

Tokamak Golem

Studentský experiment

Pracovní úkoly

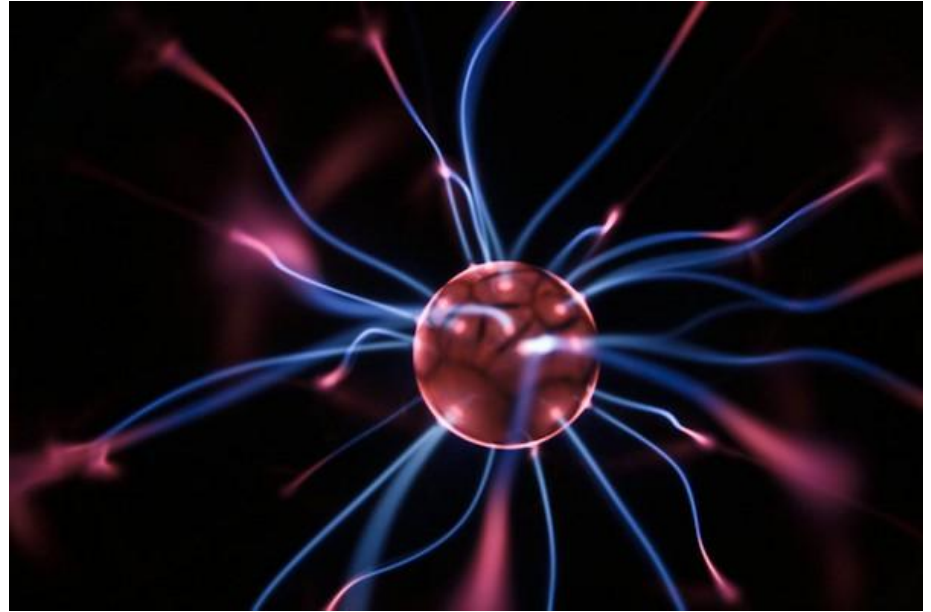
- seznámit se s tokamakem, s webovým rozhraním
- osadit tokamak diagnostickými prostředky
- vytvořit samostatné el. pole (výboj bez plynu)
- vytvořit komplexní zadání pro výboj
- odhadnout odpor komory
- znázornit časový průběh proudu a vývoj teploty
- 5 měření s nejvyšší teplotou



Obr. 1: To do

Fúze aneb jak “fúzovat”

- proč lidstvo zajímá fúze
- plazma
- termojaderná fúze a problémy kolem
- tokamak
- měřicí přístroje
- Výsledky



obr 2: Plasma koule


Co nás k tomu vede?

- Lidská zvědavost
- inspirace přírodou
- rostoucí energetická závislost lidstva
- zneužití x využití



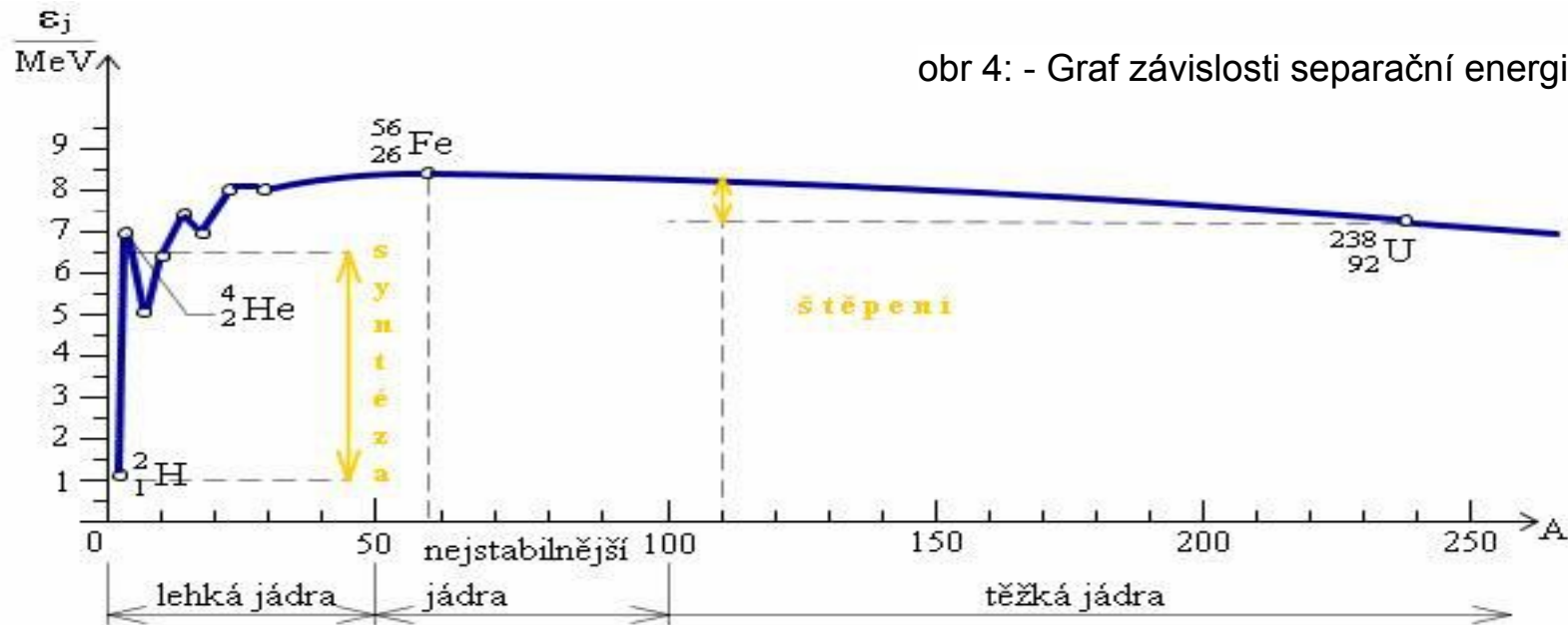
obr. 3: Síla v poznání

Plazma a jeho ohřev

- soubor částic s volnými nosiči nábojů, který je globálně neutrální a vykazuje kolektivní chování
 - **elektrické vlastnosti:** elektricky vodivá, reaguje na magnetické pole, sama může generovat elektrické a magnetické pole, probíhají v ní složité elektro- a magneto-dynamické procesy
 - čtvrté skupenství hmoty
 - nejrozšířenější forma látky, až 99% pozorované atomární hmoty vesmíru
 - médium pro termojaderné reakce
- 

Termojaderná fúze

- inverzní k ději jaderného štěpení.
- založené na poznatku, že při slučování (fúzi) jader lehkých prvků vzniká určité množství energie, což vyplývá z rozdílu vazebných energií jednotlivých prvků
 - Ze dvou jader lehčích než je jádro železa, lze vytvářet jádra těžší, která



Termojaderná fúze

Aby došlo k uvolnění energie musí se splnit určité podmínky:

- **Lawsonovo kritérium**

- Požadavek kladený na teplotu plazmatu T , hustotu iontů v plazmatu n a dobu plazmatu τ , který zabezpečuje, aby při termonukleární fúzi v plazmatu vzniklo množství energie než je potřebné k ohřevu a náhradě ztrát zářením.

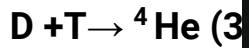
- **zabránit dotyku horkého plazmatu a stěny komory**

