

# Odhad velikosti elektrických polí a potenciálů polí v blízkosti antén pro iontový cyklotronní ohřev tokamaku ASDEX Upgrade

A. Křivská

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra telekomunikační techniky, Česká republika

## 1. Úvod do problematiky

Vývoj lidstva je spontánní přirozený proces. Součástí tohoto vývoje je i pokrok vědy a techniky, který přináší lidstvu poznatky důležité pro jeho přežití. Dostupnost energie hraje v tomto procesu klíčovou roli. V současné době energetická spotřeba lidstva neustále stoupá díky růstu počtu obyvatel a zvyšující se životní úrovni. Ceny energie a paliv mají tendenci růst, a to nejen v důsledku zvyšující se poptávky. Množství zásob dostupných surovin lze těžko odhadnout a navíc jejich těžba mnohdy zatěžuje životní prostředí. Existuje nějaká možnost, jak získat prakticky nevyčerpatelný zdroj energie, přátelský k životnímu prostředí?

Pokud se rozhodneme hledat inspiraci v blízkém vesmíru zjistíme, že zdrojem energie Slunce a dalších hvězd jsou termojaderné fúzní reakce. V jádru Slunce při teplotách okolo 10-15 miliard °C a za silné gravitace dochází ke slučování lehkých jader vodíku za vzniku těžšího jádra helia. Zároveň dochází k uvolnění velkého množství energie. Zisk energie pomocí fúze jader lehkých prvků je velmi slibným zdrojem energie budoucnosti pro lidstvo. V pozemských podmínkách může nejnázve probíhat reakce mezi jádry dvou těžších forem vodíku, deuteria D a tritia T:



Pokud má termojaderná reakce vyprodukovat více energie, než je jí spotřebováno na spuštění a udržení této reakce, je třeba dosáhnout určité hustoty paliva (ve formě plazmatu)  $n$  a jeho teploty  $T$ , respektive doby udržení jeho energie  $\tau_E$ . Pro fúzi deuteria s tritiem při teplotě 200 miliard °C platí:

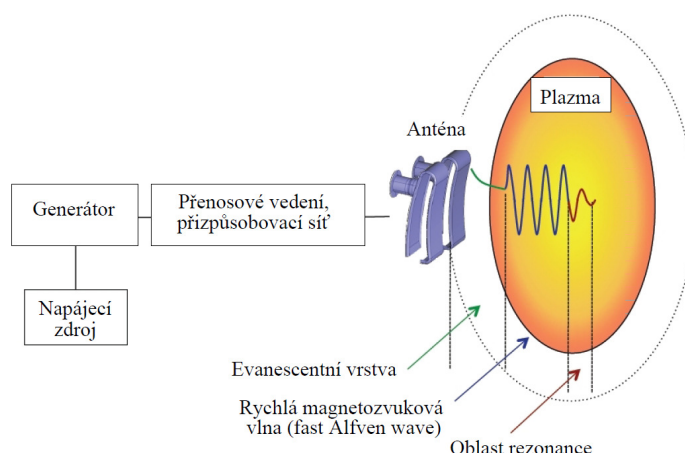
$$n \cdot \tau_E \geq 0,5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}.$$

Nespornou výhodou termojaderné fúze je dostupnost paliva. Deuterium lze získávat například z mořské vody a tritium by se mohlo přímo tvořit v reaktoru reakcí neutronů (produktů termojaderné reakce) s lithiem v tzv. plodícím obalu, který by obklopoval první (ve směru od plazmatu) stěnu vakuové komory reaktoru.

Nejúspěšnějším zařízením sloužícím ke zkoumání termojaderné fúze v pozemských podmínkách jsou vakuové nádoby ve tvaru prstence nazývané tokamaky. V nich je plazma (ionizovaný plyn) izolováno silným magnetickým polem šroubovicové konfigurace.

## 2. Ohřev plazmatu na iontové cyklotronní frekvenci

Jedním ze způsobu dosažení termojaderných teplot je neinduktivní ohřev plazmatu vlnami s frekvencemi v oblasti iontové cyklotronní rezonance 10–120 MHz. Při této metodě se vybudí vlny v blízkosti okraje plazmatu (obr. 2). Vlny pak přenesou energii do středu plazmatu, kde je absorbována ionty, které přirozeně rotují kolem siločar udržujícího magnetického pole. Následuje proces termalizace, kdy je dosažena tepelná rovnováha vzájemnou interakcí částic.



