pohybovat kolem 0,**



Obr. 4: Schéma zapojení obvodu pro rozmitání Langmuirovy sondy k měření její V-A charakteristiky. Převzato z [1].

Volt-ampérová charakteristika sondy v plazmatu (viz Obr. 3) je funkcí  $T_e$ . Při automatizované a periodicky prováděné změně  $U$  s vysokou frekvencí pomocí frekvenčního generátoru se zpravidla proměřují hodnoty  $I$ . Schéma zapojení je vidět na Obr. 4. Napětí na sondě  $U$  se měří přes dělič napětí a platí

$$U = 100 \cdot U_V, \quad (4)$$

kde  $U_V$  je měřené napětí. Proud ze sondy je měřen přes úbytek napětí  $U_I$  na rezistoru o odporu  $R_p = 22 \Omega$  a platí

$$I = U_I / R_p. \quad (5)$$

Z těchto hodnot můžeme sestavit volt-ampérovou charakteristiku, která se pro  $U < \phi$  dá popsat vztahem:

$$I = I_{i0} \left(1 - \exp\left(e \frac{U - U_{fl}}{kT_e}\right)\right), \quad (6)$$

kde  $U_{fl}$  je výše zmíněný *plovoucí potenciál*,  $k$  náboj elektronu a  $I_{i0}$  už iontový nasycený proud. Tento vztah budeme při zpracovávání dat používat ve tvaru

$$y = A \left( 1 - \exp \left( \frac{x - B}{C} \right) \right), \quad (7)$$

kde  $y = I$  [A],  $x = U$  [V],  $A = I_{i0}$  [A],  $B = U_{fl}$  [V] a hledaná  $C = T_e$  [eV]. Jako počáteční odhad  $T_e$  pro fit používáme  $\overline{T_e}$  a  $U_{fl}$  s  $I_{i0}$  určíme z naměřených dat.

## 2.3 Postup měření

Nejprve jsme udělali na tokamaku jeden pokusný výstřel, abychom ověřili, že všechno **funguje jak** má. Následně jsme provedli další tři výstřely, při kterých jsme různě nastavovali parametry ve webovém rozhraní tokamaku a **měnili hodnoty parametrů na frekvenčním generátoru**. Z pokusných výstřelů naší a spolupracující skupiny jsme vybrali jeden nejlépe vypadající (#14681) a čtyřikrát jsme ho zopakovali za prohazování zapojení sond, které měří v tokamaku  $T_e$ . Námi analyzované výstřely i s parametry jsou vyneseny v Tab. 1.

# výstřelu	$C_{B_t}$ [V]	$C_{CD}$ [V]	$\tau_{CD}$ [ms]	$p_{H_2}$ [mPa]
14681	900	700	14	13,49
14683	900	700	16	11,89
14685	700	700	16	11,57
14709	900	700	14	12,59
14710	900	700	14	13,65
14711	900	700	14	<b>13,7</b>
14712	900	700	14	13,55

Tab. 1: Parametry námi analyzovaných výstřelů na tokamaku GOLEM;  $C_{B_t}$  je nabití kondenzátoru pro toroidální magnetické pole,  $C_{CD}$  nabití kondenzátoru pro toroidální elektrické pole,  $\tau_{CD}$  zpoždění elektrického vůči magnetickému poli a  $p_{H_2}$  tlak pracovního plynu (vodíku).

## 2.4 Naměřené hodnoty

Z webového rozhraní tokamaku jsme získali pět datových souborů pro každý výstřel:

- `loop_voltage_XXXXX.txt` - obsahující naměřená data pro  $U_{loop}$
- `plasma_current_XXXXX.txt` - obsahující naměřená data pro  $I_p$
- `rake_probe_1_XXXXX.txt` - obsahující naměřená data pro  $U_i$ , ze kterých získáme podle (5) proud  $I$
- `rake_probe_2_XXXXX.txt` - obsahující naměřená data pro  $U_{fl}$  - je třeba přepočítat podle (4)
- `rake_probe_3_XXXXX.txt` - obsahující naměřená data pro  $U_v$  - je třeba přepočítat podle (4)

Naměřené hodnoty z prvních tří výstřelů pro  $U_{fl}$ ,  $U$  a  $I$  jsou vyneseny do grafů na Obr. 5, 7 a 8. Závislost průměrné elektronové teploty plazmatu  $\overline{T_e}$  každého z nich spočítaná podle (1) je vynesena do grafu na Obr. 6.

Za pomoci takto vynesených závislostí jsme se pokusili určit pro každý výstřel časový interval, na kterém by hodnoty  $U_{fl}$  i  $\overline{T_e}$  byly co nejkonstantnější a z hodnot  $U_v$  a  $I$  jsme na takovém časovém intervalu pro každý výstřel sestavili V-A charakteristiku. První třetinu (interval napětí  $U$  -100 až -30 V) jejích hodnot na tomto intervalu jsme poté proložili podle (7) a z parametru proložení  $C$  jsme určili lokální teplotu plazmatu  $T_e$ . Pro porovnání jsme

na tomto intervalu udělali aritmetický průměr ze spočítaných hodnot  $\overline{T_e}$  a získali jsme tak odpovídající údaj i se směrodatnou odchylkou (6.2). Volt-ampérové charakteristiky ve zvolených časových úsecích pro všechny výstřely jsou vyneseny v grafech na Obr. 9, 10, 11, 12, 13, 14 a 15. Hodnoty teplot pro jednotlivé výstřely jsou vyneseny v Tab. 2.



# výstřelu	$T_e$ [eV]	$\overline{T_e}$ [eV]	$\Delta t$ [ms]
14681	$(21,9 \pm 0,5)$	$(10,7 \pm 0,1)$	0,02250 - 0,02300
14683	$(20,6 \pm 0,5)$	$(10,8 \pm 0,1)$	0,02475 - 0,02525
14685	$(19,0 \pm 0,6)$	$(11,5 \pm 0,1)$	0,02445 - 0,02495
14709	$(19,3 \pm 0,8)$	$(10,7 \pm 0,1)$	0,02250 - 0,02300
14710	$(20,1 \pm 1,1)$	$(10,8 \pm 0,1)$	0,02250 - 0,02300
14711	$(17,8 \pm 0,5)$	$(10,8 \pm 0,1)$	0,02250 - 0,02300
14712	$(19,1 \pm 0,4)$	$(10,8 \pm 0,1)$	0,02250 - 0,02300

Tab. 2: Tabulka naměřených a spočítaných hodnot lokální teploty plazmatu  $T_e$  a průměrné elektronové teploty plazmatu  $\overline{T_e}$  na časových intervalech  $\Delta t$ .

