

Ekonomika fúzní energetiky

Economy of Fusion Energy



Slavomír Entler
Ústav fyziky plazmatu
Akademie věd ČR



Tomáš Dlouhý
Ústav energetiky
Fakulty strojní ČVUT



Václav Dostál
Ústav energetiky
Fakulty strojní ČVUT



Jan Horáček
Ústavu fyziky plazmatu
Akademie věd ČR

ABSTRAKT: V uplynulých letech byla zahájena koncepční příprava prvních fúzních elektráren s cílem zprovoznit je do roku 2050. Jaderná fúze nabízí ve srovnání s využívanými energetickými zdroji řadu předností. Počáteční období fúzní energetiky však bude charakteristické vysokými investičními náklady. Tyto náklady budou vyváženy průmyslovou výrobou elektrické energie bez negativních dopadů na životní prostředí. Ex-ante porovnání jaderné fúze s jinými energetickými zdroji ukazuje konkurenceschopnost fúzní energetiky a potenciál stát se v budoucnu významným energetickým zdrojem.

KLÍČOVÁ SLOVA: jaderná fúze, fúzní energetika, ekonomika fúzních elektráren, LCOE, TCOE, externí náklady, zelená energie

ABSTRACT: Conceptual design activities of the first fusion power plants were launched in recent years with a view to putting them into operation by 2050. Nuclear fusion offers significant benefits in comparison with exploited energy sources. The initial period of the fusion energy will feature high investment costs. These costs will be balanced by the industrial production of electricity without negative impact on the environment. Ex-ante comparison of nuclear fusion with other energy sources shows the competitiveness of fusion power and the potential to become a major energy source in the future.

KEYWORDS: nuclear fusion, fusion power engineering, economics of fusion power plants, LCOE, TCOE, external costs, green energy

Jaderná fúze

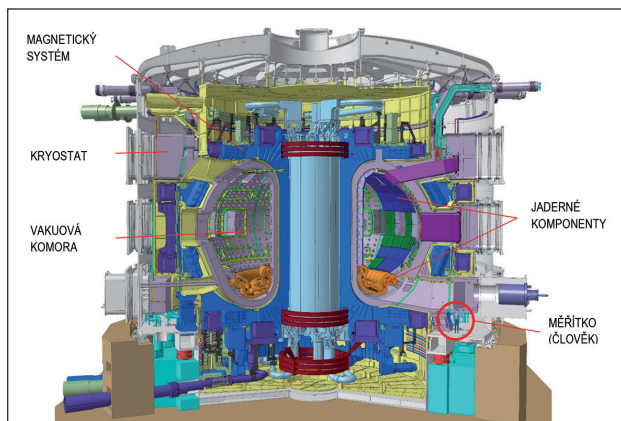
V uplynulých letech postoupil evropský výzkum jaderné fúze do důležité fáze. V roce 2014 byla zahájena koncepční příprava demonstrační fúzní elektrárny se záměrem zahájit výrobu elektrické energie jadernou fúzí do roku 2050 [1]. Při jaderné fúzi se slučováním jader lehkých atomů uvolňuje jaderná energie podobně jako při štěpení atomových jader těžkých atomů v současných jaderných elektrárnách. Průběh fúzní jaderné reakce je však zcela odlišný a fúzní reaktory přinesou do jaderné energetiky klíčový prvek – inherentní jadernou bezpečnost. Pozemské zásoby fúzního paliva jsou navíc prakticky nevyčerpatelné a při výrobě elektrické energie nevzniká vyhořelé palivo, ale malé množství inertního plynu helia [2].

Fúzní elektrárna budoucnosti o elektrickém výkonu Jaderné elektrárny Temelín spotřebuje méně než 2 kg vodíkových izotopů za den, které získá separací ze zhruba 60 m³ vody. Fúzní reakcí přitom vznikne přibližně 1,2 kg

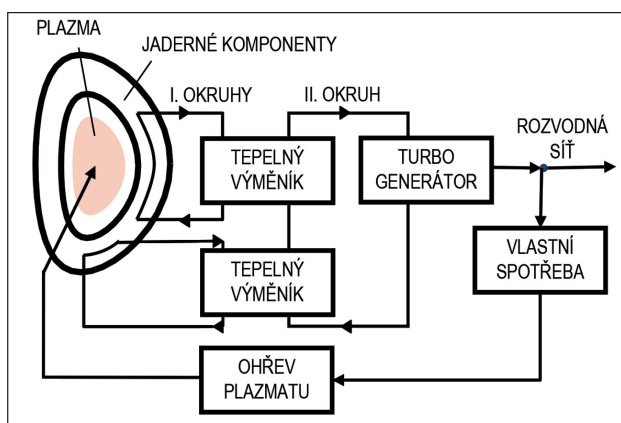
helium, které bude využito pro vnitřní potřebu technologií elektrárny.

