

Základy řízení a diagnostiky na tokamaku GOLEM

S. Boula*; D. Dvořák*; A. Kufová**; D. Štěrbá***; M. Šípka****
Gymnázium Christiana Dopplera*, Praha; Gymnázium Mikuláše
Koperníka, Bílovec**; Mendelovo gymnázium, Opava***;
Gymnázium P.O.H. Kežmarok****

Abstrakt:

Tato práce je věnována výzkumu abnormálního jevu při pokusech s plazmatem v tokamaku GOLEM. Zaměřili jsme se na výzkum doposud neprobádaného jevu, který byl považován za anomálii neznámé příčiny. Podařilo se nám částečně identifikovat podmínky, při kterých jev vzniká a také objevit ještě výraznější variantu tohoto jevu.

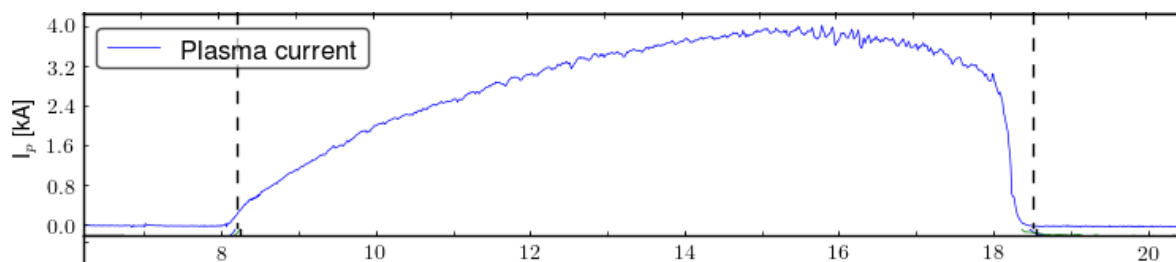
1. Úvod

Náš projekt obsahoval práci na tokamaku GOLEM, což je zařízení sloužící k vytváření a udržování vysokoteplotního plazmatu. Zabývali jsme se specifickým případem, kdy dochází k vícenásobným vzestupům proudu protékajícího plazmatem, kterýžto jev samovolně nastává ve zhruba 10 % všech experimentů na tokamaku, a to z doposud zcela neznámých příčin. Jedním z hlavních kroků vysvětlení příčiny je ustanovení podmínek, za kterých jev vzniká, čímž jsme se dále zabývali.

2. Experiment

Odlišné typy křivek

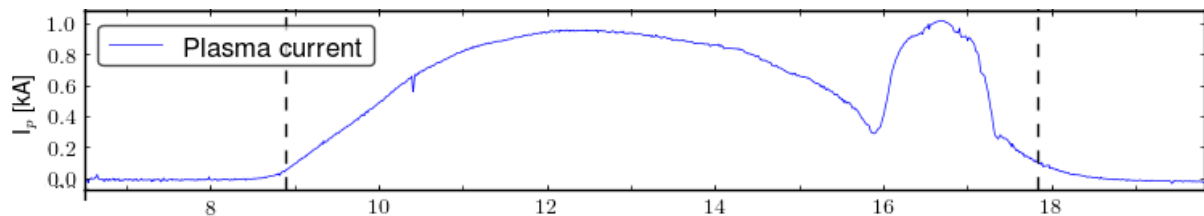
Výboj z tokamaku lze charakterizovat mj. křivkou závislosti velikosti proudu plazmatu na čase. Typicky vypadá následovně.



Obrázek 1: výboj na tokamaku č. 12563 ze dne 18. 6. 2013

Po ionizaci plynu a vzniku plazmatu začne systémem protékat proud, jehož hodnota neustále roste až v určitém čase dosáhne maxima (v zobrazeném případě 15,4 ms) a nadále pouze klesá až k momentu vyhoření plazmatu a zastavení průtoku proudu.

Takovýto průběh je charakteristický pro zhruba 90 % všech zdařilých experimentů. Nicméně, ve zbylých případech se často stává, že lze zaznamenat významné odchylky, a to dvojí či vícenásobný vzestup proudu, jak můžeme vidět na následujícím grafu.



Obrázek 2: výboj na tokamaku č. 12498 ze dne 17. 6. 2013

Na tento jev jsme se rozhodli zaměřit a nadále zkoumali podmínky, při kterých nastává, abychom byli schopni jej reprodukovat, případně poskytnout podklad k jeho možnému vysvětlení.