- magnetickým udržením (viz níže)*

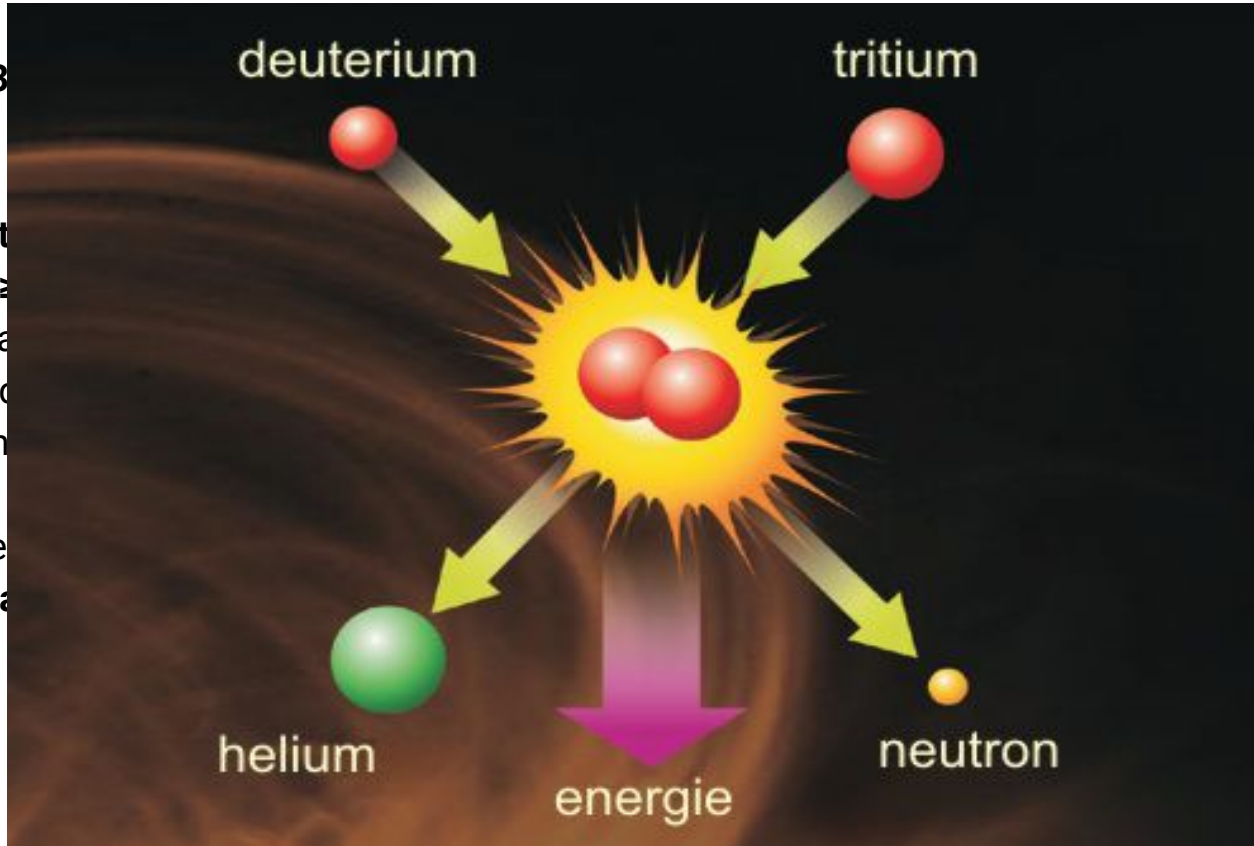
- **sloučení jader**

- dostat jádra na vzdálenost menší než 10^{-14} m → urychlení:
urychlovačem nebo **zahřátím na zápalnou teplotu $T_i \approx 2 \times 10^8$ °C**

D-T reakce



- Pro syntézu (n x τ_E) \approx
- Z kritéria termojaderné reakce
 - Zhrovnění (s)
 - neutrons) -
 - ma



$\approx 10^{-10}$
) -

obr 5 - Ilustrační obrázek

Magnetické udržení

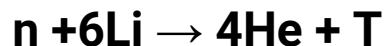
- realizováno vnějším magnetickým polem
- dráha nabité částice je polem zakřivována, až kolem směru siločar magnetického pole opíše kružnici. Čím je mag. pole silnější, tím menší kružnice nabitá částice opisují, a tím lépe jsou polem „drženy“
- pohyb pouze díky srážkám, které je posunují na „sousední“ magnetické siločáry
- částice ve směru kolmém na směr magnetických siločar difundují (pronikají nebo unikají) tím hůře, čím je méně srážek a čím je magnetické pole silnější

Technické problémy termonukleární reakce

Překonáním problémů s udrženíím resp. ohřevem plazmatu 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 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.

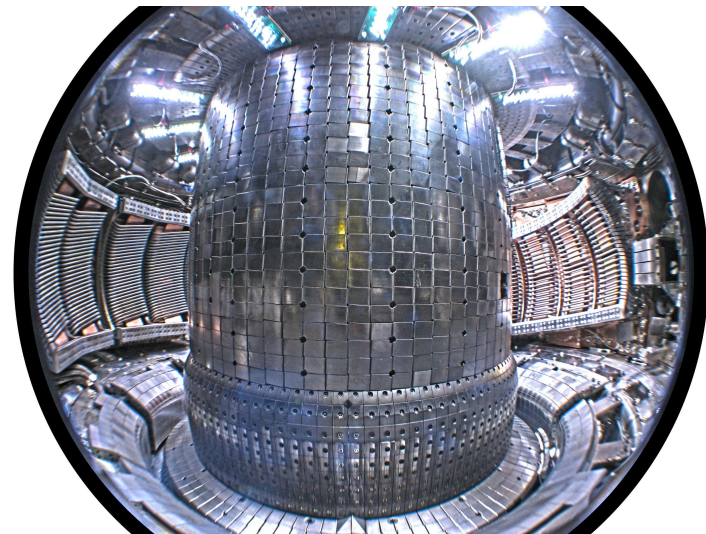
3. **Magnety:** Objem prostoru, ve kterém je požadováno vysoké magnetické pole je z ekonomického hlediska nejvýznamější faktor limitující velikost fúzních zařízení.

Tokamak

zařízení pro realizaci fúze

Tokamak

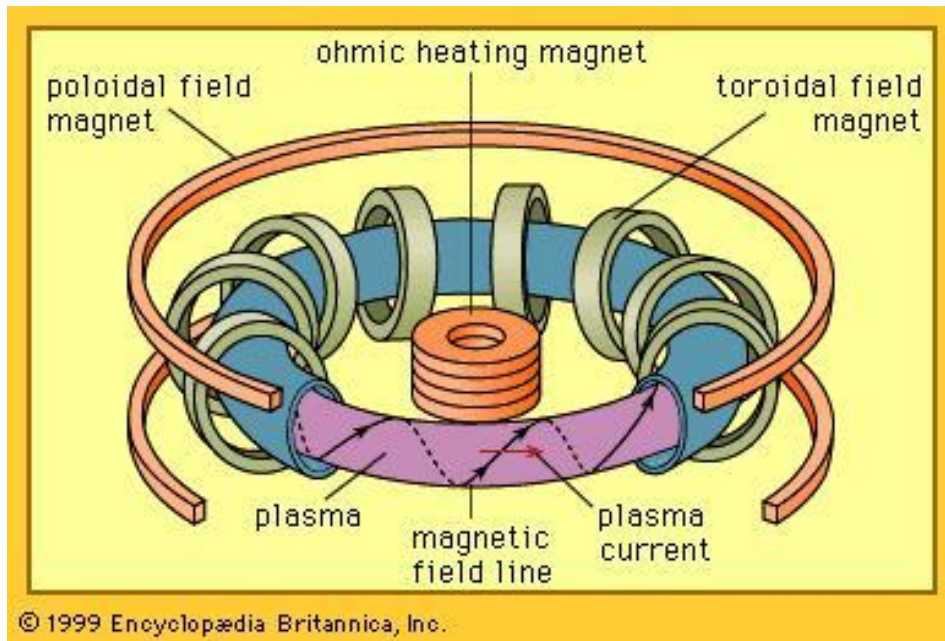
- **T**Oroidnaja **K**Amera i **M**Agnitnaja **K**atuška
- Nemůžeme dosáhnout tlaků jako na slunci
- Jsou potřeba vysoké teploty (řádově 10^8 K)
- Ohmický ohřev (efektivní do řádově 10^7 K)
 - Dodatečný ohřev elektromagnetickou vlnou
 - vstřikování svazků urychlených atomů -> iontů a elektronů (urychlí se a předají energii plazmatu)
 - je nutné vyladit správnou energii vstřikovaných částic



obr. 6: TOKAMAK

Schéma

- Cíl: Toroidální tvar plazmatu; nesmí se dotýkat stěn
 - poloidální + toroidální magnetické pole
- Velký transformátor
 - primární vinutí klasické
 - sekundární vinutí je jádrem tokamaku
- Ohmický ohřev
 - rychlé vybití kondenzátorů -> indukce el. proudu
 - vodivost plazmatu roste s teplotou



obr. 7 - fúzní reaktor

Lawsonovo kritérium

- Určuje hodnotu, kterou je nutné přesáhnout pro energetické využití fúze
- Kritérium vědecké rovnováhy
 - vyrovnání fúzní výkon x ohřev
- Kritérium zapálení
 - vyrovnání tepelného ohřevu z plazmatu x ztráty

$$- n \tau_E \geq f(T)$$

$$- n T \tau_E \geq 0,926 \times 10^{21}$$

$$- n T \tau_E \geq 5,554 \times 10^{21}$$

ITER

- Projekt EU, USA, Číny, Japonska, Jižní Koreje, Ruska
- Největší zařízení na zkoumání term. fúze
- Plánované dokončení v roce 2035
- Princip TOKAMAKu
- Využití největšího kryogenního systému na světě (chlazení cívek -> konzervace energie + supravodivost)



obr. 8 - ITER

GOLEM

- Fúzní reaktor na FJFI ČVUT
- TM-1, TM-1-MH a CASTOR
- Nejstarší a nejmenší reaktor svého typu na světě
- do května 1976 v Ústavu atomové energie I. V. Kurčatova v Moskvě
- od září 1977 v provozu na AV v Praze