Možnost uvolňování energie při řízené jaderné fúzi byla prokázána v 90. letech minulého století, kdy americký reaktor TFTR dosáhl fúzního výkonu 10,7 MW a evropský reaktor JET fúzního výkonu 16 MW. Technickou realizovatelnost energetického využití jaderné fúze bude demonstrovat mezinárodní fúzní reaktor ITER (**obr. 1**), který bude uveden do provozu v roce 2025 a v roce 2036 dosáhne fúzního výkonu 500 MW.

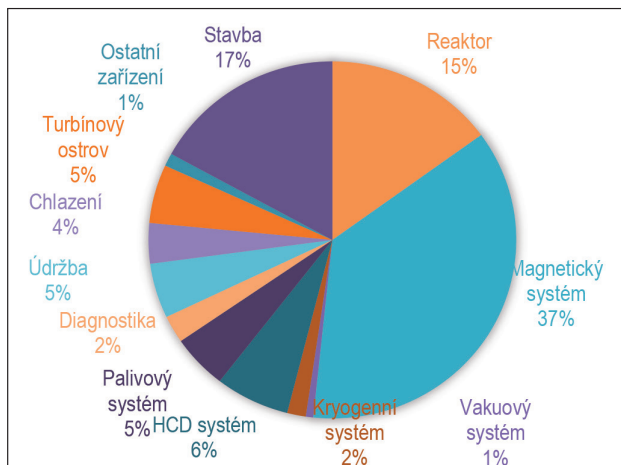
Hlavní rozdílem mezi fúzními a jadernými elektrárnami bude jiný typ jaderného reaktoru vyžadující jiné podpůrné technologie. Ačkoliv pravidla pro provoz fúzních reaktorů budou zcela odlišná od pravidel provozu štěpných reaktorů, systémově půjde v obou případech o jaderný ostrov se stanovenými provozními pravidly. Pomineme-li odlišnou strukturu jaderného ostrova, zůstává několik charakteristických rysů, které budou specifické pro fúzní elektrárny, jako jsou vysoký



Obr. 1: Reaktor ITER



Obr. 2: Schéma fúzní elektrárny



Obr. 3: Skladba přímých nákladů fúzní elektrárny

energetický tok, recirkulace elektrického výkonu, nevyčerpatelné zásoby fúzního paliva nebo minimální vliv výroby elektrické energie na životní prostředí. Vysoký energetický tok složený z intenzivního neutronového a tepelného záření je v současnosti hlavní technologickou výzvou při vývoji fúzních energetických reaktorů [3].

Fúzní energetika

První fúzní elektrárny budou s vysokou pravděpodobností postaveny na bázi fúzních reaktorů typu tokamak.

Tab. 1: Vybrané parametry referenčního modelu fúzní elektrárny DEMO2

Fúzní výkon	3 255	MW
Tepelný výkon*	4 149	MW
Hrubý výkon	1 660	MW
Čistý elektrický výkon	953,1	MW
Příkon systému HCD**	483	MW
Vlastní spotřeba	224	MW
Využití instalovaného výkonu	75	%
Roční výroba elektrické energie	6,25	TWh

* Tepelný výkon zahrnuje fúzní výkon multiplikovaný při výrobě tritia a recirkulační výkon ohřevu plazmatu.

** HCD označuje systém ohřevu a generování elektrického proudu plazmatu.

Pro dosažení energetického zisku fúzního reaktoru je nutné ohřát fúzní palivo z vodíkových izotopů na teploty přesahující 100 milionů stupňů Celsia. Při takto vysokých teplotách se každá látka nachází ve stavu plně ionizovaného plazmatu. Kontakt horkého plazmatu s konstrukcí reaktoru bude bránit magnetické pole reaktoru. Vnitřní stěnu reaktoru vystavenou tepelnému a neutronovému záření plazmatu budou tvořit tzv. jaderné komponenty reaktoru [3].