Obr. 1: Princip ohřevu rychlou magnetozvukovou vlnou

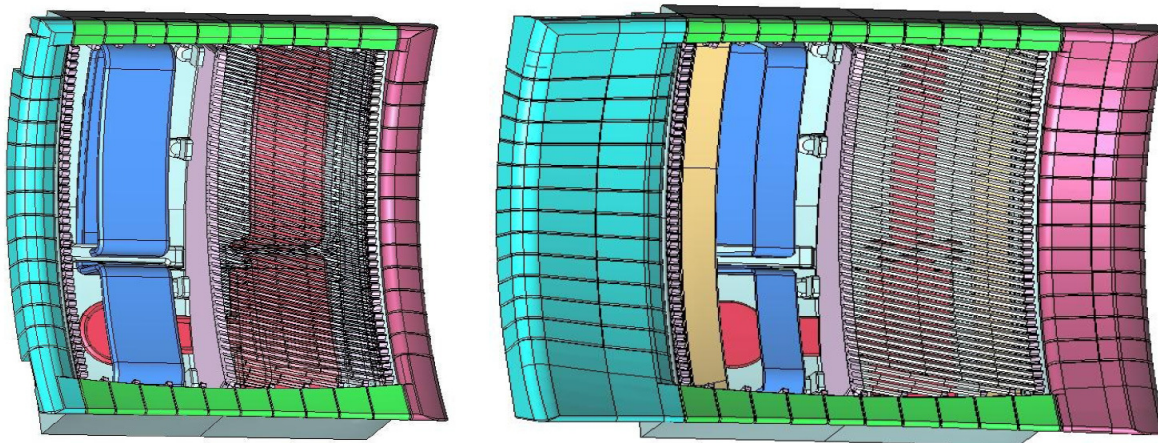
Mezi problémy spojené s užitím této metody při vyzařování velkých výkonů (v řádu jednotek MW), je

nárůst nečistot v plazmatu, pocházejících ze stěn komory tokamaku. Zřejmě díky přítomnosti lokálních a velmi intenzivních vysokofrekvenčních (vf) polí v blízkosti antény dochází k interakci plazmatu s materiálem stěn [1, 2]. Tento proces lze zjednodušeně popsat následujícím způsobem. Při činnosti antény dochází v jejích pasivních částech k indukci vf proudů, které vedou ke vzniku velmi intenzivních paralelních elektrických polí  $E_{||}$ , paralelních vzhledem k statickému magnetickému poli tokamaku  $B_T$ , v bezprostřední blízkosti antény. Tyto intenzivní vf pole  $E_{||}$  následně urychlují částice před anténou podél siločar  $B_T$ . Elektrony, které jsou lehčí a rychlejší než ionty, sledují tyto siločary a v místě, kde siločary protínají stěny komory, jsou odvedeny pryč z plazmatu. Ztráta elektronů vede ke zvýšení potenciálu plazmatu. Tento zvýšený (již usměrněný) potenciál pak urychluje těžší ionty, které následně opět sledují siločary  $B_T$  a narážejí na stěnu komory a vyrážejí z ní atomy, které plazma znečišťují.

Pokud jsou stěny komory tokamaku obloženy prvkem s nízkým atomovým číslem, jako je například berylium nebo uhlík, nepředstavují nečistoty do určité míry závažný problém. Obsahují-li ale prvky s vyšším atomovým číslem (např. wolfram), pak tyto těžké atomy putují do centra plazmatu, kde silně vyzařují a způsobují tím ochlazení a ztrátu energie plazmatu.