Při posledních čtyřech výstřelech, kterým jsme nechali stejné parametry ve webovém rozhraní, jsme prohazovali rozmítací obvod na sondu na jiné pozici. Za pomoci  $T_e$  z fitu V-A charakteristiky a průměrné  $\overline{T_e}$  z Tab. 2 jsme pak podle (2) spočítali hloubku sondy v plazmatu  $r$  i s chybou (6.4) pro každý ze čtyř výstřelů. Takto spočítané hodnoty jsme vynesli do grafu na Obr. 16 a proložili podle (3) s výslednými parametry  $A = (1,3 \pm 0,4)$  a  $B = (-1 \pm 3)$  cm.



## 2.5 Diskuse

### 2.5.1 Hledání optimálních parametrů

V první části úlohy jsme se snažili najít optimální parametry pro nastavení rozmítacího zdroje, aby se proměřovala především iontově nasycená část volt-ampérové charakteristiky. Na frekvenčním generátoru jsme nastavili režim pily, frekvenci na  $\approx 4,1$  kHz, amplitudu na  $\approx 64$  V a DC offset na  $\approx -31$  V. Frekvenci bylo třeba nastavit dostatečně vysokou na to, aby za dobu přítomnosti plazmatu stihlo proběhnout alespoň pár V-A charakteristik (půlperiod kmitů). Amplitudu bylo zase třeba nastavit dostatečně vysoko na to, aby se V-A charakteristika dostatečně proměřila. Vzhledem k tomu, že napěťový zesilovač nemá dostatečný výkon pro zvládnutí proudu ze sondy při  $U > U_{fl}$ , bylo třeba volit záporný DC offset, abychom během rozmítání nepřekračovali plovoucí potenciál.

### 2.5.2 Optimalizace parametrů plazmatu

Z našich tří úvodních výstřelů se nám nejvíce líbil hned ten první (#14681), jelikož měl nejkonstantnější úseky ze všech tří. Při tak nízkém počtu zkušebních pokusů ovšem nejde ani zdaleka mluvit o ideálních parametrech a bylo by záhodno udělat výstřelů více. Taktéž by se hodilo mít před vlastním měřením připravené skripty na zpracování dat a moci tak značně urychlit rozpoznávání dobrých a špatných výsledků (např. rychlým výpočtem teploty).

### 2.5.3 Voltampérové charakteristiky

Dokonale konstantní nebyly  $U_{fl}$  ani vypočítaná  $\overline{T_e}$  nikdy, i tak se nám však podařilo najít relativně rozumné úseky u každého výstřelu. U průměrné elektronové teploty  $\overline{T_e}$  pak vyvstává otázka, jakou chybu u ní brát za správnou. Velikost odchylek hodnot od průměru dosahovala až hodnoty 0,5 eV, jelikož byl úsek ve většině případů konstantně stoupající, ale standardní chyba aritmetického průměru z dat vycházela kolem 0,01 eV. Jako kompromis jsme se rozhodli uvádět směrodatnou odchylku (6.2), která podle nás věrohodněji odráží reálnou chybu našich hodnot vzhledem k předpokládanému normálnímu rozdělení.

Nutno podotknout, že se výběrem části dat ve V-A charakteristice dají velmi ovlivnit parametry fitu. Pro fit jsme používali jen první zhruba třetinu hodnot, což je kompromis mezi prokládáním jejich nedostatečného množství a naopak využíváním i méně důvěryhodných hodnot blíže k pravému konci charakteristiky. Reálná chyba lokální teploty  $T_e$  bude tedy pravděpodobně větší, než je její fitem určený chybový interval. To, že je  $\overline{T_e}$  skoro dvakrát menší než  $T_e$  ve většině případech přisuzujeme tomu, že  $T_e$  je na rozdíl od  $\overline{T_e}$  měřena na jednom konkrétním úseku, takže její hodnota může být odlišná (v našem případě vyšší např. díky poloze úseku blíže středu).

#### 2.5.4 Závislost hloubky určené z teploty na poloze sondy

Námi určené parametry  $A = (1,3 \pm 0,4)$  a  $B = (-1 \pm 3)$  cm odpovídají (při uvažování chybových intervalů) našim prvotním odhadům. Parametr  $A$  určuje, že vypočítaná hloubka sondy odpovídá její reálné poloze, a  $B$  může kompenzovat absolutní rozdíl (posunutí) měřené a skutečné vzdálenosti. Oba koeficienty však vyšly se značnou chybou a těžko se z nich tedy usuzuje, jestli naše odhady odpovídají realitě - každopádně je však naše měření nevyloučilo. Výsledky by šlo zpřesnit větším množstvím měření a průměrováním hodnot pro každou z permutací sond.

### 3 Závěr

Všechna zadaná měření se nám povedla úspěšně provést. Nalezli jsme parametry blízké optimálním pro nastavení rozmítaného zdroje a volbu jsme zdůvodnili.

Vykonali jsme sérii výbojů s různým nastavením parametrů plazmatu a do grafu jsme vynesli časové závislosti  $U_{fl}$ ,  $\overline{T_e}$ ,  $U$  a  $I$  pro tři z nich. V každém z těchto výbojů jsme si vyhlédli oblast s relativně stálým  $U_{fl}$  a  $\overline{T_e}$  a přes tyto intervaly jsme pak do grafu vynesly pro každý výstřel V-A charakteristiku. Její horní část jsme nafitovali pomocí vztahu (7) a určili lokální  $T_e$ , kterou jsme následně srovnali s  $\overline{T_e}$ .

Následně jsme si pevně zvolili sadu parametrů výboje a vykonali jsme další sérii čtyř stejných výstřelů. Po každém výstřelu jsme prohodili rozmítací obvod na sondu na jiné pozici. Pro první tři výstřely jsme si zvolili různé intervaly, pro zbytek výstřelů pak pevně jeden časový interval a určili jsme v nich lokální  $T_e$  stejně jako v předchozím úkolu.

Na závěr jsme vztahem (2) určili z předešlého úkolu hloubku sondy v plazmatu. Do grafu jsme vynesli závislost hloubky určené z teploty na poloze sondy a proložili ji vztahem (3), ve kterém jsme diskutovali parametry  $A$  a  $B$ .