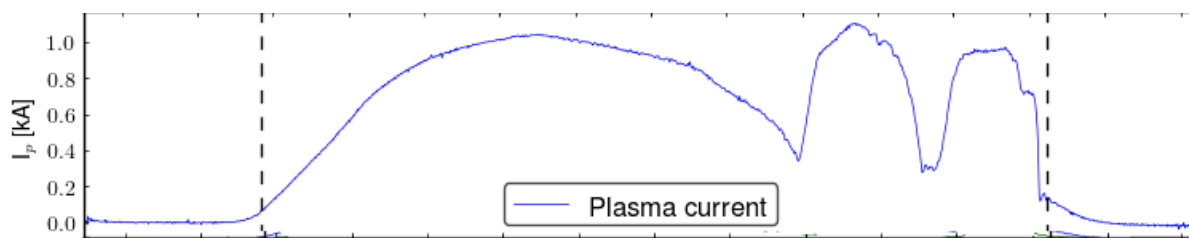
Výsledky

Při vytváření projektu jsme užili materiály z předešlých vystřelů z tokamaku GOLEM, ale taktéž jsme dostali možnost vytvářet vlastní experimenty na tomto přístroji. Z vykreslených křivek a daných podmínek jsme pak srovnávali experimenty, při kterých vícenásobný výstup vznikal častěji a při kterých naopak nevznikal vůbec. Každou ze závislých veličin (napětí na kondenzátorech představujících zdroj pro cívky vytvářející elektrické a magnetické pole, tlak ionizovaného plynu a časový posun mezi vznikem magnetického a elektrického pole) jsme jednotlivě označili za parametr, měnili jejich velikost a sledovali změny, které nastaly, a pravděpodobnost, při které daný jev vznikal.

Z počátku jsme vyloučili parametry, při kterých plazma vůbec nevzniká.

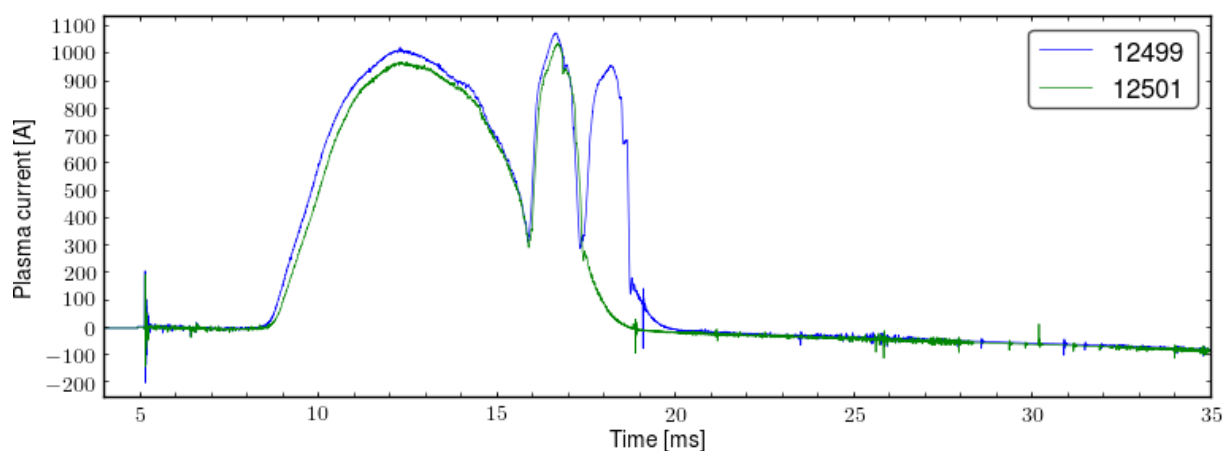
Následně jsme procházeli databázi předchozích měření a sledovali, za kterých parametrů nejčastěji dochází k onomu jevu. Díky tomu jsme došli k hypotéze, že jev nastává s velkou pravděpodobností tehdy, když poměr mezi napětími kondenzátorů pro mag. a el. pole je roven nebo se blíží 2:1 (pro podobné hodnoty obou napětí nenastává téměř nikdy). Experimentálně se podařilo potvrdit, že při takovýchto konfiguracích jev skutečně nastat může, nicméně pravděpodobnost jeho výskytu není natolik vysoká, aby bylo možno usuzovat, že právě tyto podmínky jsou pro vznik jevu ideální. Zkusili jsme tedy poměr zvyšovat. Při nízkém napětí kondenzátoru pro el. pole je velice nízká pravděpodobnost samotného průlomu, proto jsme se pohybovali převážně v hodnotách 300-500V. Spíše jsme se zaměřili na změny napětí pro magn. pole.

