

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV ENERGETIKY



DISERTAČNÍ PRÁCE

ENERGETICKÉ VYUŽITÍ JADERNÉ FÚZE

ING. SLAVOMÍR ENTLER

DOKTORSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM
STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

STUDIJNÍ OBOR
ENERGETICKÉ STROJE A ZAŘÍZENÍ

ŠKOLITEL
DOC. ING. VÁCLAV DOSTÁL, PH.D.

ŠKOLITEL - SPECIALISTA
ING. IVAN ĎURAN, PH.D.



Anotační list

Jméno autora:	Slavomír Entler
Název práce:	Energetické využití jaderné fúze
Anglický název:	Energy utilization of nuclear fusion
Akademický rok:	2017 / 2018
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky / Energetika
Vedoucí práce:	doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.
Školitel specialista:	Ing. Ivan Ďuran, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 136 Počet tabulek: 18 Počet obrázků: 88 Počet příloh: 2
Klíčová slova:	Jaderná fúze, tokamak, jaderná bezpečnost, životní prostředí, Lawsonovo kritérium, recirkulace výkonu, Hallův senzor, ITER.
Keywords:	Nuclear fusion, tokamak, nuclear safety, environment, Lawson criterion, power recirculation, Hall sensor, ITER.
Anotace:	Podle plánu Evropské unie a dalších světových velmocí má být první fúzní elektrárna uvedena do provozu do roku 2050. Klíčovými rysy budoucí fúzní energetiky jsou palivo z lehkých chemických prvků, vysoká pracovní teplota paliva a vysoký energetický tok. Tyto rysy implikují nevyčerpatelné a globálně dostupné zásoby paliva, vysoce ekologickou bezemisní výrobu elektřiny, inherentní jadernou bezpečnost, recirkulaci výkonu ohřevu paliva, nízkou životnost jaderných komponent a vznik sekundárně aktivovaných radioaktivních odpadů. Vliv fúzních elektráren na životní prostředí bude srovnatelný s vlivem obnovitelných zdrojů energie a při započtení externích nákladů se fúzní elektrárny mohou stát jedním z ekonomicky nejvýhodnějších zdrojů energie. Specifickým rysem fúzní energetiky bude ohřev paliva na vysoké teploty a související recirkulace výkonu ohřevu snižující dopad ohřevu paliva na výstupní výkon elektráren. V práci jsou odvozeny analytické rovnice



popisující vliv ohřevu paliva na čistou účinnost výroby elektrické energie. Experimentální část práce popisuje vývoj prototypu radiačně a teplotně odolných Hallových senzorů pro fúzní energetické reaktory. Prototyp byl testován a následně schválen pro měření ustáleného magnetického pole mezinárodního fúzního reaktoru ITER.

Annotation:

According to the plan of the European Union and other world powers, the first fusion power plant should be put into operation by 2050. The key features of future fusion energy, the light chemical elements fuelling, high fuel temperature, and high heat and neutron loading of the fusion reactors, imply inexhaustible and globally available fuel reserves, high ecological emission-free electricity generation, inherent nuclear safety, heating power recirculation, low lifetime of nuclear components, and the generation of a secondary activated radioactive waste. The environmental impact of fusion power plants will be comparable to the impact of renewable resources and, with the inclusion of external costs, fusion power plants can become one of the most economically advantageous energy sources. A specific feature of fusion power plants will be a fuel heating to high temperatures and the power recirculation reducing the impact of the fuel heating on the output power of fusion power plants. Analytical equations describing the influence of the fuel heating including the recirculation on the net efficiency of power generation are derived. The experimental part describes the development of the prototype of radiation and temperature resistant Hall sensors for fusion power reactors. The prototype has been tested and subsequently approved for measuring a steady-state magnetic field of the ITER international fusion reactor.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně. Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu referencí.

V Praze dne 11.4.2018

Ing. Slavomír Entler



Poděkování

Autor děkuje Ústavu energetiky a dalším pracovištím FS ČVUT v Praze za vedení při plnění úkolů studia a Ústavu fyziky plazmatu AV ČR za vedení experimentální části práce a poskytnutí prostoru pro studium.

Práce byla částečně podpořena grantem Euratom 633053, projektem MŠMT 8D15001 a strategií Akademie věd AV21 v rámci výzkumného programu „Systémy pro jadernou energetiku“.

Autor děkuje ITER Organization, konsorciu EUROfusion, agentuře Fusion for Energy, Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, Centru výzkumu Řež a FOM-Rijnhuizen/ Verdult – Kennis za použití fotografií, ilustrací a dalších podkladů práce.