## 4 Použitá literatura

- [1] Kolektiv KF, *Návod k úloze: Měření teploty plazmatu v tokamaku GOLEM* [Online], [cit. 23. března 2014]  
<http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/KFpract/14/Probes/uloha13B.pdf>
- [2] Kolektiv KF, *Chyby měření* [Online], [cit. 23. března 2014]  
<http://praktikum.fjfi.cvut.cz/documents/chybynav/chyby-o.pdf>
- [3] GOLEM Team, *Tokamak GOLEM - Shot Database - 14681* [Online], [cit. 23. března 2014]  
<http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/14681/>
- [4] GOLEM Team, *Tokamak GOLEM - Shot Database - 14683* [Online], [cit. 23. března 2014]  
<http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/14683/>
- [5] GOLEM Team, *Tokamak GOLEM - Shot Database - 14685* [Online], [cit. 23. března 2014]  
<http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/14685/>
- [6] GOLEM Team, *Tokamak GOLEM - Shot Database - 14709* [Online], [cit. 23. března 2014]  
<http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/14709/>

- [7] GOLEM Team, *Tokamak GOLEM - Shot Database - 14710* [Online], [cit. 23. března 2014]  
<http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/14710/>
- [8] GOLEM Team, *Tokamak GOLEM - Shot Database - 14711* [Online], [cit. 23. března 2014]  
<http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/14711/>
- [9] GOLEM Team, *Tokamak GOLEM - Shot Database - 14712* [Online], [cit. 23. března 2014]  
<http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/14712/>

## Část I

# Přílohy

## 5 Domácí příprava

Domácí příprava je přiložena k protokolu.

## 6 Statistické zpracování dat

Pro statistické zpracování využíváme aritmetického průměru:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (6.1)$$

jehož směrodatnou odchylku spočítáme jako

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6.2)$$

kde  $x_i$  jsou jednotlivé naměřené hodnoty,  $n$  je počet měření,  $\bar{x}$  aritmetický průměr a  $\sigma_0$  jeho chyba [2].

Při nepřímém měření počítáme hodnotu s chybou dle následujících vztahů:

$$u = f(x, y, z, \dots), \quad (6.3)$$

$$x = (\bar{x} \pm \sigma_x), \quad y = (\bar{y} \pm \sigma_y), \quad z = (\bar{z} \pm \sigma_z), \quad \dots,$$

kde  $u$  je veličina, kterou určujeme nepřímo z měřených veličin  $x, y, z, \dots$