Chlazením jaderných komponent bude uvolněná energie odváděna ven z reaktoru a použita k výrobě elektřiny. Fúzní elektrárny budou dvouokruhové s více primárními chladicími okruhy jednotlivých částí reaktoru (obr. 2). Pro výrobu elektrické energie se předpokládá využití osvědčené technologie turbínového ostrova tlakovodních jaderných elektráren PWR.

Investiční náklady na výstavbu fúzní elektrárny

Pro ex-ante analýzu technicko-ekonomické efektivity výroby elektrické energie ve fúzních elektrárnách byl použit evropský referenční model demonstrační fúzní elektrárny DEMO2 vydaný konsorciem fúzních laboratoří EUROfusion v roce 2015 [4]. Model byl sestaven v britském středisku pro fúzní energetiku CCFE v Culhamu a v současnosti představuje jeden z nejpřesnějších odhadů nákladů na výstavbu a provoz fúzních elektráren. Vybrané parametry modelu jsou shrnuty v tab. 1. Model zahrnuje náklady na realizaci jednotlivých technologií elektrárny v průběžně aktualizovaných měrných cenách. Náklady na fúzní technologie tvoří přibližně 75% celkových přímých nákladů na výstavbu elektrárny a odrážejí nedostatečné know-how a související rizika při jejich výrobě a zprovoznování. Investiční náklady modelu DEMO2 v cenách roku 2015 jsou shrnuty v tab. 2. Skladba přímých nákladů je zobrazena na obr. 3. Uvedené náklady nezahrnují cenu peněz (jde o tzv. overnight costs). Na rozdíl od probíhajícího projektu ITER model nezahrnuje náklady na vývoj jednotlivých fúzních technologií ani náklady související s komplikovanou mezinárodní participací při realizaci projektu formou in-kind dodávek, a proto jsou celkové investiční náklady v porovnání s projektem ITER přibližně poloviční.

Tab. 2: Investiční náklady referenčního modelu DEMO2

Reaktor	862	M\$
Magnetický systém	2 216	M\$
Vakuový systém	39	M\$
Kryogenní systém	99	M\$
Palivový systém	298	M\$
HCD systém	439	M\$
Chlazení	221	M\$
Diagnostika	150	M\$
Dálková údržba	300	M\$
Turbinový ostrov	321	M\$
Ostatní zařízení	71	M\$
Stavba	1 027	M\$
Přímé náklady	6 043	M\$
Nepřímé náklady	1 473	M\$
Rozpočtová rezerva	1 009	M\$
Investiční náklady	8 525	M\$

Výrobní náklady

Provozní náklady fúzních elektráren budou výrazně odlišné od provozních nákladů existujících elektráren. Mezi hlavní důvody patří vysoké průběžné náklady na výměnu jaderných komponent reaktoru a velmi nízká cena paliva.

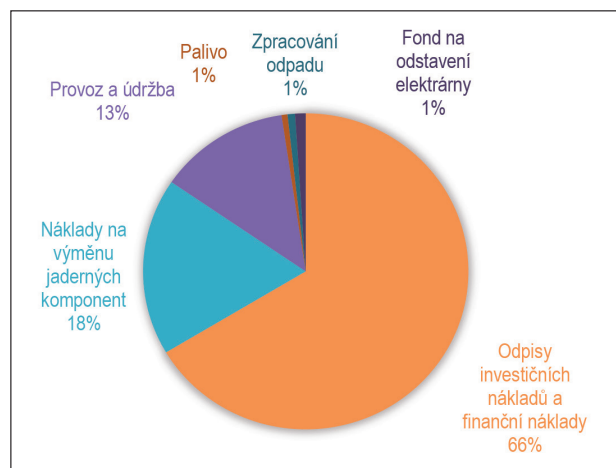
Tepelné a neutronové zatížení jaderných komponent bude natolik vysoké, že v současnosti nelze vyrobit jaderné komponenty s životností odpovídající životnosti elektrárny. Projektová životnost fúzní elektrárny DEMO2 je 40 let, zatímco projektová průměrná životnost jaderných komponent reaktoru je 4,5 až 10,5 roku. Protože zatížení a související opotřebení jaderných komponent nebude rovnoměrné, bude se výměna týkat pouze poškozených nebo mezně opotřebovaných modulů a náklady na výměnu komponent budou rozprostřeny po celou dobu provozu elektrárny.

