

Breakdown studies

O. Čermák, E. Jelínková*, V. Juráš**

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1

ondra.cermak1@gmail.com, *jelinel3@fjfi.cvut.cz,

**jurasvoj@fjfi.cvut.cz

Abstrakt

Během našeho experimentu jsme se zabývali Breakdown studies. Vycházeli jsme z Paschenovy křivky. Pracovali jsme na studentském tokamaku Golem a snažili jsme se Paschenovu křivku potvrdit. Naměřili jsme hodnoty, které jsme následně zpracovali do tabulek a grafů a vyhodnotili.

1 Teoretický úvod

1.1 Elektrický výboj

Elektrický výboj je vedení elektrického proudu v plynech. Dělí se na samostatný a nesamostatný, ten zaniká ihned po odebrání ionizátoru (pouze ionizovaný plyn je vodivý). Samostatný výboj se udrží bez ionizátoru. Při samostatném výboji dochází k breakdownu, dochází k ionizaci nárazem a vzniká plazma. Hranice mezi těmito dvěma typy výbojů se nazývá zápalné napětí.

1.2 Friedrich Paschen

Louis Carl Heinrich Friedrich Paschen se narodil ve Schwerinu v roce 1865 a zemřel v Postupimi v roce 1947. Studoval na univerzitách v Štrasburku a Berlíně, kde se v roce 1925 stal čestným profesorem. Byl známý zejména díky své práci v oblasti elektrických výbojů. V roce 1908 poprvé pozoroval tzv. Paschenovu sérii (série spektrálních čar vodíku v infračervené oblasti). Pro nás však byla nejdůležitější jím ustanovená a dnes široce používaná Paschenova křivka.

1.3 Paschenova křivka

Vzdálenost elektrod ve výbojovém prostoru, tlak plynu a zápalné napětí plynu dává do souvislosti Paschenův zákon. Grafické znázornění Paschenova zákona je známo jako Paschenova křivka.

2 Termojaderná fúze

2.1 Princip termojaderné fúze

Termojaderná fúze je proces slučování lehkých jader, při němž vznikají jádra těžší. Během tohoto procesu se uvolňuje energie Q podle vztahu:

$$Q = mc^2$$

kde m značí hmotnostní úbytek před a po fúzi a c rychlost světla. Je to také energie potřebná k roztržení těchto nukleonů. Např. při fúzi 2 protonů se uvolní energie $Q = 28,3$ MeV. Pro úspěšnou fúzi se k sobě musejí nukleony dostat na dostatečně malou vzdálenost, aby přitažlivé jaderné síly převládly nad odpudivými silami elektromagnetickými - nukleony musejí překonat tzv. Coulombovskou bariéru. Ta činí pro 2 protony asi 0,4 MeV.

Nejefektivnějším způsobem jak toho dosáhnout je ohřát palivo na vysokou teplotu.

V praxi se pro fúzi používá deuterium nebo tritium, protože tato reakce vyžaduje relativně nízkou teplotu, 100 - 200 mil. Kelvinů. Při takto vysoké teplotě je potřeba zabránit veškerému kontaktu paliva s okolní hmotou. Toho se dosáhne v zařízení tokamak.

2.2 Fungování tokamaku

Tokamak (zkratka pro "Toroidní komora v magnetických cívkách") je zařízení fungující na principu termojaderné fúze, které udržuje fúzní palivo bez kontaktu se stěnami komory.

První tokamak byl sestaven v 50. letech Rusy Tammem a Sacharovem.

Tokamak se skládá z toroidní vakuové komory, ve které probíhá fúze. Cívky kolem komory generují toroidní magnetické pole, které udržuje plazma uprostřed. Podél komory jsou také poloidní cívky, které pomáhají plazma stabilizovat. Celá komora je navíc jediným sekundárním závitem transformátoru, takže se v komoře indukuje vysoký proud zahřívající palivo. Výsledné magnetické pole je tvaru šroubovice.

2.3 Tokamak GOLEM

Tokamak GOLEM je nejstarším a nejmenším provozovaným tokamakem na světě. Byl vyroben v 50. letech v bývalém Sovětském Svazu pod označením TM-1.

Roku 1975 byl darován tehdejšímu Československu a roku 1984 jej čekala rozsáhlá přestavba. Konečně roku 2006 byl darován Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské v Praze, kde slouží až dosud. Díky jeho sofistikovanému uživatelskému rozhraní je to první tokamak na světě, který je možno ovládat dálkově, díky čemuž se podílí na výuce studentů z celého světa.

3 Praktická část

3.1 Námi stanovený úkol

Naším úkolem bylo naučit se pracovat s tokamakem a provést vlastní výstřely. Tím jsme chtěli dokázat Paschenovu křivku.

3.2 Aparatura

K výstřelům jsme využívali školního tokamaku Golem, viz 2.3. Ke zpracování dat jsme využívali uživatelské rozhraní tokamaku.