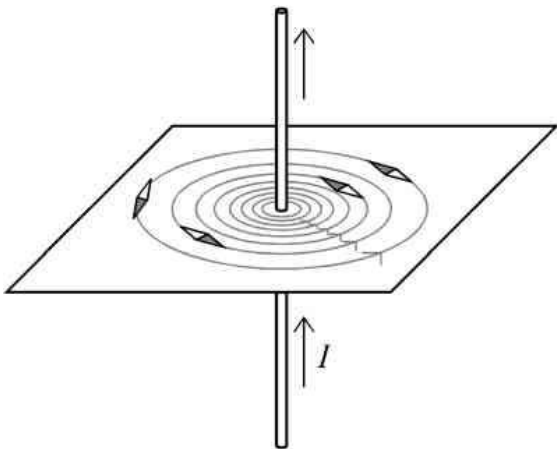


obr. 9 - GOLEM

Měřicí přístroje

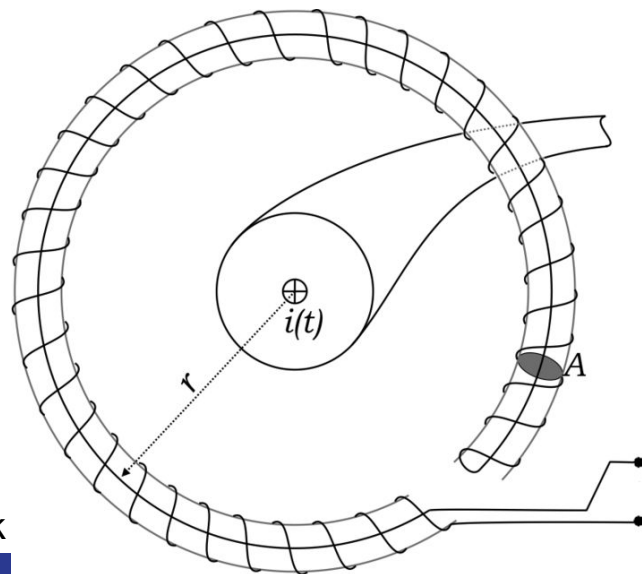
Rogowského pásek (cívka)

- tok nabitých částic vytváří kruhové mag. pole
- Rog. pásek je el. vodič (cívka)



obr. 10 Stacionární mag. pole

- díky EMI měří střídavý proud
- průchod vodiče středem vinutí ruší ostatní směry mag. pole



obr. 11 Rogowského pásek



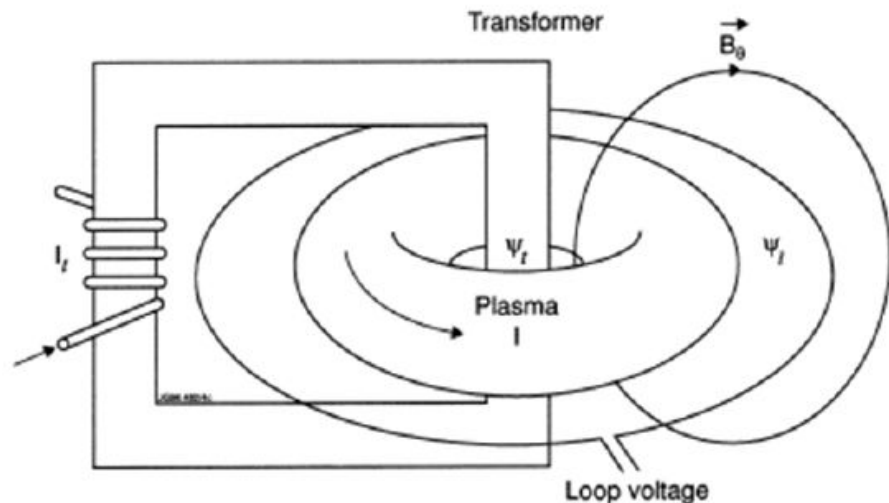
obr. 12 Rogowského pásek



obr. 13 Vnitřek Rogowského pásku

Napětí na závit U_l (Loop Voltage)

- U_l stejné jako napětí na plazmatickém prstenci
- měřeno pomocí jednoho závitu vodiče na výbojové komoře



Obr. 14 Zjednodušené schéma tokamaku



Výsledky



Tokamak Golem ****REMOTE**** for RemoteShots (Level I)

The smallest & oldest operational tokamak with the biggest control room in the world

Home

Wiki

Control Room

Queue

Results

GOLEM
dygraph

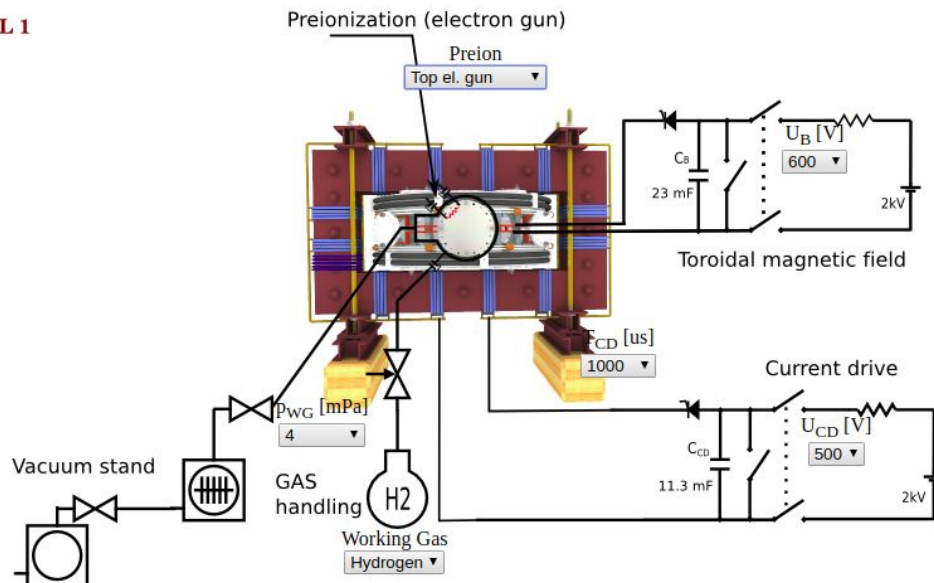
IP cameras

3D model

Chat

Level I

LEVEL 1

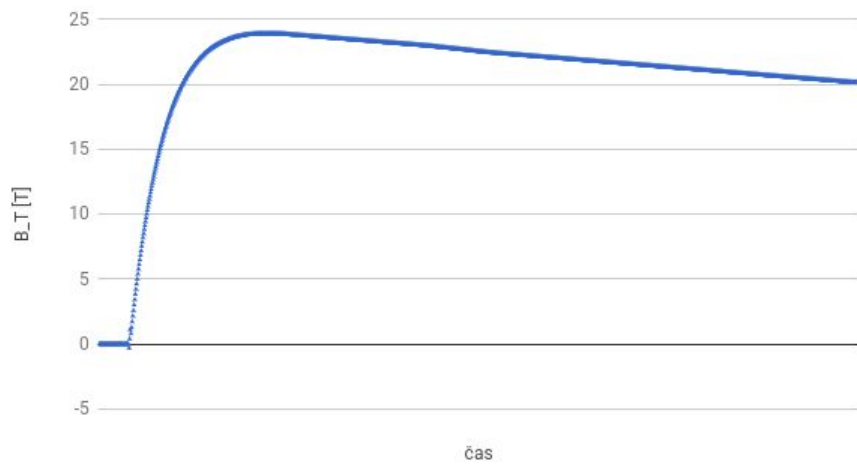


Discharge comment

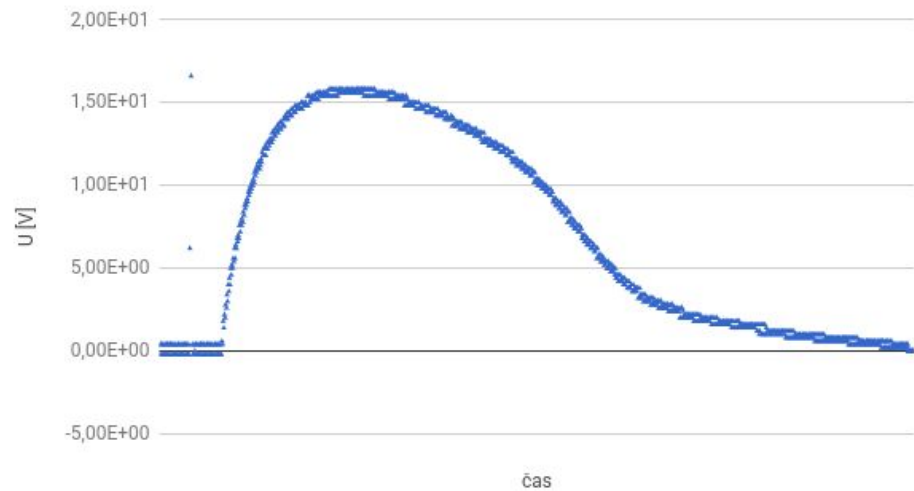
Place the discharge setup into the queue

Note: We use cookies to record last set parameters in your browser to simplify parameter scans.