V případě analyzovaného modelu dosáhnou průměrné roční náklady na výměnu jaderných komponent 85 M\$. Oproti tomu průměrné roční náklady na palivo nepřesáhnou 2,75 M\$. Ostatní provozní náklady budou srovnatelné s provozními náklady moderních jaderných elektráren.

Provozní náklady tvoří zhruba jednu třetinu celkových výrobních nákladů elektrárny. Výrobní náklady jsou majoritně ovlivněné vysokými odpisy investičních nákladů, jak ukazuje **obr. 4**. Protože podstatná část investičních i provozních nákladů souvisí s výrobou fúzních technologií, jako jsou jaderné komponenty nebo magnetický systém, budou výrobní náklady výrazně a efektivně klesat v závislosti na pokroku ve výzkumu a vývoji těchto technologií.

Analýza technicko-ekonomické efektivity

Analýzovanými kritérii technicko-ekonomické efektivity elektrárny DEMO2 byly čistá současná hodnota projektu, index ziskovosti, vnitřní výnosové procento,

**Obr. 4: Skladba výrobních nákladů referenčního modelu DEMO2**

dynamická doba návratnosti a střední měrná cena elektrické energie [5]. Čistá současná hodnota byla vy počtena podle rovnice:

$$NPV = \sum_{t=0}^{T_L-1} [(R_t - C_t - I_t - DP_t) \cdot (1 - T_t) + DP_t - IN_t] \cdot (1+r)^{-t} \quad (1),$$

kde t označuje běžný rok, T_L dobu ekonomické životnosti elektrárny, R roční výnosy, C roční provozní náklady, I finanční náklady na úvěr, DP odpisy, T sazbu daně z příjmu, IN roční investice a r reálnou diskontní sazbu. Rovnice implementuje daňový štít snižující efektivní úrokovou sazbu úvěru. Index ziskovosti PI vyjadřuje poměr výnosů projektu k počátečním investičním nákladům IN :

$$PI = \frac{\sum_{t=0}^{T_L-1} [(R_t - C_t - I_t - DP_t) \cdot (1 - T_t) + DP_t - IN_t] \cdot (1+r)^{-t}}{IN} \quad (2).$$

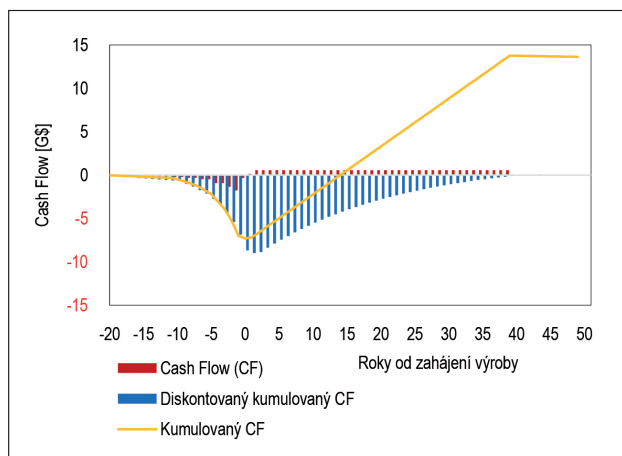
Střední měrná cena elektřiny LCOE (Levelized Cost of Electricity) zahrnuje náklady na výrobu elektřiny včetně investovaného kapitálu vztážené k celkově vyrobenému množství elektřiny za celou dobu životnosti elektrárny:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{T_L-1} (IN_t + C_t + I_t + E_t \cdot C_t^{EXT}) \cdot (1+r)^{-t}}{\sum_{t=0}^{T_L-1} E_t \cdot (1+r)^{-t}} \quad (3),$$

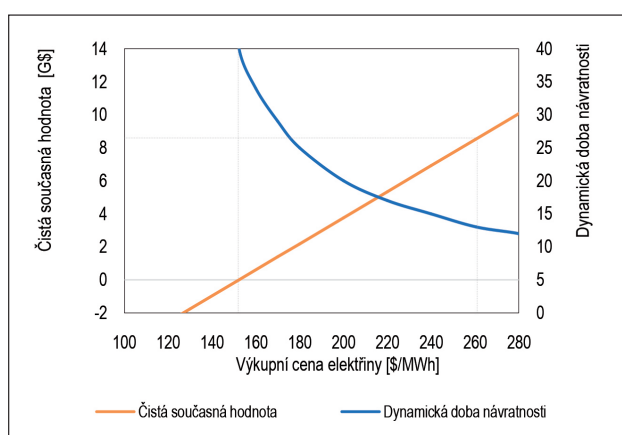
kde E označuje čistou roční výrobu elektřiny. Celková střední měrná cena elektřiny TCOE (Total Cost of Electricity) započítává k LCOE také externí náklady C^{EXT} související s výrobou:

$$TCOE = \frac{\sum_{t=0}^{T_L-1} (IN_t + C_t + I_t + E_t \cdot C_t^{EXT}) \cdot (1+r)^{-t}}{\sum_{t=0}^{T_L-1} E_t \cdot (1+r)^{-t}} \quad (4),$$