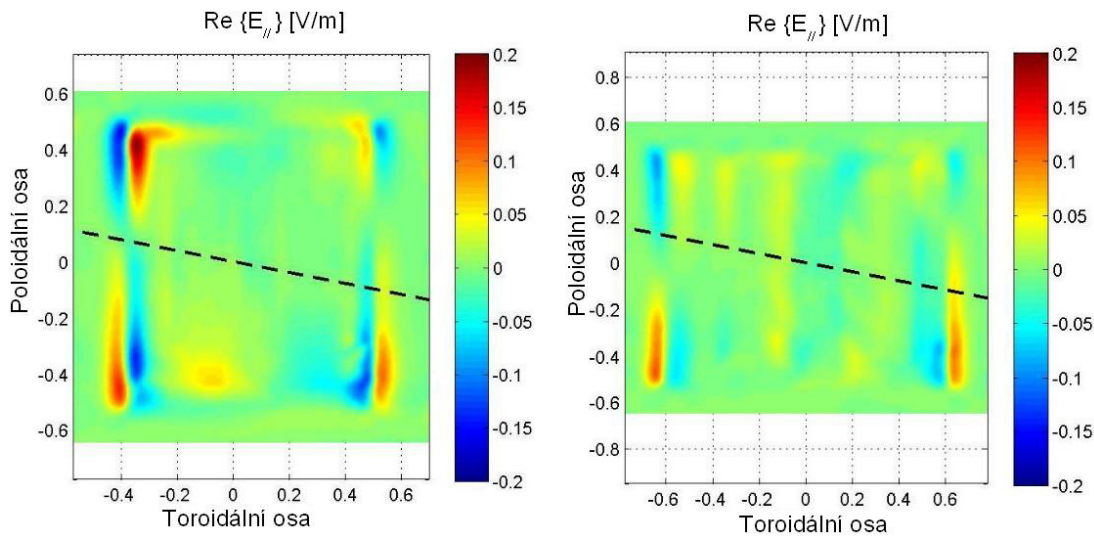
### 3. Simulace antény pro iontově cyklotronní ohřev v programu TOPICA

Numerické simulace pomáhají odhadnout chování antén a dále hrají nezastupitelnou roli v jejich následné optimalizaci za účelem snížení produkce nečistot a zvětšení vyváženého výkonu do plazmatu. TOPICA (Torino Polytechnic Ion Cyclotron Antenna) [3] je v současné době jediný program, v němž je možno simulovat detailní model antény, která vyzařuje výkon do plazmatu s nastavitelným profilem teploty a hustoty. Pomocí tohoto programu je možno odhadnout v blízkosti antén velikost vf  $E_{||}$  a vf potenciálů podél magnetických siločar ( $V_{RF} = \int E_{||} dl$ ), které stojí zřejmě na začátku procesu produkce nečistot. V tomto příspěvku jsem se zaměřila na odhad těchto veličin v přítomnosti plazmatu u dvou antén pro iontový cyklotronní ohřev tokamaku ASDEX Upgrade. Tyto antény se liší v tom, že jedna z nich byla částečně optimalizovaná v programu HFSS [4], který ovšem neumožňuje zahrnout do simulací vlastnosti plazmatu. Obě antény (obr.3) tvoří dva paralelně umístěné zářiče – smyčky, které jsou oddělené přepážkou. Součástí antén je i tzv. Faradayova mřížka, která zajišťuje správnou polarizaci záření. Dále jsou antény vybaveny speciálními rámci – limity, které je chrání před přímým kontaktem s plazmatem.