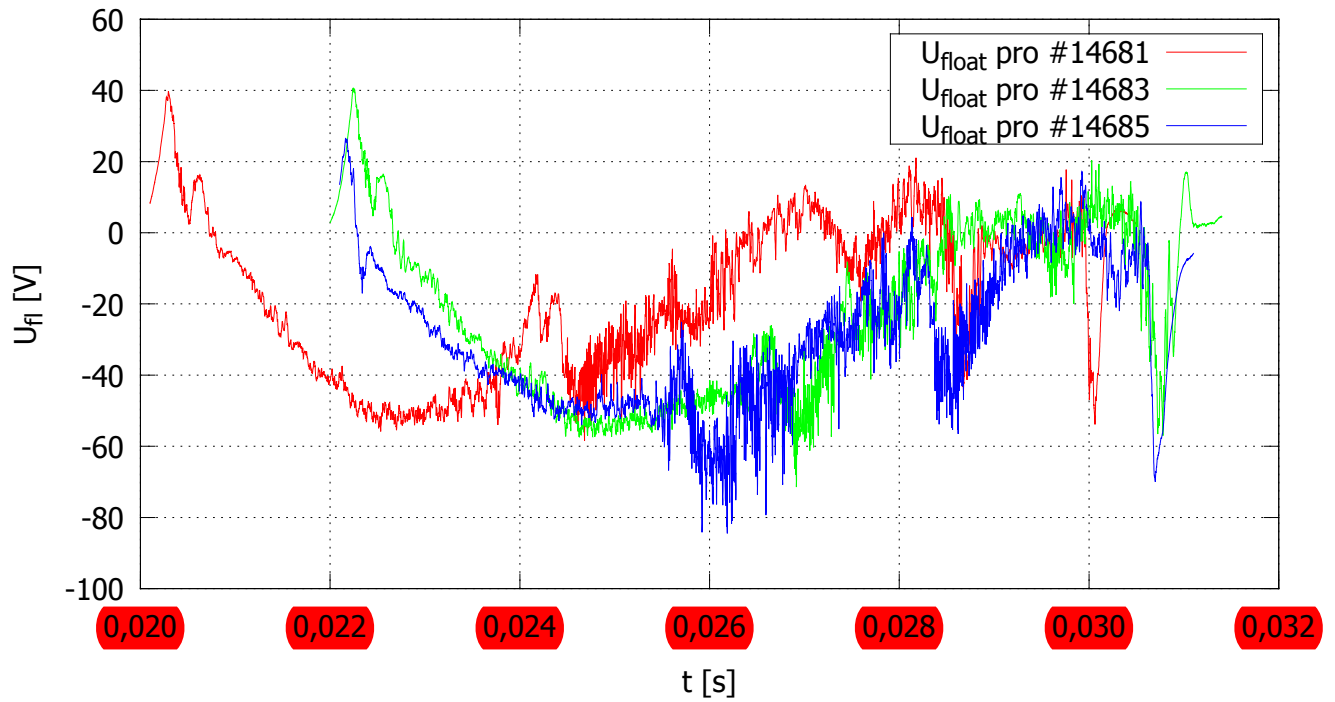
Pak

$$\bar{u} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots),$$

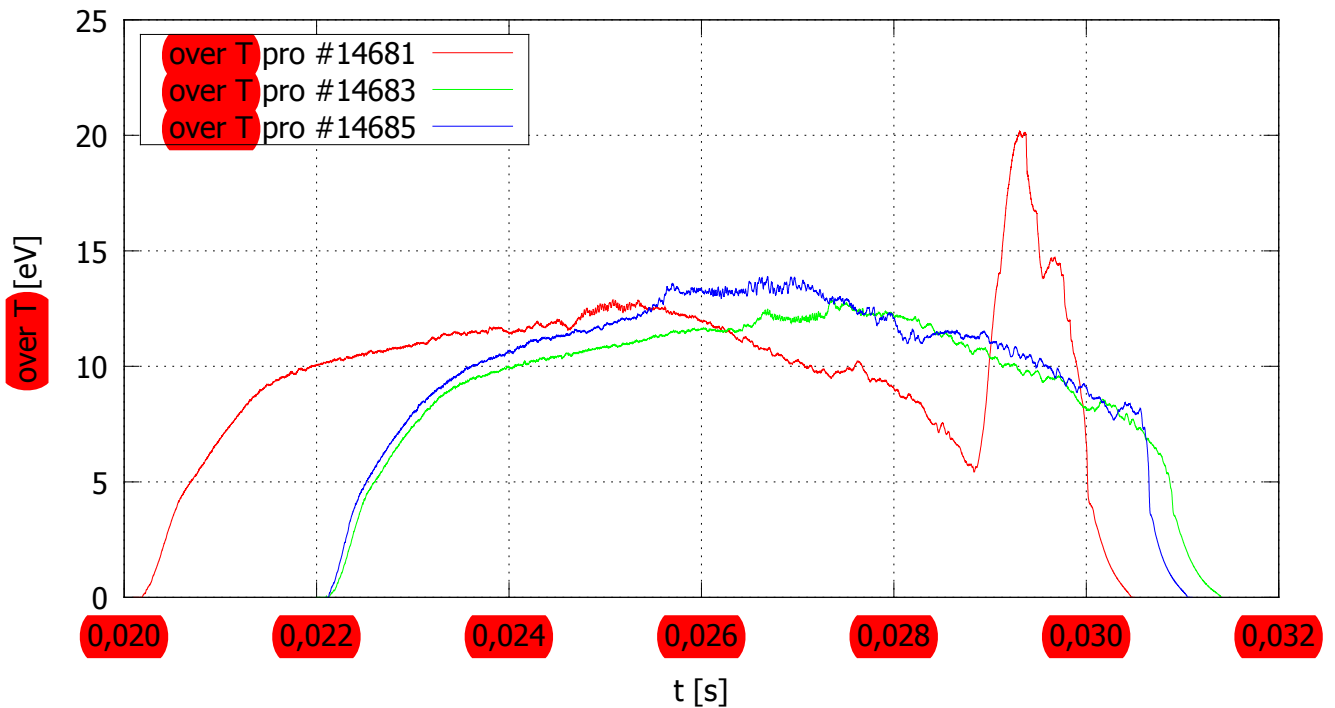
$$\sigma_u = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots}, \quad (6.4)$$

$$u = (\bar{u} \pm \sigma_u).$$

## 6.1 Tabulky a grafy

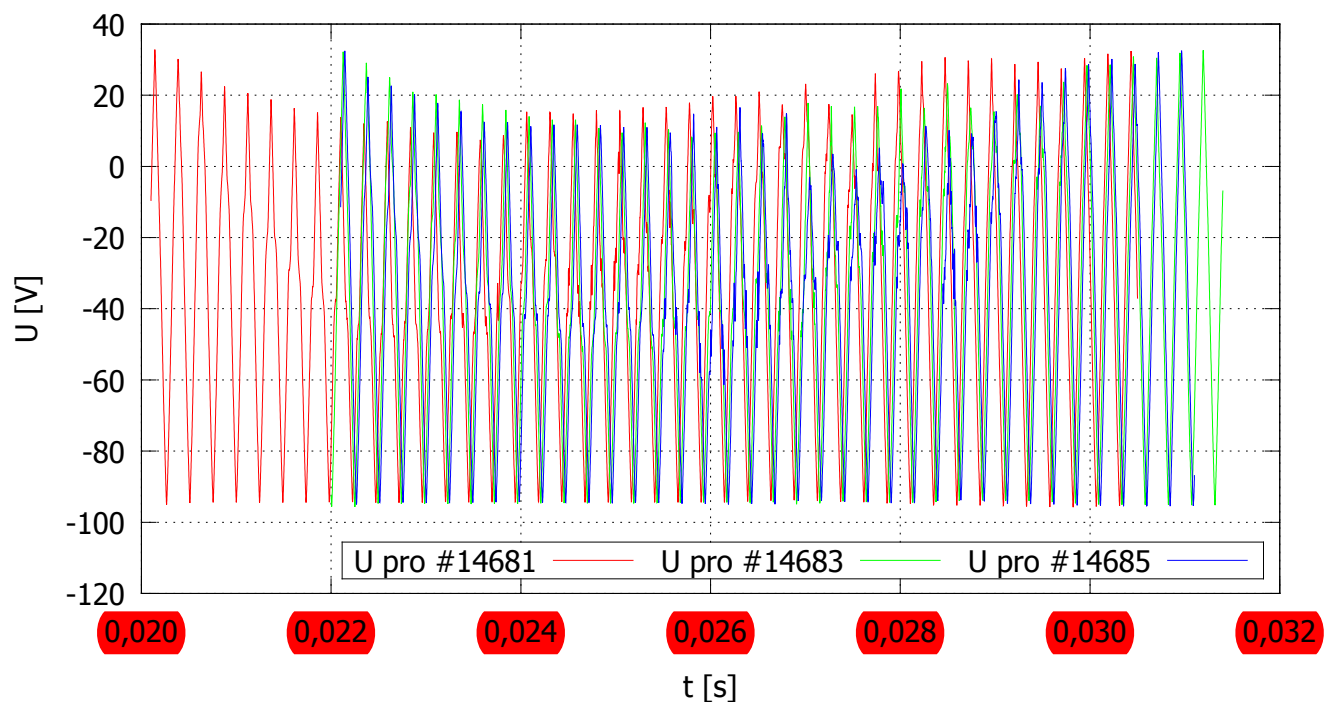


Obr. 5: Naměřené hodnoty; závislost plovoucího potenciálu  $U_{fl}$  na čase  $t$  v intervalu existence plazmatu pro první tři výstřely.