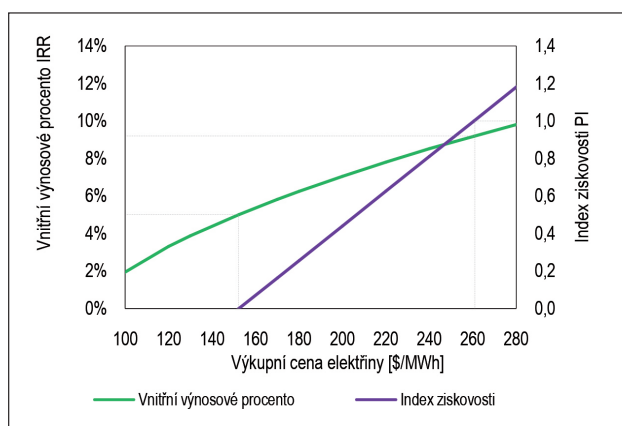
Analýza byla provedena ve stálých cenách roku 2015 s reálnou diskontní sazbou. Diskontní sazba byla



Obr. 5: Ilustrace vývoje cash-flow v mezním případě nulové ziskovosti projektu při výkupní ceně elektřiny 152 \$/MWh



Obr. 6: Vývoj čisté současné hodnoty a dynamické doby návratnosti v závislosti na výkupní ceně elektřiny



Obr. 7: Vývoj vnitřního výnosového procenta a indexu ziskovosti v závislosti na výkupní ceně elektřiny

zvolena ve výši 5 % na základě předpokladu, že míra rizikovosti bude snížena státní garancí díky politickému a společenskému významu projektu a na základě déletrvající situace na finančních trzích, kdy jsou úroky bezrizikových vkladů velmi nízké. S ohledem na analyzovaný model byl výpočet proveden v amerických

Tab. 3: Parametry technicko-ekonomické efektivity modelu DEMO2

Index ziskovosti	0,00	1,00
Čistá současná hodnota [G\$]	0,00	8,53
Vnitřní výnosové procento [%]	5,0	9,2
Dynamická doba návratnosti [roky]	40	13
Střední měrná cena elektřiny [\$/MWh]	133	133
Mezní výkupní cena elektřiny [\$/MWh]	152	261

Tab. 4: Technicko-ekonomická kritéria efektivity v závislosti na čisté účinnosti výroby elektřiny

Čistá účinnost elektrárny	23 %	30 %	33 %
Střední měrná cena elektřiny [\$/MWh]	133	105	96
Mezní výkupní cena elektřiny [\$/MWh]	152	119	110

dolarech. Míra inflace a obchodní kurzy měn pro přepočtení cen na cenovou úroveň roku 2015 byly čerpány z databáze Evropské centrální banky. Sazba daně z příjmu byla zvolena konzervativně podle německé efektivní sazby korporátní daně ve výši 31 %. Délka provozu elektrárny byla převzata z modelu v délce 40 let, fáze technické přípravy a fáze výstavby byly zvoleny desetileté stejně jako fáze likvidace elektrárny.

Vývoj cash-flow projektu v mezním případě nulové ziskovosti je zobrazen na obr. 5. Střední měrná cena elektřiny LCOE elektrárny DEMO2 byla zjištěna ve výši 133 \$/MWh a mezní výkupní cena elektrické energie ve výši 152 \$/MWh. Čistá současná hodnota projektu by dosáhla výše vstupních investic při výkupní ceně elektrické energie 261 \$/MWh. Vývoj kritérií technicko-ekonomické efektivity v závislosti na výkupní ceně elektrické energie je zobrazen na obr. 6 a 7. Výsledky analýzy jsou shrnuty v tab. 3.

Hlavní faktory

Analýza ukázala vysokou citlivost ekonomiky elektrárny na velikost investičních nákladů a na čistou účinnost výroby elektrické energie.