Za specifických podmínek (napětí pro magn. pole 1200-1400V, napětí pro el. pole 300-350V, tlaku 10 mPa) se nám dokonce podařilo objevit jev s trojitým vzestupem el. proudu v plazmatu. Tento jev nebyl ojedinělý, podařilo se nám ho několikanásobně reprodukovat i za mírných změn parametrů. Pro tento jev průběh el. proudu v plazmatu vypadá následovně.



Obrázek 3: výboj č. 12565 ze dne 18. 6 2013

Dále jsme se jali zkoumat závislost pravděpodobnosti výskytu jevu na dalších ovlivnitelném parametru, tlaku. V rámci našich experimentů jsme mj. pozorovali, že pro určitou kombinaci napětí na kondenzátorech se podařilo nalézt také i určité rozmezí tlaku, pro něž je pravděpodobnost výskytu vícenásobného vzestupu proudu maximální; pro výše zmíněný případ se toto pohybuje mezi 10 a 12 mPa, pro nižší, jakož i vyšší tlaky se již povedlo dosáhnout pouze vzestupu proudu dvojitého, případně průběhu zcela nezajímavého (tvaru podobného sinusoidě).



Obrázek 4: Porovnání proudu v plazmatu při výboji s jinak stejnými parametry, jen tlak byl odlišný o 2mPa

Z dat dále vyplynulo, že na časové prodlevě záleží pouze do té míry, aby se vůbec vytvořilo plazma, v případě že vzniklo tak se vícenásobný vzestup proudu odehrál při daných parametrech téměř vždy.

Dalším objevem byla změna jevu po vyčištění komory doutnavým výbojem, což je v podstatě výboj v plynu, zde ve vodíku, ale při vyšším tlaku. Za stejných parametrů nevznikl trojitý vzestup proudu, ale pouze dvojité. Pro vytvoření trojitého vzestupu bylo potřebné zvýšit napětí na kondenzátoru pro magn. pole.

Vypozorovali jsme, že u dvojitého a trojitého vzestupu proudu byl celkový průběh přibližně o 1 ms délejší. Na druhou stranu ale byla maximální dosažená hodnota proudu nižší. Celkový náboj, který prošel, byl ale přesto větší.

3. Závěr

Po provedení měření jsme se rozhodli ustanovit tyto čtyři parametry, které ovlivňují tvar křivky, a popsat jakou mírou. Jedná se především o napětí na kondenzátorech. Ke kondenzátoru z obvodu pro vytváření elektrického pole lze říci, že jako optimální se nám při pokusech jevíly hodnoty mezi 300 a 500V, pro hodnoty nižší je již pravděpodobnost průlomu příliš nízká na to, aby toto nastavení bylo vhodné k našim experimentům. Pro kondenzátory z obvodu tvořícího magnetické pole jsme pak shledali vhodnými především hodnoty od 1000V výše, ačkoli pozorování jevu je možné i za jiných podmínek. Dalším významnou proměnou je tlak vodíku v komoře tokamaku. Pro některé kombinace hodnot napětí jsme totiž našli interval tlaků takový, že právě pro byla pravděpodobnost výskytu vícenásobného vzestupu proudu maximální, ostatní vyšší i nižší tlaky pak takovou vlastností již nedisponovalí. Co se časové prodlevy, posledního volitelného parametru výboje, týče, nabyli jsme dojmu, že nesehrává klíčovou roli, neboť ani při jejích významných změnách jsme na výsledném průběhu výboje nepozorovali žádných abnormalit. Provedli jsme také několika pokusů po vyčištění komory doutnavým výbojem. V těchto nových podmínkách jsme již ovšem při zachování ostatních parametrů trojitý výboj až na výjimky nepozorovali, můžeme tedy soudit, že i čistota komory je v našem experimentu relevantním parametrem.

REFERENCE

[1] [online]. [cit. 2013-06-18]. Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/> (o tokamaku GOLEM)