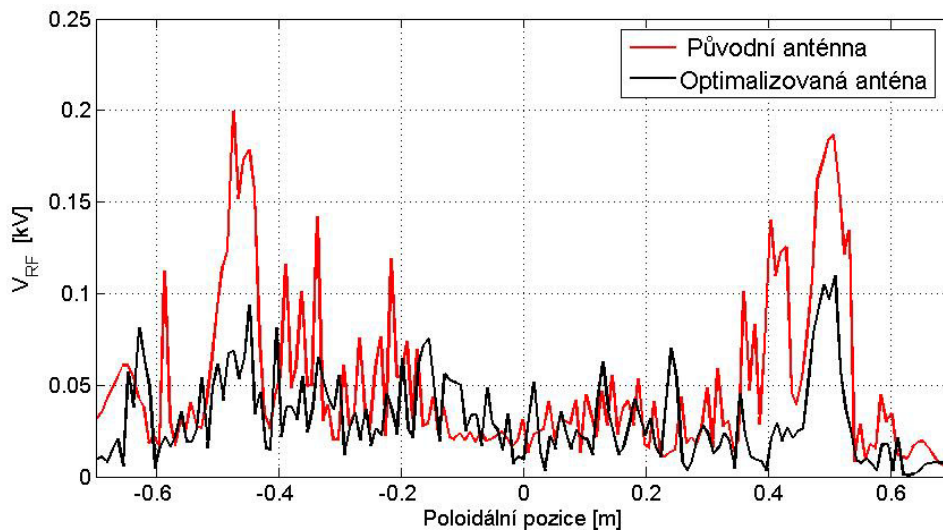


Obr. 2: Původní anténa (vlevo) a částečně optimalizovaná anténa (vpravo) s širšími asymetrickými limity a užšími radiačními smyčkami.

Simulace jsou provedeny pro frekvenci  $f = 30$  MHz, fázování  $(0, \pi)$  a centrální  $B_T = 2$  T. Okraj plazmatu je umístěn 5 mm od limiterů antén. Vf paralelní elektrická pole  $E_{||}$  a vf potenciály  $V_{RF}$  jsou počítány ve vakuu na ploše ve vzdálenosti 3 mm od limiterů. Z obr. 3 je patrné, že maximální hodnoty  $E_{||}$  se nacházejí v blízkosti rohů limiterů (obr. 3). Pro částečně optimalizovanou anténu jsou tyto hodnoty převážně nižší. Integrací  $E_{||}$  podél siločar  $B_T$  před anténou získáme velikost vf potenciálů  $V_{RF}$  na jednotlivých siločarách. Na obr. 4 jsou znázorněny hodnoty  $V_{RF}$  v závislosti na poloidální pozici. Nejvyšší hodnoty vf potenciálů se nacházejí na siločarách magnetického pole v horní a dolní části antén. Pro částečně optimalizovanou anténu jsou maximální hodnoty zhruba 1,8 krát nižší. Z toho vyplývá, že při činnosti částečně optimalizované antény by se měla produkce nečistot snížit, pokud je určena velikostí  $E_{||}$  a  $V_{RF}$ . Předběžná experimentální měření snížení produkce nečistot nasvědčují, nicméně je třeba tuto informaci potvrdit dalšími experimenty.



Obr. 3:  $Re\{E_{||}\}$  spočítané pro vstupní napětí 1V pro původní anténou (vlevo) a částečně optimalizovanou anténou (vpravo). Čárkovaná linka značí směr statického magnetického pole tokamaku.



Obr. 4: Vf potenciály  $V_{RF}$  spočítané (podél siločar magnetického pole tokamaku) pro 1MW vyvážaného výkonu do plazmatu pro původní anténou (vlevo) a částečně optimalizovanou anténou (vpravo).

#### 4. Závěr

Neinduktivní ohřev plazmatu v oblasti iontové cyklotronní rezonance je důležitou metodou pro dosažení teplot potřebných pro zapálení termojaderné fúze. Díky přítomnosti velmi intenzivních lokálních vf polí v blízkosti antény dochází k interakci plazmatu s materiálem stěn tokamaku. Vhodným návrhem antény je třeba tuto interakci minimalizovat. Numerické simulace pomáhají do určité míry odhadnout chování antén v procesu optimalizace. Z výsledků plazma zahrnujících simulací antén pro iontově cyklotronní ohřev tokamaku ASDEX Upgrade vyplývá existence zvýšených vf potenciálů v blízkosti antén, zejména v jejich horní a dolní části. Hodnoty vf potenciálů jsou nižší pro částečně optimalizovanou anténu. Potvrdil se tak trend, který vyplývá z výsledků simulací s dielektrickou zátěží v programu HFSS.

Použitá literatura:

- [1] Vl. Bobkov et al., Nuclear Fusion 50, p. 035004 (2010)
- [2] Colas L. et al 2005 Nucl. Fusion 45 767
- [3] V. Lancellotti et al., Nuclear Fusion 46 476–499 (2006)
- [4] HFSS (High Frequency Structure Simulator), <http://www.ansys.com>