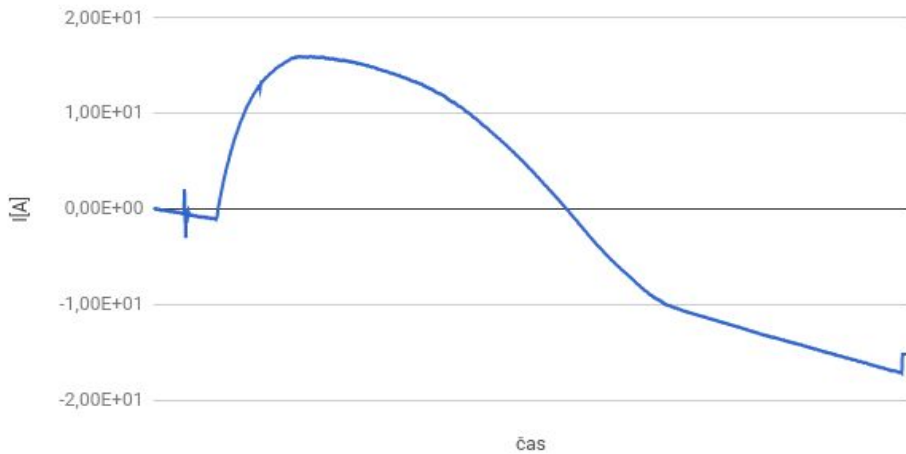
Magnetické pole [T] - vakuum



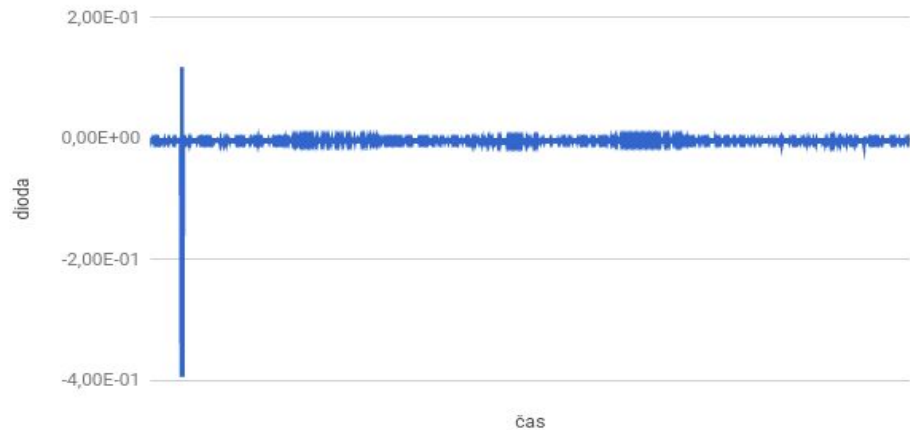
U [V]



I [A] - vakuum



Dioda - vakuum



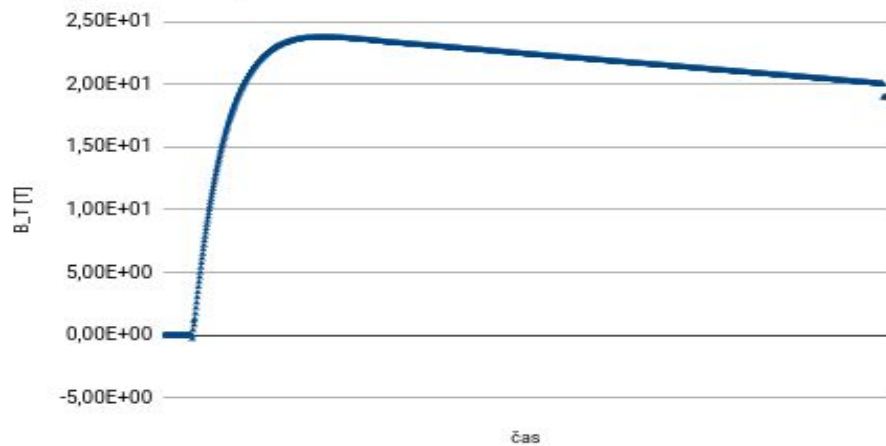
tlak [mPa]	opravdový tlak [mPa]	max. teplota [eV]	W_TH	R_P	P_loss	tau_E (ms)	I_P max [A]
0	1,77	375	8,58	7,14	0,011	750,87	17,16
1	2,24	18	0,54	-4,76	-0,017	-31,73	16,32
2	3,53	17	0,76	-4,76	-0,017	-44,48	14,12
4	5,58	12,69	0,97	0,14	0,0016	0,00022	17,86
6	6,57	19	1,61	7,14	0,011	140,62	16,86
8	2,55	241	7,96	7,15	0,0114	696	1,24
10	11,44	494	73,21	7,15	0,0114	6403,56	25,4
14	13,88	1,09.10^6	195984	-0,072	-4,57E-04	-428735357	796

tlak [mPa]	opravdivý tlak [mPa]	lmax teplota [eV]	W_TH	R_P	P_loss	tau_E (ms)	I_P max [A]
0	1,77	375	8,58	7,14	0,011	750,87	17,16
1	2,24	18	0,54	-4,76	-0,017	-31,73	16,32
2	3,53	17	0,76	-4,76	-0,017	-44,48	14,12
4	5,58	12,69	0,97	0,14	0,0016	0,00022	17,86
6	6,57	19	1,61	7,14	0,011	140,62	16,86
8	2,55	241	7,96	7,15	0,0114	696	1,24
10	11,44	494	73,21	7,15	0,0114	6403,56	25,4
14	13,88	1,09.10^6	195984	-0,072	-4,57E-04	-428735357	796

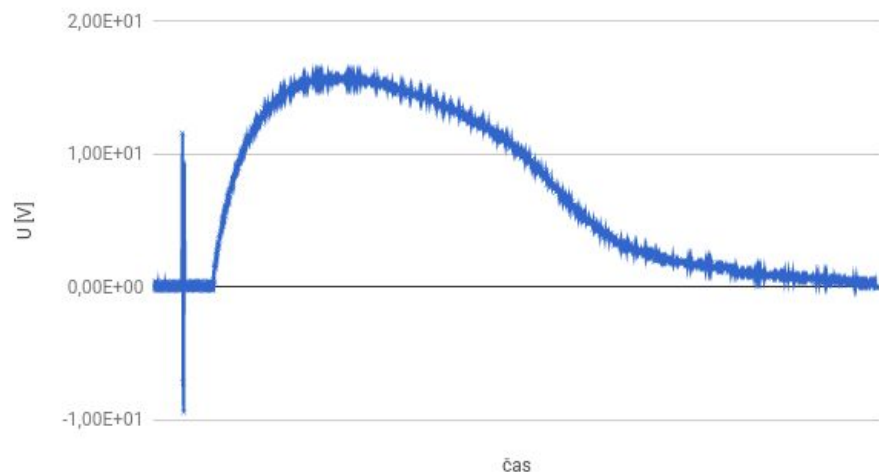
tlak [mPa]	opravdový tlak [mPa]	max. teplota [eV]	W_TH	R_P [Ohm]	P_loss	tau_E	I_P max [A]
0	1,77	375	8,58	7,14	0,011	750,87	17,16
1	2,24	18	0,54	-4,76	-0,017	-31,73	16,32
2	3,53	17	0,76	-4,76	-0,017	-44,48	14,12
4	5,58	12,69	0,97	0,14	0,0016	0,00022	17,86
6	6,57	19	1,61	7,14	0,011	140,62	16,86
10	11,44	494	73,21	7,15	0,0114	6403,56	25,4
14	13,88	1,09.10^6	195984	-0,072	-4,57E-04	-428735357	796

tlak [mPa]	opravdový tlak [mPa]	max. teplota [eV]	W_TH	R_P [Ohm]	P_loss	tau_E (ms)	I_P max [A]
1	2,24	18	0,54	-4,76	-0,017	-31,73	16,32
2	3,53	17	0,76	-4,76	-0,017	-44,48	14,12
4	5,58	12,69	0,97	0,14	0,0016	0,00022	17,86
6	6,57	19	1,61	7,14	0,011	140,62	16,86
10	11,44	494	73,21	7,15	0,0114	6403,56	25,4