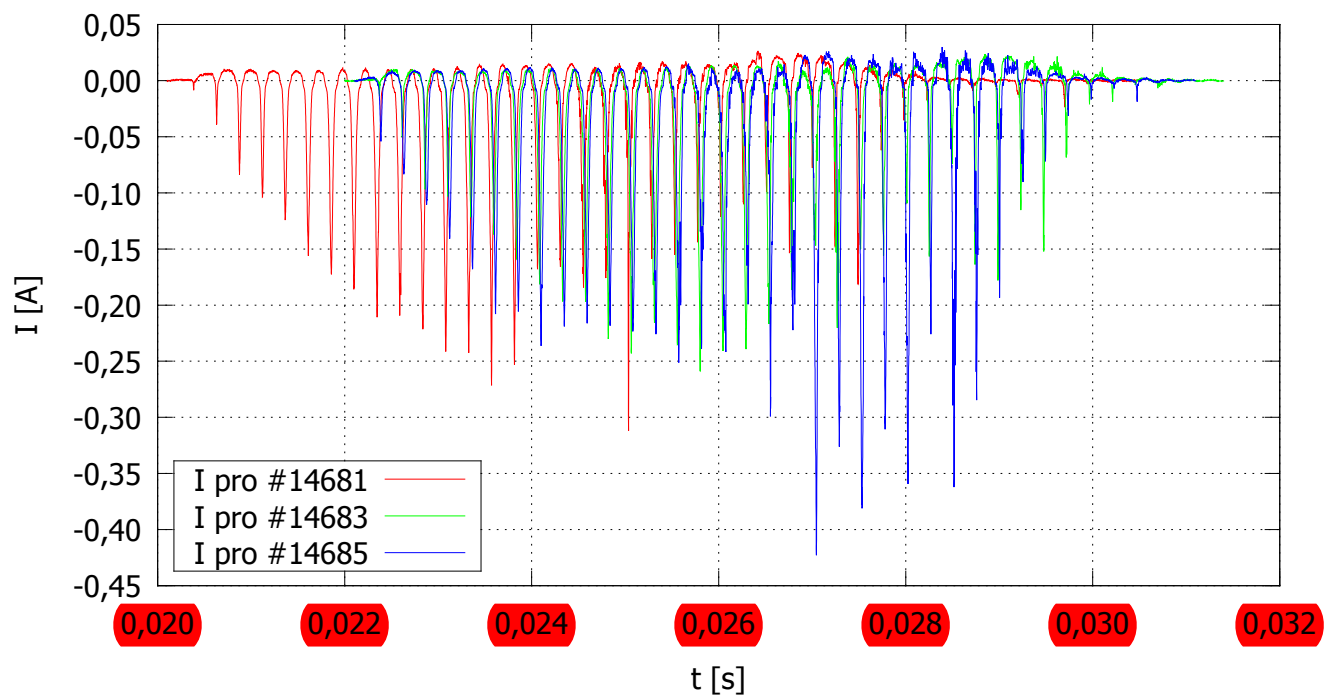


Obr. 6: Spočítané hodnoty; závislost průměrné elektronové teploty plazmatu  $U_{fl}$  na čase  $t$  v intervalu existence plazmatu pro první tři výstřely.

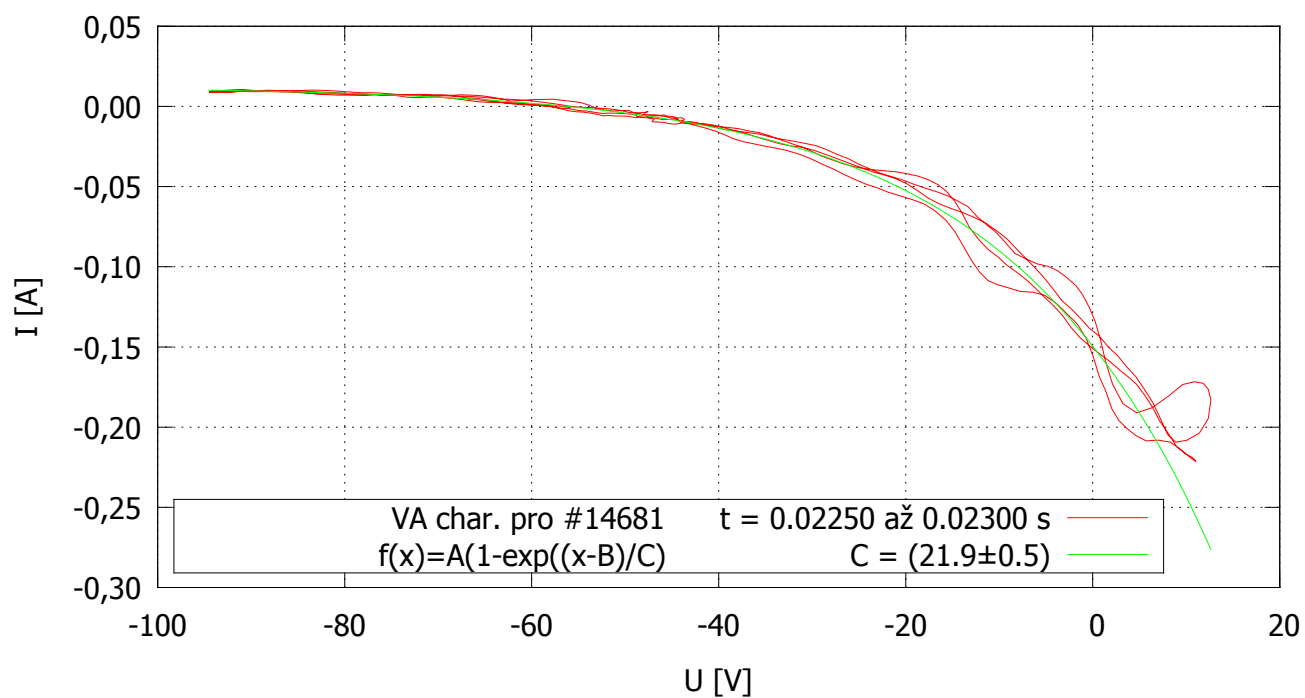




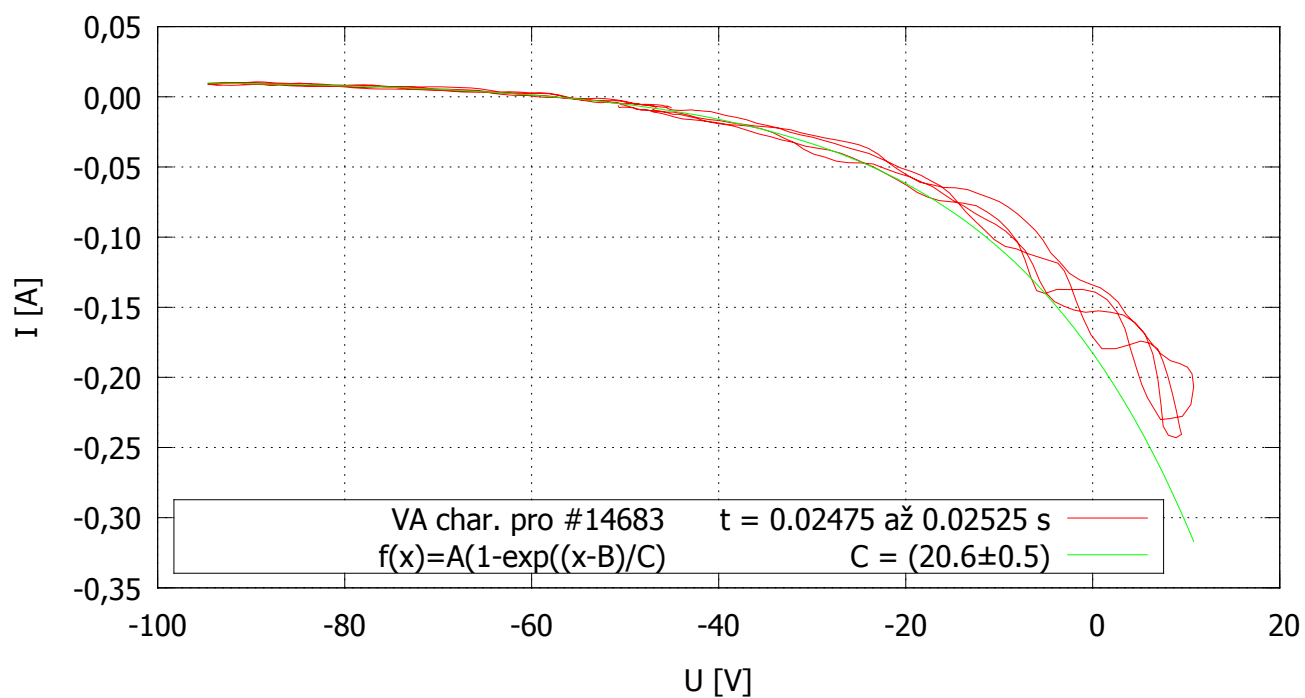
Obr. 7: Naměřené hodnoty; závislost napětí na sondě  $U$  na čase  $t$  v intervalu existence plazmatu pro první tři výstřely.