Nedostatečné průmyslové znalosti fúzních technologií a související rizika výraznou měrou ovlivní výši investičních nákladů projektu. Na základě postupně získaného know-how se však tyto náklady budou snižovat (tzv. learning factor). Obecně může toto snížení dosáhnout při výstavbě desáté elektrárny až 40 % [6], avšak investiční náklady fúzních elektráren s vysokým podílem nákladů na technologie poskytnou další prostor pro snižování nákladů na základě implementace nových výsledků vědy a výzkumu.

V případě fúzních elektráren nebude díky inherentní bezpečnosti fúzních reaktorů žádný důvod k růstu nákladů na zajištění jaderné bezpečnosti, ke kterému dochází v současnosti v jaderné energetice. Podobně nebude nutné ani zvyšování nákladů na ochranu životního prostředí, a proto bude trend vývoje investičních nákladů fúzních elektráren sestupný v návaznosti

na zdokonalování, optimalizaci a standardizaci fúzních technologií.

Vyšší čistá účinnost výroby zvýší množství vyrobené elektřiny bez nárůstu tepelného výkonu reaktoru a bez zkrácení životnosti jaderných komponent. Zvýšení čisté účinnosti z 23 % na 30 % by snížilo mezní výkupní cenu elektřiny o více než 21 % (**tab. 4**). Zvýšení účinnosti závisí především na snížení příkonu nutného pro ohřev plazmatu, které úzce souvisí s pokroky ve fyzice plazmatu a vývoji fúzních technologií.

Hodnocení technicko-ekonomické efektivity

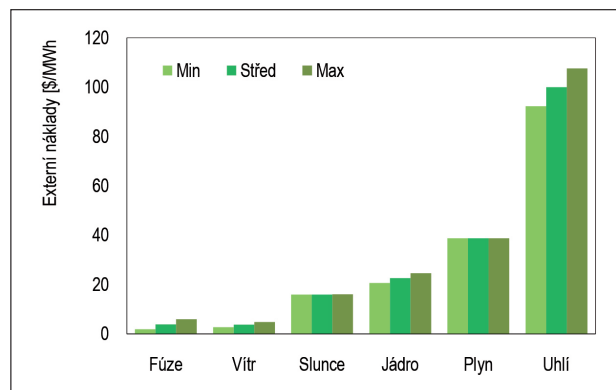
Zjištěná mezní výkupní cena elektrické energie ve výši 152 \$/MWh je několikanásobně vyšší než současná tržní cena elektřiny. Nerentabilita energetického projektu šetrného k životnímu prostředí bez veřejné podpory ale není v dnešní době ničím neobvyklým. Přebytečná elektřina z dotovaných obnovitelných zdrojů a dostatek fosilních paliv stlačují tržní cenu elektřiny na minimální hodnoty. Dotace a garantované výkupní ceny se obvykle týkají obnovitelných zdrojů, avšak objevují se i v souvislosti s novými jadernými bloky, jako například v případě výstavby jaderných elektráren ve Velké Británii nebo v ČR. Analyzovaná fúzní elektrárna by při současných cenách elektřiny na burze (~ 34 \$/MWh v roce 2015) byla rentabilní při dotaci 120 \$/MWh.

Potřebná dotace 118 \$/MWh je menší než dotace poskytované mořským větrným elektrárnám, které činily v EU v roce 2012 136 \$/MWh v cenách roku 2015, a je poloviční oproti dotacím poskytovaným ve stejném roce pro fotovoltaické elektrárny ve výši 249 \$/MWh v cenách roku 2015 [7]. Uvedené dotace obnovitelných zdrojů navíc nezahrnují náklady na udržování rozsáhlých zásokových fosilních zdrojů, které v případě fúzních elektráren nebudou nutné. V porovnání s těmito obnovitelnými zdroji budou fúzní elektrárny vyrábět elektrickou energii stejně čistě a ekologicky, avšak levněji.