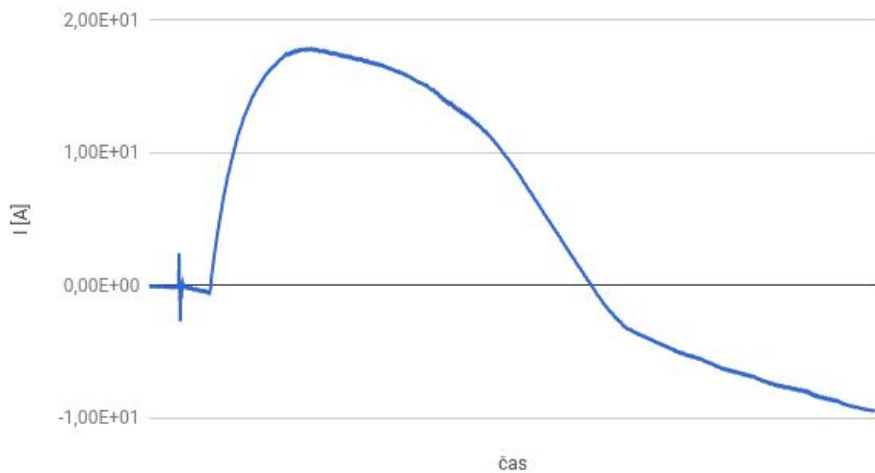
Magnetické pole - 5.58 mPa



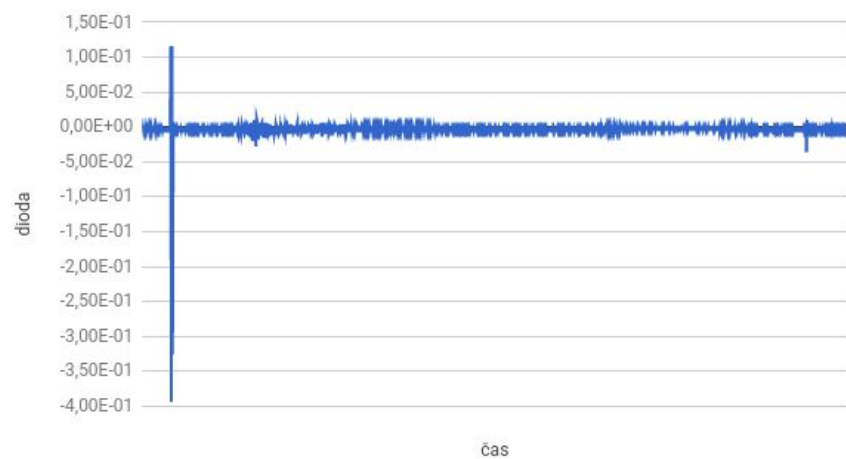
Napětí na závit - 5.58 mPa



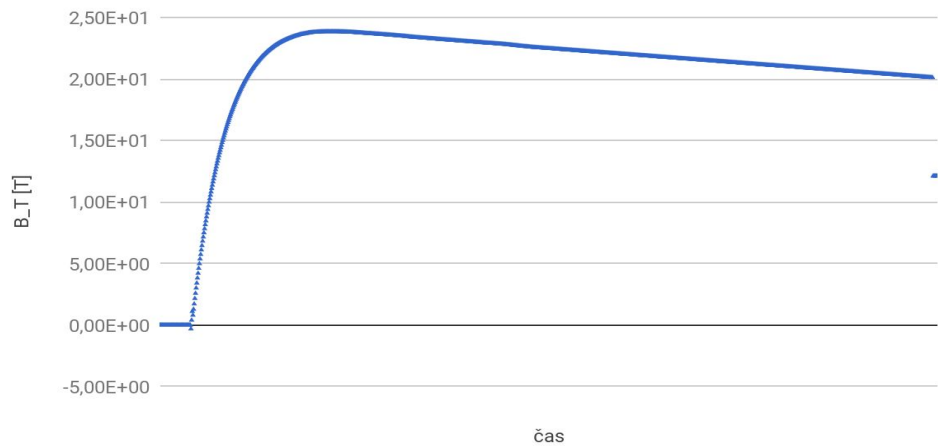
Proud plazmatem - 5.58 mPa



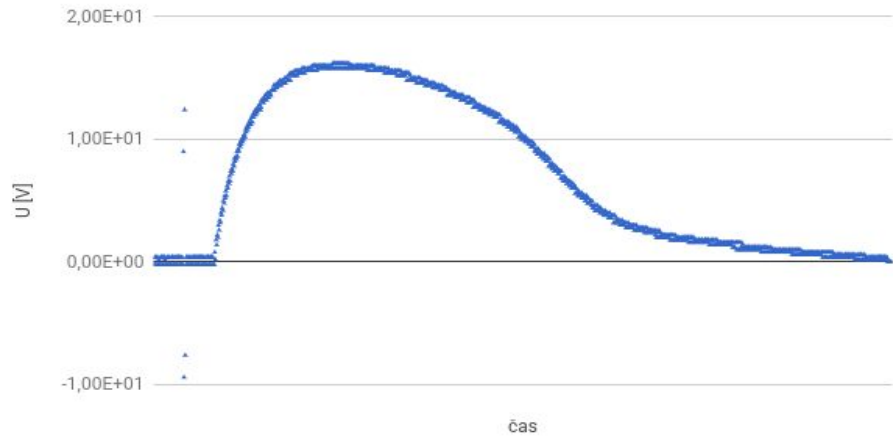
Dioda - 5.58 mPa



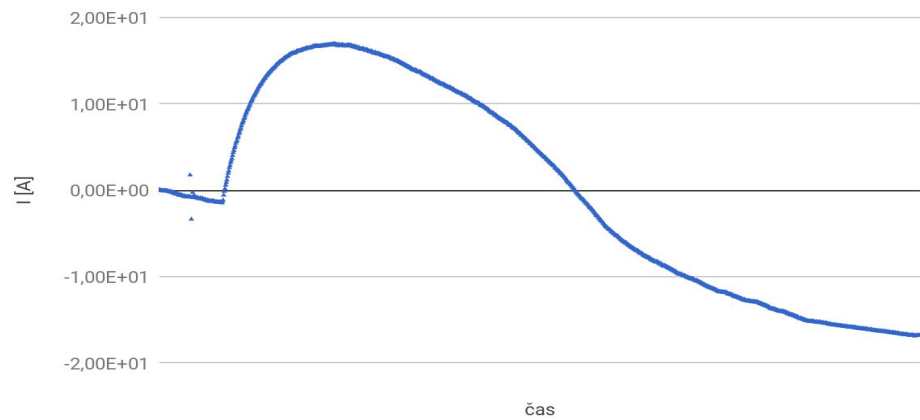
Magnetické pole - 6.57 mPa



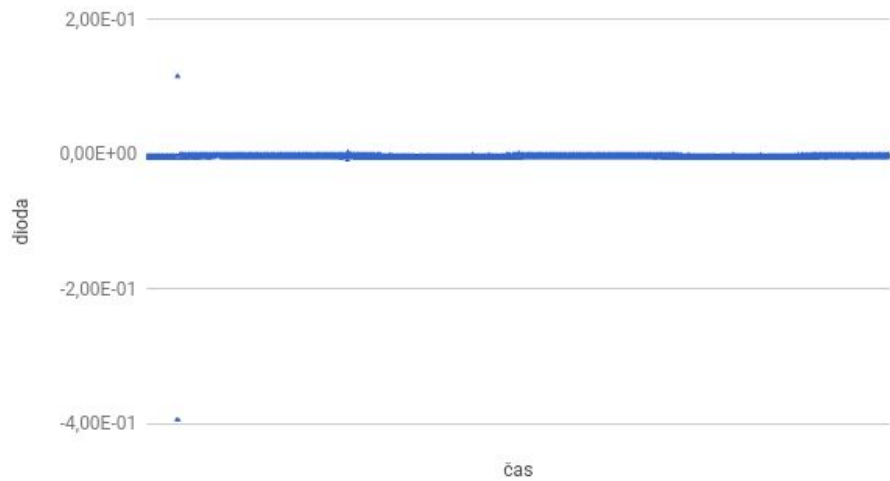
Napětí na záit - 6.57 mPa



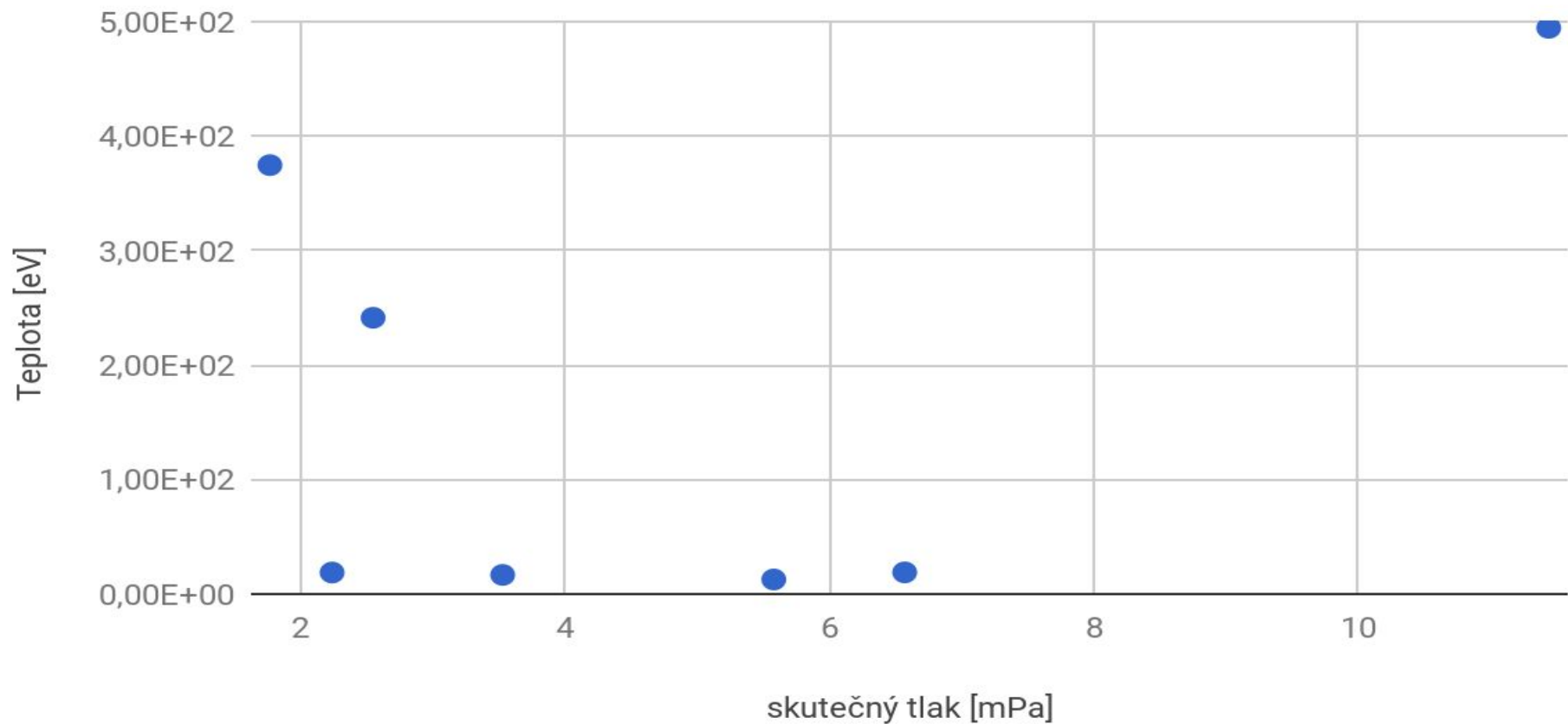
Proud plazmatu - 6.57 mPa



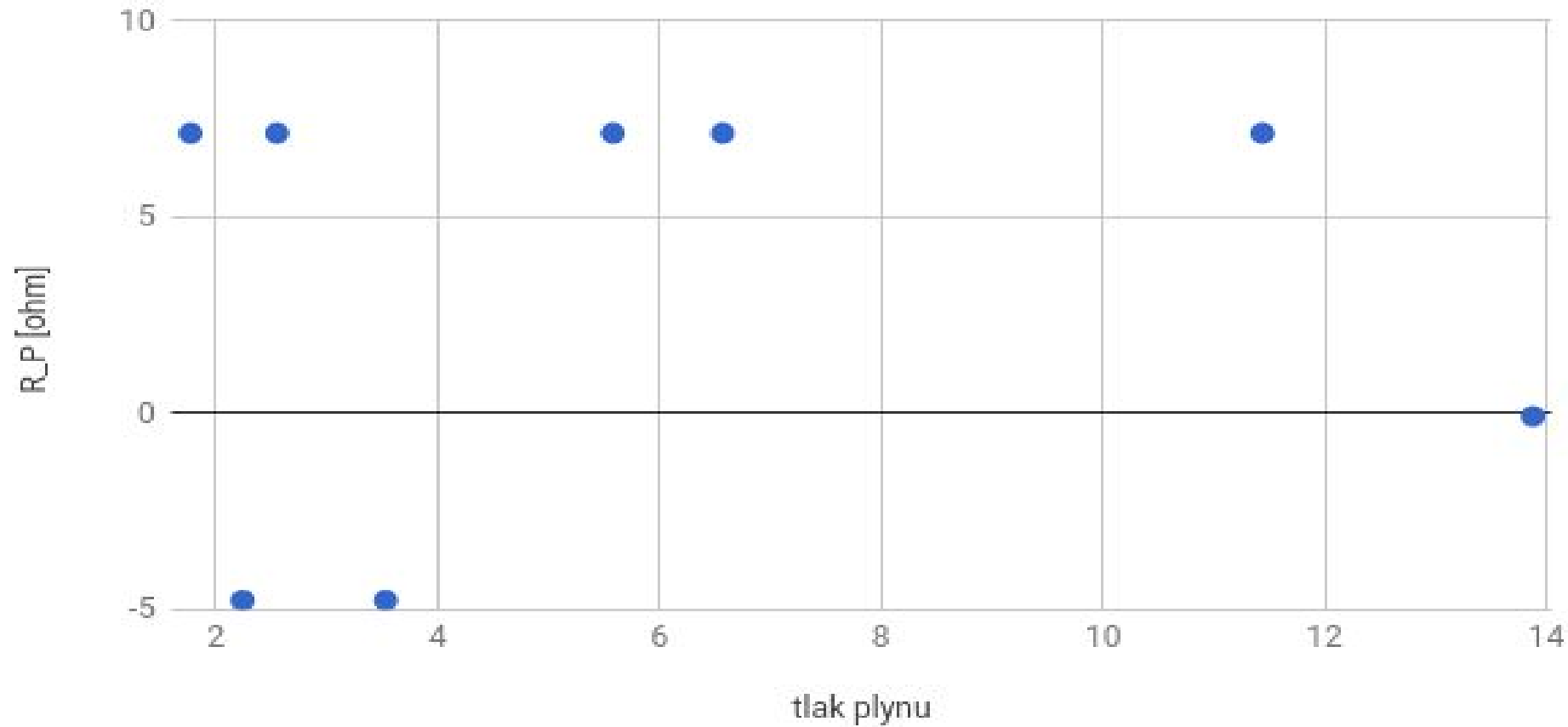
Dioda - 6.57 mPa



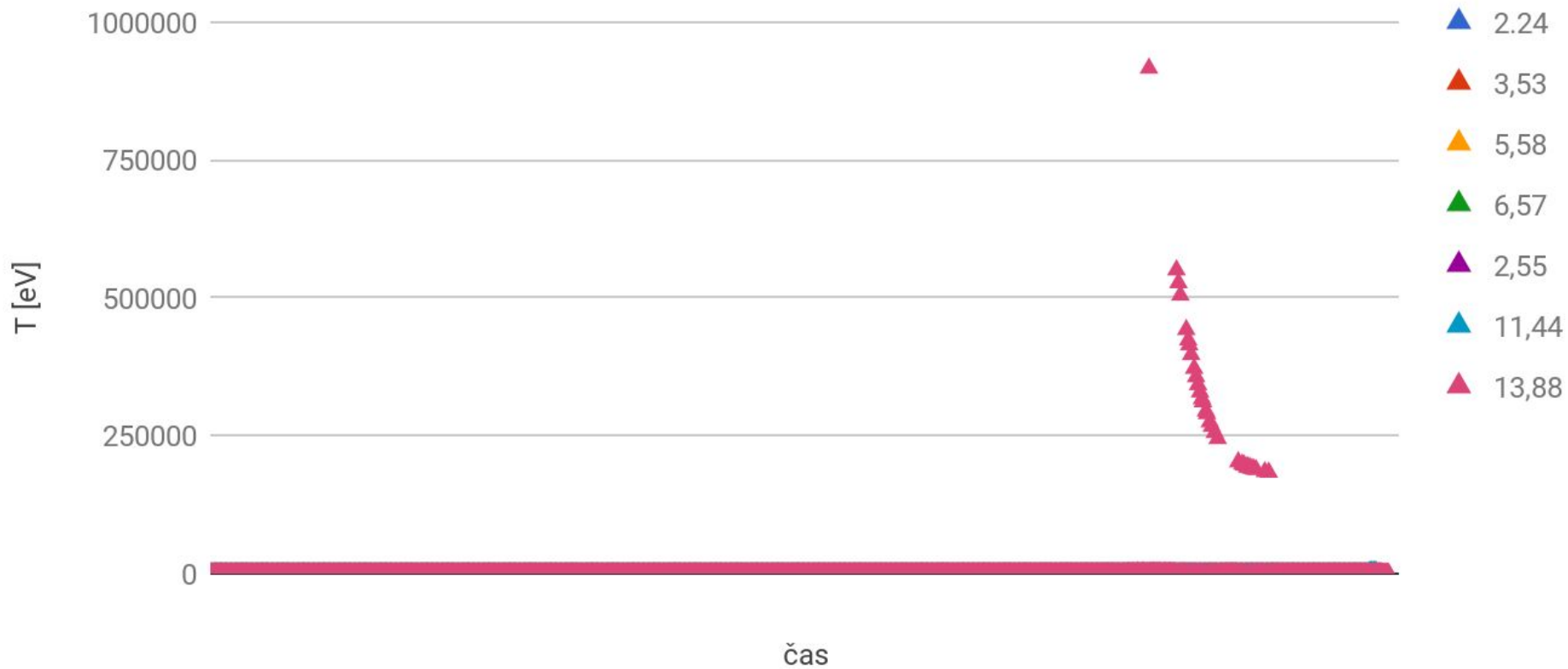
Teplota v závislosti na tlaku



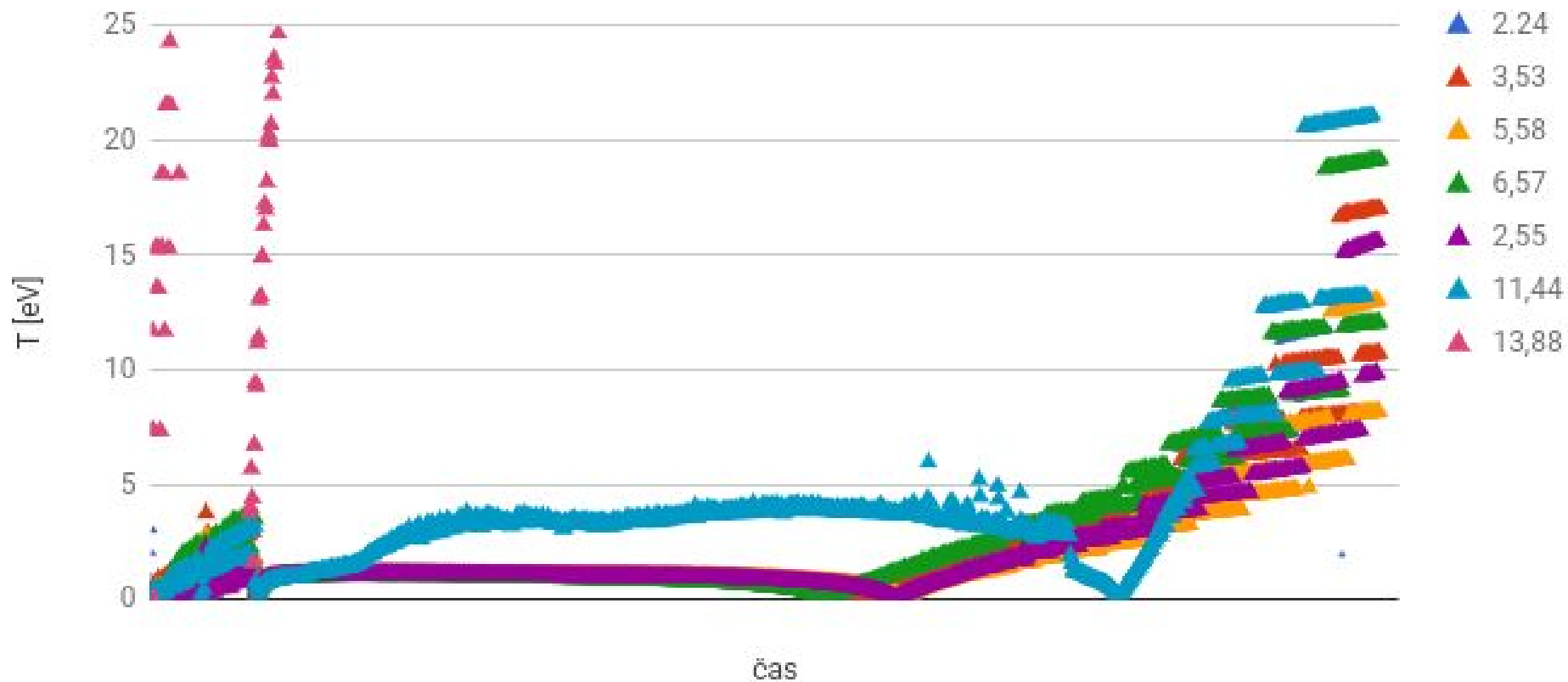
Odpor komory



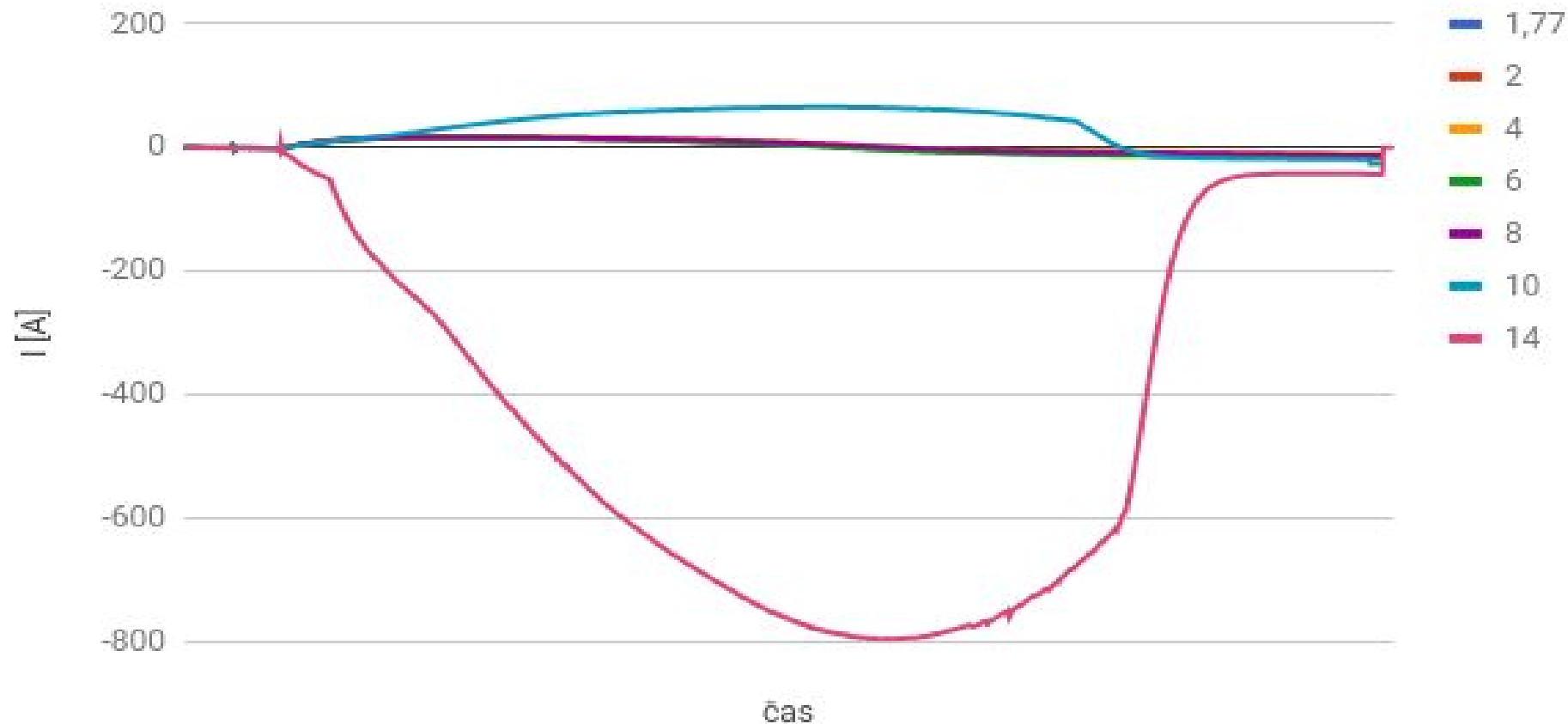
Časový vývoj teploty



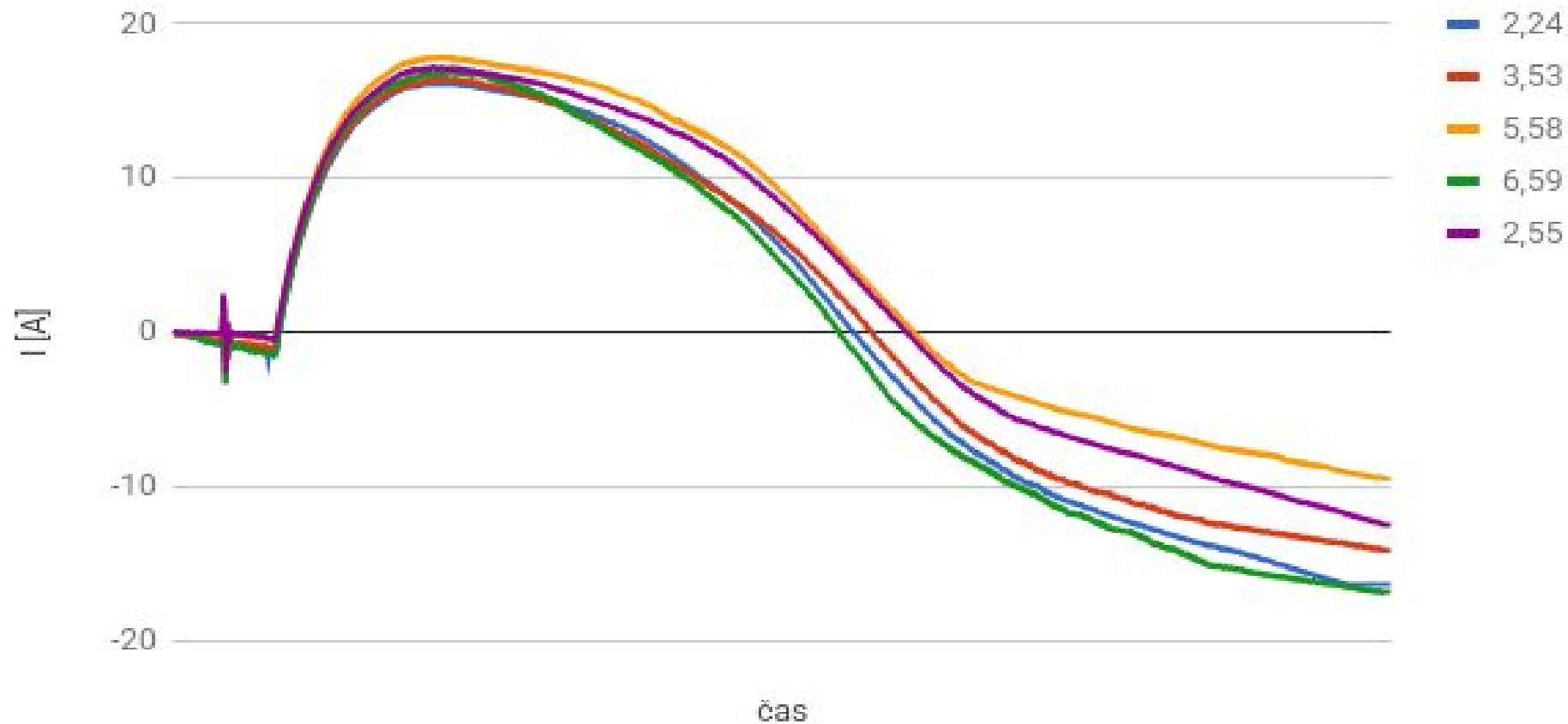
Časový vývoj teploty



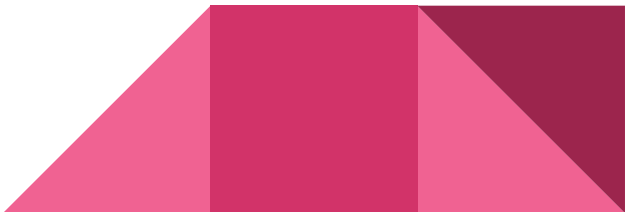
Časová závislost proudu

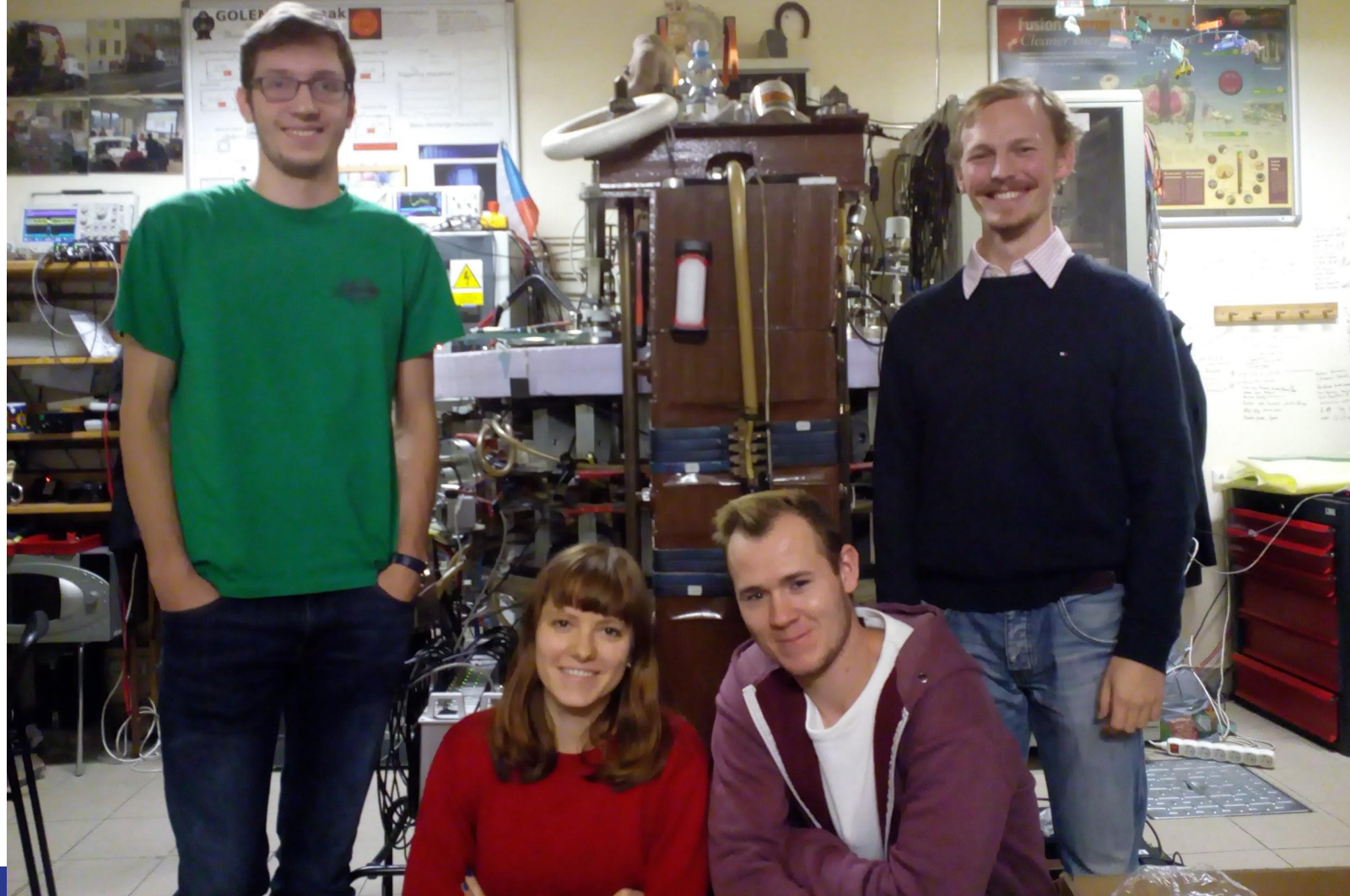


Časová závislost proudu



Co jsme si odnesli?

- průběžně kontrolovat data měření (alespoň odhadem)
 - psát si příště lépe měřící deník (Jak?)
 - **Nezpracovávat data na poslední chvíli**
 - kachnička (jinak to bude muset dělat někdo z vás)