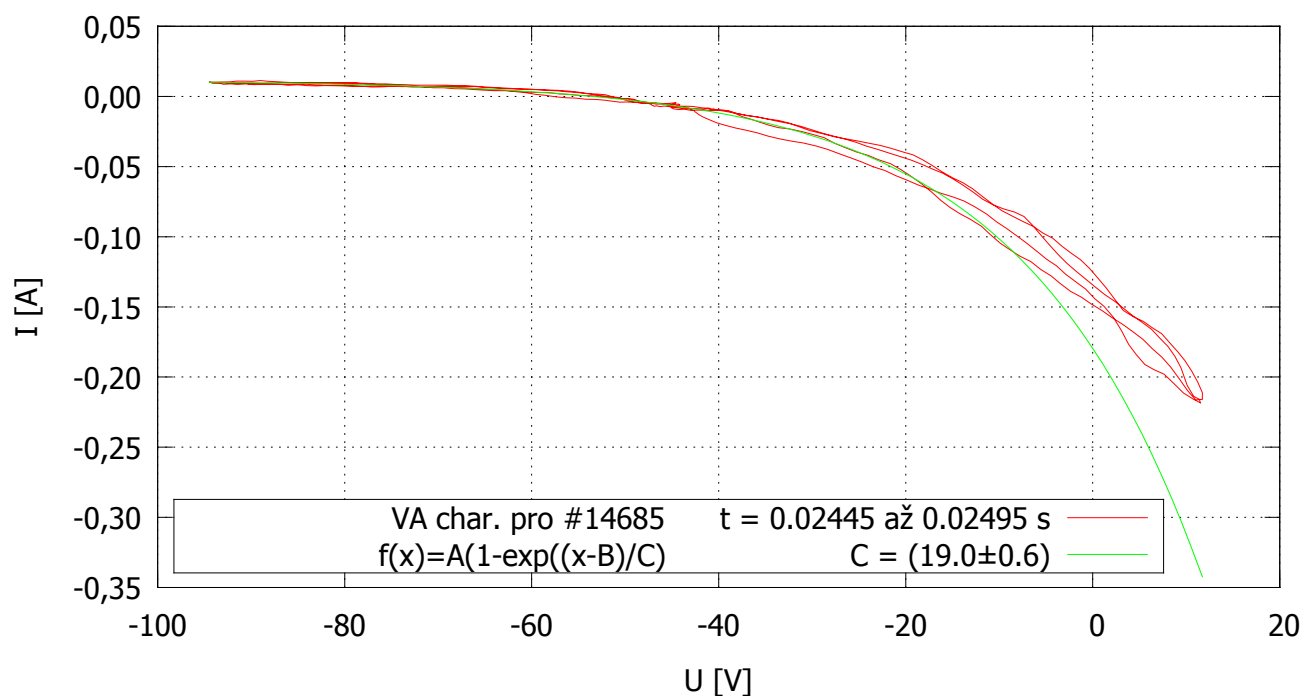
Obr. 8: Naměřené hodnoty; závislost proudu na sondě  $I$  na čase  $t$  v intervalu existence plazmatu pro první tři výstřely.



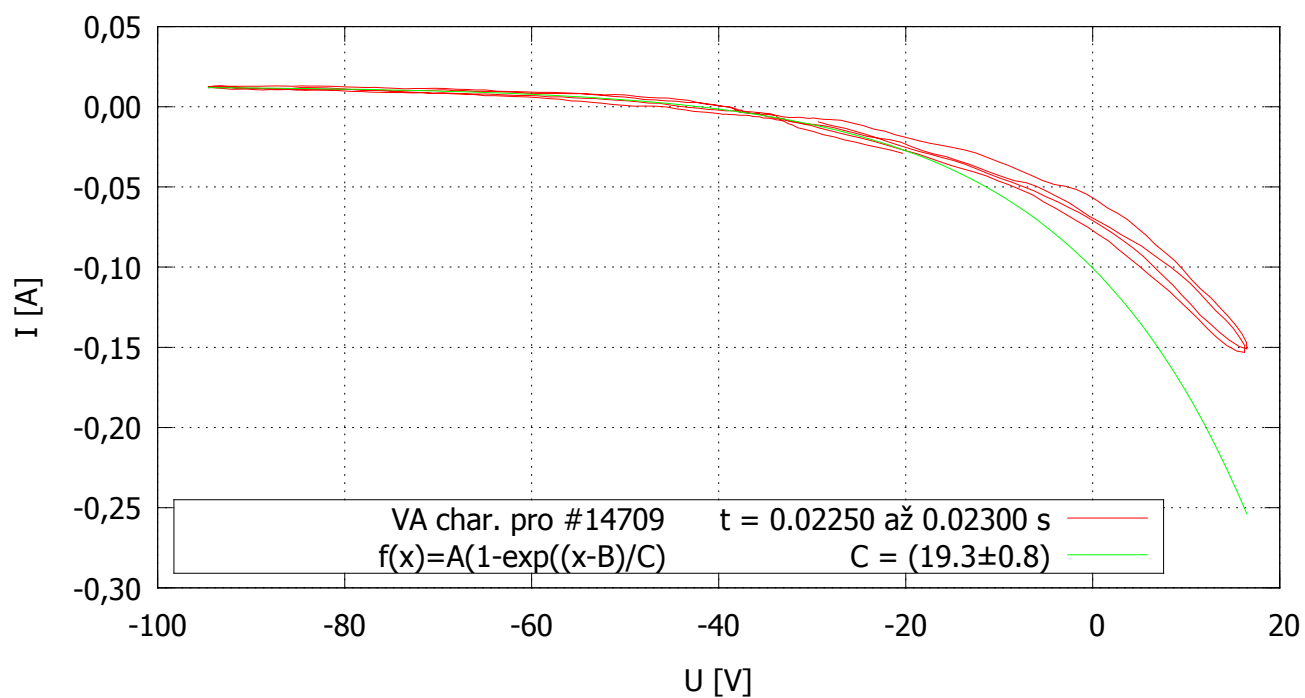
Obr. 9: Volt-ampérová charakteristika výstřelu v příslušném časovém intervalu  $t$ .