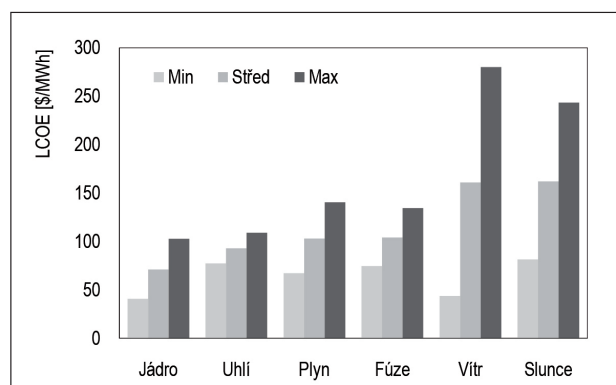
Externí náklady

Protože různé energetické zdroje různě ovlivňují životní prostředí, je nutné ocenit také externí náklady vznikající v souvislosti s činností těchto zdrojů. Externí náklady jsou definovány jako dopad chování ekonomického subjektu na blahobyt jiného subjektu, přičemž se tento dopad neodráží v penězích nebo tržních transakcích.

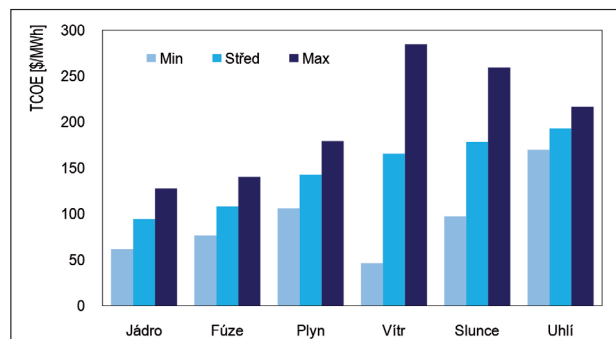
Použitá evropská metodika pro ocenění externích nákladů ExternE (External Costs of Energy) hodnotí tři hlavní kategorie dopadů energetiky: poškození lidského zdraví (zvýšení rizika úmrtí a nemocnosti), vliv na ekosystémy a biodiverzitu (změny v prostředí, úbytek biodiverzity) a vliv na zdroje a vyčerpání (především na vodu, kovy a paliva, ale také plodiny, budovy apod.). Dopady zahrnují změny klimatu, poškozování ozonové vrstvy, okyselení půdy, eutrofizace sladkovodního a mořského prostředí, zvyšování toxicity prostředí, zvyšování radiačního



Obr. 8: Externí náklady vybraných energetických zdrojů



Obr. 9: Střední měrná výrobní cena elektřiny LCOE



Obr. 10: Celková střední měrná výrobní cena elektřiny TCOE zahrnující externí náklady

pozadí, zábor zemědělské půdy, zábor plochy ve městech, transformace přírodní půdy, vyčerpávání vodních zdrojů, vyčerpávání nerostných nalezišť, vyčerpávání zdrojů energie a nehody a havárie [7].

Graf na **obr. 8** shrnuje externí náklady různých typů elektráren vyčíslené metodikou ExternE [7], [8]. Náklady jsou uvedeny v cenách roku 2015. Jaderná fúze bude vytvářet v průměru nejnižší externí náklady ze všech srovnávaných zdrojů.

Porovnání

Pro porovnání ekonomické efektivity různých typů elektráren byla použita data o středních měrných výrobních cenách LCOE při 7% diskontní sazbě

publikovaná OECD v roce 2015 [9] a data publikovaná evropskou agenturou EFDA [10]. Ceny byly přepočítány na cenovou úroveň roku 2015. Graf na **obr. 9**, vycházející z rozsáhlého souboru dat zemí OECD, ukazuje srovnatelné výrobní ceny elektřiny z jaderných a fosilních elektráren a významně vyšší výrobní ceny větrných a fotovoltaických elektráren. Z grafu mimo jiné vyplývá, že dříve zmíněná současná cena elektřiny na burze je pod výrobními náklady všech uvedených zdrojů, a dotace by tak obecně vyžadoval kterýkoliv z těchto zdrojů.

Započítáním externích nákladů se pořadí elektráren z hlediska výrobní ceny výrazně mění. Výsledný graf celkových středních měrných výrobních cen elektřiny TCOE zahrnujících externí náklady je zobrazen na **obr. 10** [7]–[10]. Dopady výroby elektřiny na životní prostředí zdražují fosilní elektrárny a naopak zvyšují fúzní elektrárny. Při započítání vlivu na životní prostředí budou fúzní elektrárny druhým ekonomicky nejefektivnějším energetickým zdrojem.

Závěr

Ekonomika fúzních elektráren bude důležitým faktorem rozvoje fúzní energetiky. Předpověď vývoj celosvětové ekonomiky a energetiky na několik desítek let dopředu je ale velmi obtížné. Reálný průběh integrace jaderné fúze do energetiky bude záviset na vědeckém a technologickém rozvoji celého energetického sektoru. Význam předložené analýzy je proto především v kvalitativním porovnání fúzních elektráren s dnes využívanými energetickými zdroji.