3.3 Měření

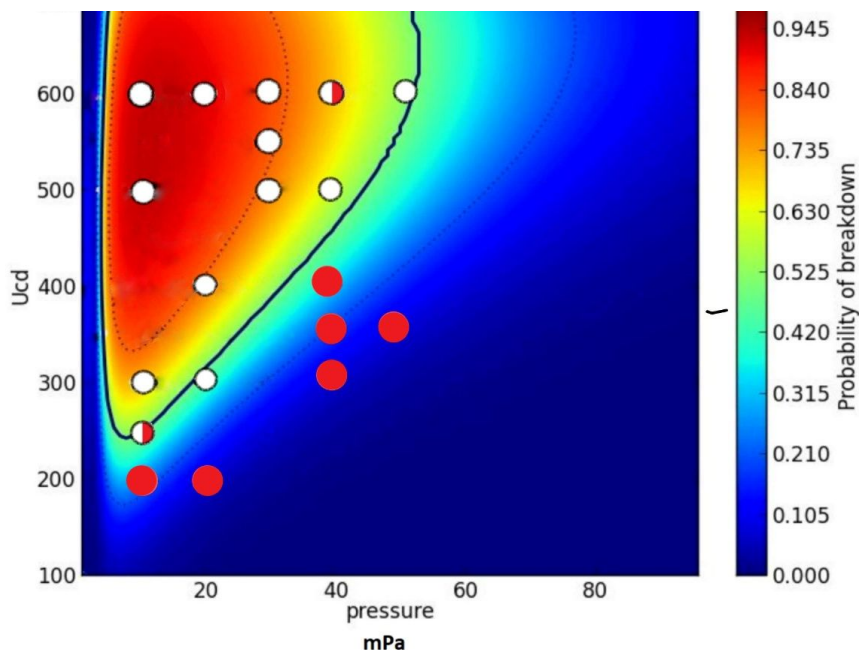
Měření jsme prováděli pomocí tokamaku Golem připojenému k počítači. Vždy jsme zadali požadované hodnoty a čekali, než proběhne výboj. Potom jsme analyzovali výstupní data a provedli další měření. Celkem jsme uskutečnili čtyřicet výstřelů. U všech výstřelů jsme měli konstantní toroidální napětí $U_B = 800$ V. Měnili jsme pouze tlak P a napětí na cívkách U_{cd} . Všechny výstřely byly provedeny s vodíkem a s preionizací.

4 Výsledky

Měření jsme vyhodnotili do následující tabulky Tab. 1. Tyto hodnoty jsme následně zobrazili v grafu na Obr. 1, kde graf zobrazuje pravděpodobnost vzniku výboje při různých hodnotách tlaku a napětí na cívkách.

P[mPa]	U _{cd} [V]	I[kA]	%		P[mPa]	U _{cd} [V]	I[kA]	%
15.63	600	1.87	93		33.58	500	2.16	73
15.03	500	1.54	93		6.55	250	1.5	64
5.97	600	2.26	80		22.64	500	2.75	89
28.47	600	1.8	87		35.5	600	2.95	79
36.34	550	1.29	75		29.86	600	2.85	86
31.6	600	1.58	84		10.56	200	--	41
26.99	600	1.72	88		21.44	300	0.43	51
21.27	600	2.12	92		39.15	500	0.97	61
16.81	600	2.42	93		15.55	250	1.02	51
10.44	600	2.55	91		20.96	300	1.01	52
10.52	500	2.12	93		73.44	350	--	0
10.63	400	1.63	90		99.36	600	--	3
10.32	450	1.86	92		41.1	350	--	14
10.56	350	1.33	86		12.37	200	--	37
11.31	300	1.07	76		130	400	--	0
10.12	300	1.08	78		0.28	600	--	7
10.56	250	0.31	63		168.3	500	--	0
10.6	300	1.69	77		136	600	--	0
12.38	400	2.37	90		14.87	600	--	0
19.76	600	3.67	92		154.7	600	--	0

Tab. 1: Hodnoty tlaku, napětí, proudu plazmatu a pravděpodobnost vzniku.



Obr. 1: Graf závislosti napětí na tlaku se škálou pravděpodobnosti - bílé body značí vznik plazmatu, červené že plazma nevzniklo

5 Shrnutí

Naměřené výsledky ve většině odpovídají předpokladu, tedy kdy byla pravděpodobnost vzniku plazmatu vysoká, tak plazma vzniklo, kdy byla pravděpodobnost pod 40% plazma nikdy nevzniklo. Při menší pravděpodobnosti vzniku byl proud plazmatu nižší než u téměř stoprocentních výstřelů. Nicméně na určení pravděpodobnosti bychom potřebovali řádově alespoň tisíce měření.

6 Poděkování

Poděkování patří ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. Jsme mu vděční za odborné rady a za poskytnutí tokamaku.

Reference

- [1] M. Odstrčil: *Breakdown studies*, <https://sites.google.com/site/gomtraic/list-of-tasks/breakdown-studies>
- [2] J. Mandula: *To what extent is it feasible to estimate the breakdown probability for a plasma discharge in the GOLEM tokamak using a machine learning algorithm trained using precedent discharge results?* <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/Students/HighSchools/JakubMandula/EEFF.pdf>
- [3] D. Mueller: *The Physics of Tokamak*, <https://www.osti.gov/servlets/purl/1057465>