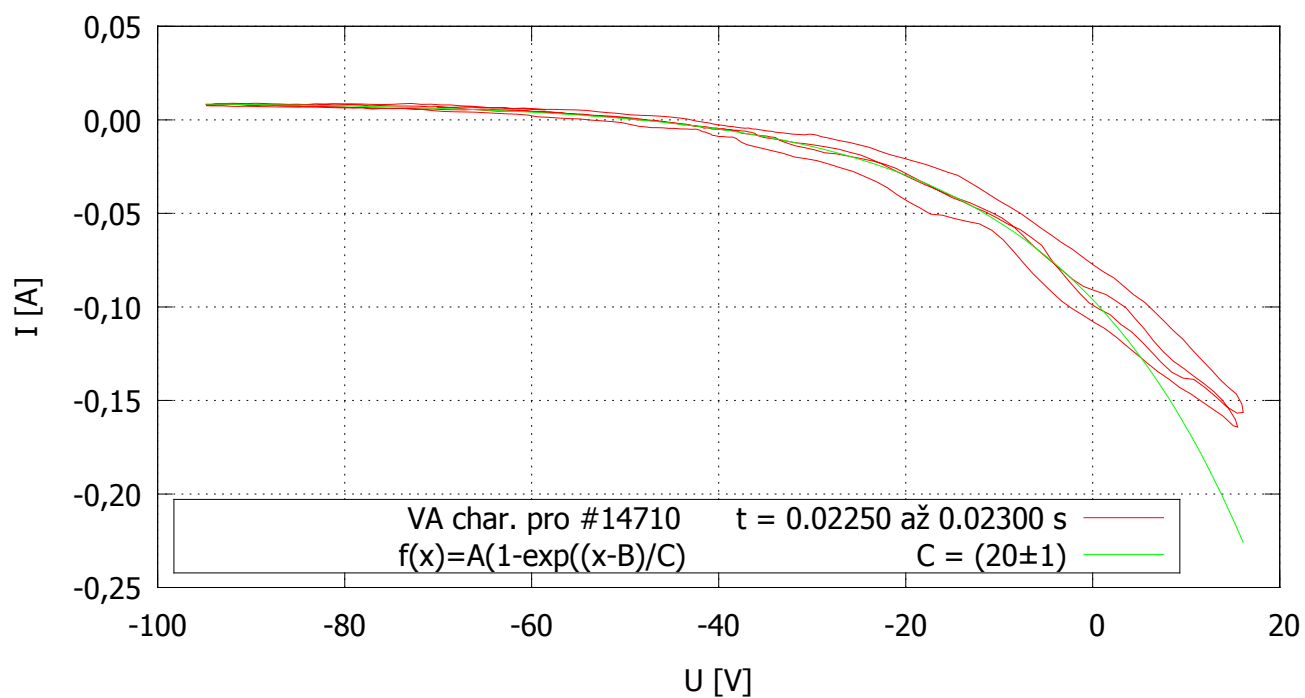
Obr. 10: Volt-ampérová charakteristika výstřelu v příslušném časovém intervalu  $t$ .



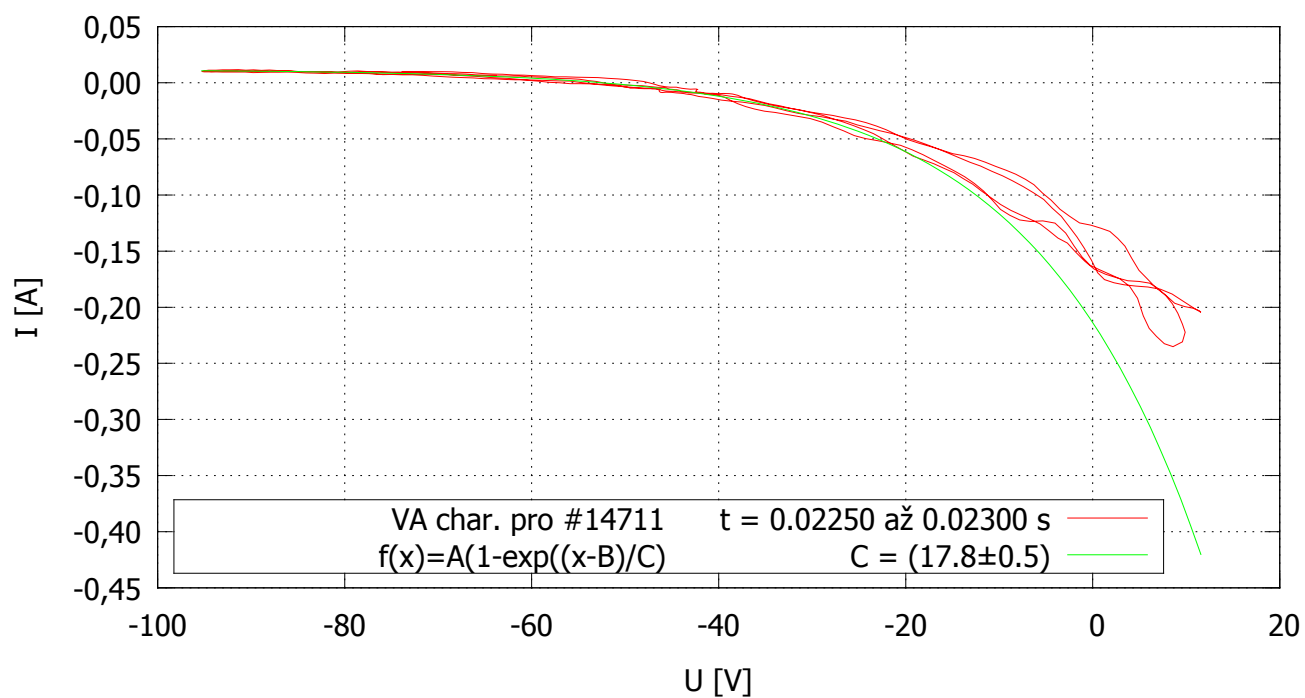
Obr. 11: Volt-ampérová charakteristika výstřelu v příslušném časovém intervalu  $t$ .