 - nechat si zkontrolovat měřidla
- 



reference/citace - obrázky

obr 1: To do. In: *TOPHIDMGs* [online]. [cit. 2017-11-15]. Dostupné z:

<http://tophidmgs.com/453703-task.html>

obr2 : Plasma Koule *Energyfantastics.com* [online]. In: . [cit. 2017-11-15]. Dostupné z:

<http://energyfanatics.com/2015/05/08/plasma-power-limitless-source-clean-energy/>

obr 3: síla v poznání *LinkedIn* [online]. In: . [cit. 2017-11-15]. Dostupné z:

<https://www.linkedin.com/pulse/20140922135532-27855475-knowledge-is-power-in-customer-service>

obr 4: Graf závislosti separační energie [online]. [cit. 2017-11-08]. Dostupné z:

http://www.hvezdarnaplzen.cz/wp-content/uploads/2015/09/energie_na_nukleon.jpg

obr 5: Ilustrační obrázek [online]. [cit. 2017-11-08]. Dostupné z:

<http://www.observatory.cz/news-images/old/344-fuze.jpg>

obr 6: TOKAMAK *ITER* [online]. In: . [cit. 2017-11-15]. Dostupné z:

<https://www.iter.org/sci/tkmkresearch>

obr. 7: Fusion reactor. In: *Encyclopædia Britannica, Inc.* [online]. 1999 [cit. 2017-11-07]. Dostupné z:

<https://www.britannica.com/technology/fusion-reactor>