Technicko-ekonomická ex-ante analýza modelu fúzní elektrárny DEMO2 popsala hlavní ekonomická specifika budoucí fúzní energetiky. Skladba investičních a provozních nákladů fúzních elektráren bude výrazně odlišná od existujících elektráren a bude charakteristická rozhodujícím vlivem ceny nových fúzních technologií. To v počátečním období způsobí nekonkurenceschopnost fúzních elektráren, avšak vzhledem k minimální ceně paliva bude vytvořen velký prostor pro snižování investičních a provozních nákladů na základě technologického výzkumu a vývoje. Optimalizace a zdokonalování fúzních elektráren na dlouhou dobu úzce propojí energetiku s vývojem nových pokročilých technologií.

Analýzovaný model fúzní elektrárny DEMO2 byl při současných cenách elektřiny vyhodnocen jako nerentabilní a jeho realizace by si vyžádala dotaci výkupní ceny elektřiny, která by ale byla nižší, než je poskytována podpora větrných a fotovoltaických elektráren. Přitom by vysoce ekologická výroba elektrické energie probíhala bez výkyvů způsobených denní dobou, ročním obdobím nebo počasím a bez související nutnosti udržovat zásokové fosilní zdroje.

Vezmeme-li v úvahu prakticky nevyčerpatelné zásoby paliva, inherentní bezpečnost, velmi nízké externí

náklady na výrobu elektrické energie a konstantní vysoký energetický tok, fúzní elektrárny mají potenciál stát se významným energetickým zdrojem.



Poděkování:

Autoři děkují za cenné připomínky v recenzním řízení. Převzaté obrázky byly použity s laskavým svolením ITER Organization (www.iter.org). Aktivita byla podpořena strategií Akademie věd AV21 v rámci výzkumného programu „Systémy pro jadernou energetiku“.

Literatura:

- [1] F. Romanelli. *Fusion Electricity. A roadmap to the realization of fusion energy*. EFDA, 2012, dostupné na <https://www.euro-fusion.org/downloads/>.
- [2] S. Entler. *Fúzní palivo a obnovitelné zdroje*. *Energetika* 5 (2015), 249–252.
- [3] S. Entler, J. Mlynář, V. Dostál. *Základy fúzní energetiky IV. – Jaderné komponenty*. *TZB-info* 37 (2016), dostupné na <http://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14669-zaklady-fuzni-energetiky-iv-jaderné-komponenty>.
- [4] R. Kemp. *DEMO2 Reference Design May 2015*, EUROfusion IDM EU-D_2LCBVU, EUROfusion, 2015.
- [5] T. Dlouhý. *Projektování energetických zařízení*. Dostupné na http://energetika.cvut.cz/?en_projektovani-energetickych-zarizeni,128, 11. 7. 2017.
- [6] L. Argote et al. *Learning Curves in Manufacturing*. *Science* Vol 247 (1990) p 920.
- [7] S. Alberici, et al. *Subsidies and costs of EU energy*. Annex 3, EC 2015, tab a3-8.
- [8] G. Borrelli et al. *Socio-Economic Research on Fusion*. EFDA – RE – RE – 1, 2001.
- [9] *Projected Costs of Generating Electricity 2015 Edition, Executive Summary*, OECD IEA NEA, 2015.
- [10] D. Maisonnier et al. *A conceptual study of commercial fusion power plants. Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS)*, EFDA-RP-RE-5.0, 2005.

Ing. Slavomír Entler – pracuje v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR. Zabývá se vývojem diagnostických přístrojů pro fúzní reaktory a problematikou integrace fúzních reaktorů do energetiky.

doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc. – je zástupcem vedoucího Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze. Zabývá se problematikou tepelných soustav, podmínkami pro účinné spalování paliv a ekonomikou energetických zařízení.

doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D. – je garantem programu Jaderná energetická zařízení Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT. Zabývá se problematikou jaderných energetických zařízení s důrazem na termohydrauliku a bezpečnost jaderných reaktorů.

Mgr. Jan Horáček, Ph.D. – je fyzikem Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR. Zabývá se interakcí horkého plazmatu s konstrukčními materiály a popularizací jaderné fúze.

Recenze: **doc. RNDr. Jan Mlynář, RNDr. Vladimír Wagner, CSc.**