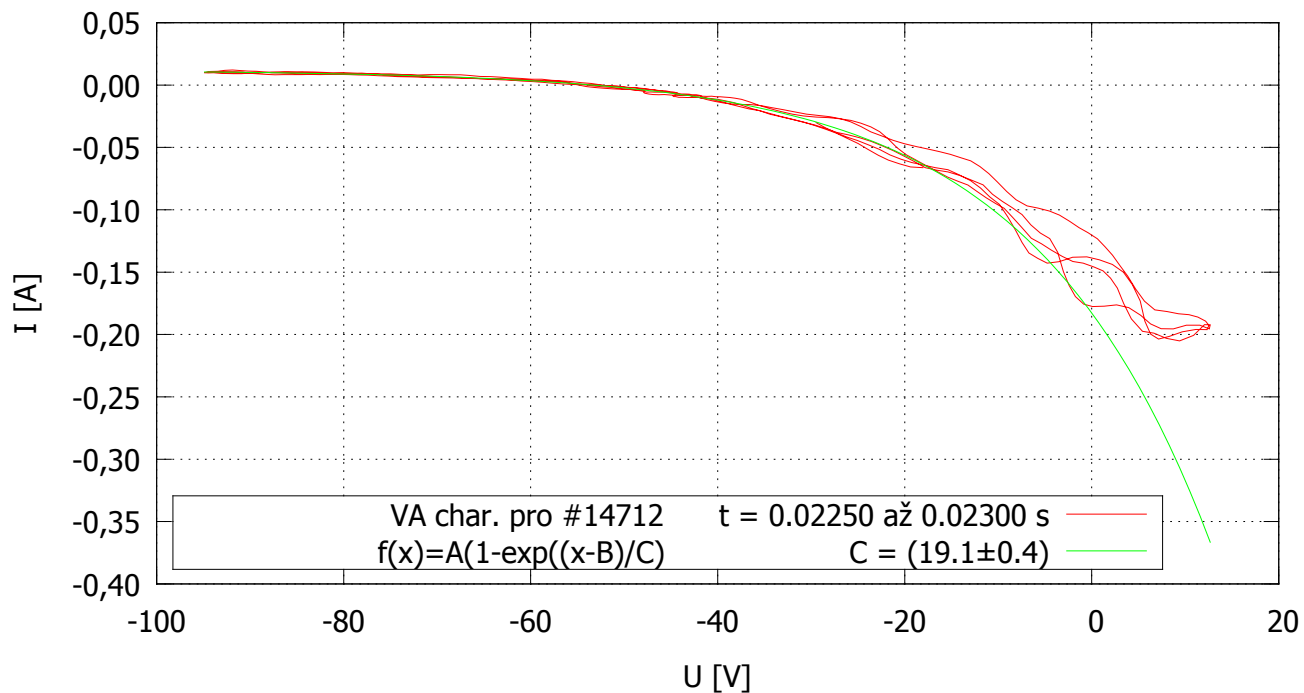
Obr. 12: Volt-ampérová charakteristika výstřelu v příslušném časovém intervalu  $t$ .



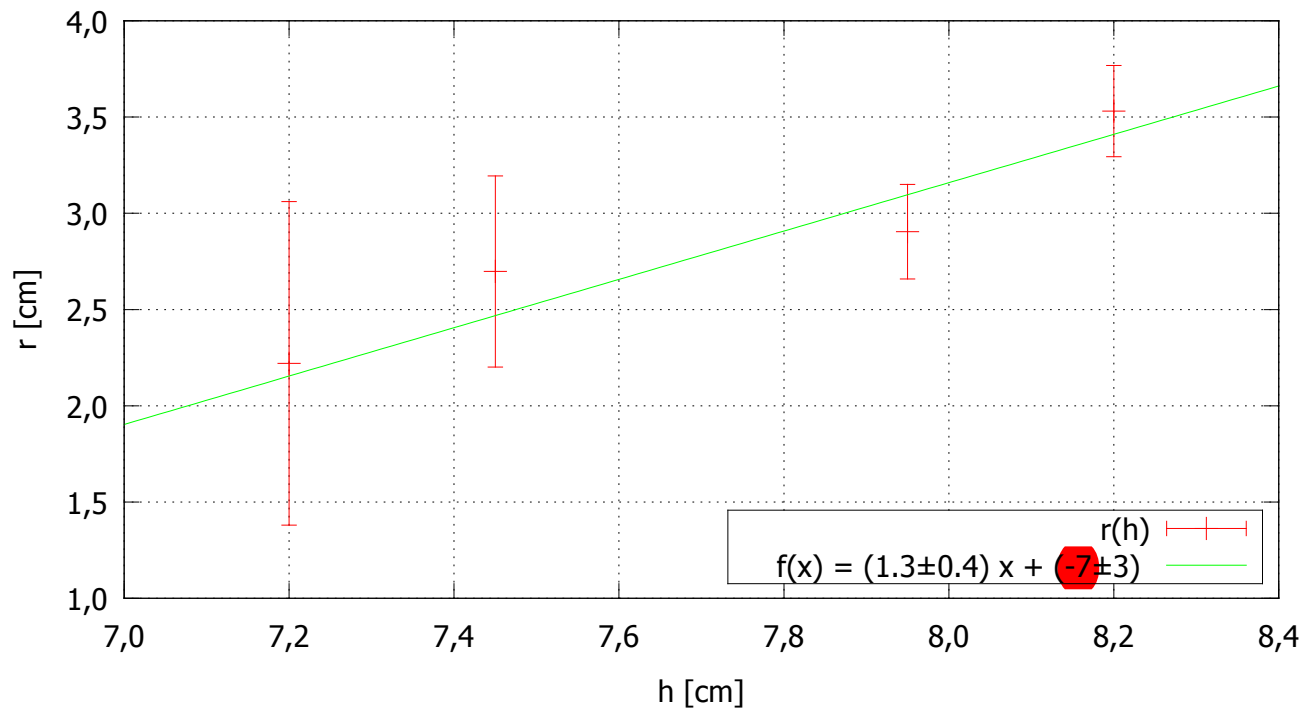
Obr. 13: Volt-ampérová charakteristika výstřelu v příslušném časovém intervalu  $t$ .



Obr. 14: Volt-ampérová charakteristika výstřelu v příslušném časovém intervalu  $t$ .



Obr. 15: Volt-ampérová charakteristika výstřelu v příslušném časovém intervalu  $t$ .



Obr. 16: Vypočítané hodnoty; závislost polohy sondy  $r$  získané z  $T_e$  a  $\overline{T_e}$  pomocí (2) i s chybou (6.4) na hloubce sondy  $h$  pro poslední 4 výstřely.