obr 8: ITER In: *21. století* [online]. 2016 [cit. 2017-11-07]. Dostupné z:

<http://21stoleti.cz/2016/12/22/uspesna-obhajoba-senzoru-pro-fuzni-reaktor-iter/>

reference/citace - obrázky

obr 8: GOLEM foto by [Sára]

obr. 9: Stacionární magnetické pole, *Reaserchgate* [online]. In: . [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/266594073_fig5_Figure-5-Simplified-scheme-of-a-Tokamak-and-the-loop-voltage-measurements

obr. 10: Rogowského pásek, *WAGO* [online]. In: . [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: <http://global.wago.com/en/products/product-catalog/interface-electronics/current-measurement/rogowski-coils-855-series/index.jspo>

obr 11: Zjednodušené schéma tokamaku, *Reaserch gate* [online]. In: . [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/266594073_fig5_Figure-5-Simplified-scheme-of-a-Tokamak-and-the-loop-voltage-measurements

obr. 12: Rogowského pásek, In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Rogowski_coil

obr. 13: Vnitřek Rogowského pásku, *Reaserch gate* [online]. In: . [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: http://www.encyclopedia-magnetica.com/doku.php/file/rogowski_coil_ends_magnetica.jpg

reference/citace - informace

Základní úloha. In: *GOLEM TOKAMAK* [online]. [cit. 2017-11-15]. Dostupné z:

<http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/Handling/CompAlgSystems4Golem/gnuplot/training/index>

KOTRÍK, Tomáš, Milan AFTANAS a Michael KOMM. Plazma: Termonukleární fúze. In: *Physics.mff.cuni.cz* [online]. [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/plazma/?p=6>

ŘÍPA, Milan, Vladimír WEIZETTL, Jan MLYNÁŘ a František ŽÁČEK. *Řízená termojaderná syntéza pro každého* [online]. Ústav fyziky plazmatu Akademie věd České republiky, Praha, 2005 [cit. 2017-11-15]. ISBN 80-902724-7-9. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/termojaderna-synteza.pdf>

ENTLER, Slavomír, Jan MLYNÁŘ a Václav DOSTÁL. TZB-info / Energetika / Elektroenergetika / Základy fúzní energetiky II. – Základní fyzika fúzních reaktorů Základy fúzní energetiky II. – Základní fyzika fúzních reaktorů. In: *Tzbinfo* [online]. 2016 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:

<http://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14538-zaklady-fuzni-energetiky-ii-zakladni-fyzika-fuznich-reaktoru>