Obsah

Seznam tabulek.....	8
Seznam obrázků	9
Použité zkratky	12
Použitá označení	14
Kapitola 1 Aktuální stav přípravy energetického využití jaderné fúze.....	17
1.1 Úvod.....	18
1.2 Tokamaky.....	18
1.3 Jaderná zóna.....	20
1.4 Fusion Roadmap.....	22
1.5 Závěr	24
Kapitola 2 Cíle disertační práce a metoda jejich dosažení.....	26
2.1 Cíle disertační práce.....	27
2.2 Motivace.....	27
2.3 Metoda dosažení cílů.....	29
Kapitola 3 Charakteristické rysy fúzní energetiky	30
3.1 Úvod.....	31
3.2 Fúzní palivo z lehkých prvků.....	31
3.3 Vysoká teplota paliva.....	38
3.4 Vysoký energetický tok.....	40
3.5 Vliv na životní prostředí.....	48
3.6 Cena vyráběné elektřiny.....	49
3.7 Porovnání s existujícími elektrárnami.....	55
3.8 Validita výsledků	57
3.9 Závěr	58
Kapitola 4 Analýza energetické bilance budoucích fúzních elektráren	61
4.1 Úvod.....	62
4.2 Lawsonovo kritérium	62
4.3 Kritéria výkonové rovnováhy plazmatu.....	63
4.4 Kritérium inženýrské rovnováhy.....	66
4.5 Bezrozměrná formulace kritéria.....	68
4.6 Recirkulace výkonu.....	69
4.7 Účinnost recirkulace výkonu.....	70
4.8 Čistá účinnost fúzní elektrárny.....	71
4.9 Přínos recirkulace výkonu	75
4.10 Validace výpočtu čisté účinnosti.....	75
4.11 Kritéria 90% a 95% účinnosti	76
4.12 Závěr	79
Kapitola 5 Vývoj bismutových Hallových senzorů pro fúzní reaktor ITER.....	81
5.1 Úvod.....	82
5.2 Hallové senzory pro ITER	84
5.3 Hallův jev	84
5.4 Vývoj senzorů	87
5.5 Testovací sestavy	91
5.6 Vlastnosti senzorů	96
5.7 Hallův koeficient.....	100
5.8 Testy radiační odolnosti senzorů.....	102



5.9	Senzorové jednotky OVSS.....	103
5.10	Zpracování signálu.....	106
5.11	Kontroler.....	109
5.12	Třída přesnosti senzorové sestavy.....	112
5.13	Další úkoly.....	113
5.14	Závěr.....	115
Kapitola 6	Souhrn hlavních výsledků.....	117
Kapitola 7	Přínos disertační práce.....	121
Kapitola 8	Reference.....	124
8.1	Literatura.....	125
8.2	Publikace a vědecké zprávy.....	127
Kapitola 9	Přílohy.....	131
A.	Přehled vyrobených sérií Halloových senzorů.....	132
B.	Výkres finálních Halloových senzorů.....	135



Seznam tabulek

- Tab. 1.1 Základní parametry evropských referenčních modelů fúzní elektrárny DEMO.
- Tab. 3.1 Zásoby deuteria.
- Tab. 3.2 Zásoby lithia.
- Tab. 3.3 Spotřeba vody.
- Tab. 3.4 Produkce helia.
- Tab. 3.5 Varianty provedení divertorových terčů DEMO
- Tab. 3.6 Investiční náklady (overnight costs) referenčního modelu DEMO2.
- Tab. 3.7 Výrobní náklady referenčního modelu DEMO2 bez započítání ceny peněz.
- Tab. 3.8 Parametry technicko-ekonomické efektivity modelu DEMO2.
- Tab. 3.9 Technicko-ekonomická kritéria efektivity v závislosti na čisté účinnosti.
- Tab. 4.1 Validace odhadu vlivu recirkulace výkonu na čistou účinnost.
- Tab. 4.2 Pracovní a kritériální hodnoty zesílení Q modelů DEMO.
- Tab. 4.3 Sumarizace odvozených kritériálních rovnic.
- Tab. 5.1 Hallův koeficient vybraných polovodičů a kovů při pokojové teplotě.
- Tab. 5.2 Přístroje laboratorní měřicí sestavy.
- Tab. 5.3 Přístroje mobilní měřicí sestavy.
- Tab. 5.4 Vybrané parametry systému PPMS 14.
- Tab. 5.5 Mezní chyby měření.



Seznam obrázků

- Obr. 1.1 Základní schéma reaktoru typu tokamak.
- Obr. 1.2 Jaderné komponenty fúzního reaktoru.
- Obr. 1.3 Zjednodušené schéma fúzní elektrárny.
- Obr. 2.1 Klíčové specifické rysy fúzních elektráren.
- Obr. 2.2 Motivace vývoje kovových Hallových senzorů.
- Obr. 3.1 Primární specifické rysy fúzních zdrojů energie.
- Obr. 3.2 Zjednodušený strom kauzálních vztahů fúzního paliva z lehkých prvků.
- Obr. 3.3 Reaktorový komplex a jeho seismické izolátory.
- Obr. 3.3 Reaktorový komplex ITER.
- Obr. 3.4 Seismické izolátory reaktoru ITER.
- Obr. 3.5 Fúzní reaktivita reakcí DT a DD v závislosti na teplotě reaktantů.
- Obr. 3.6 Zjednodušený strom kauzálních vztahů vysoké teploty paliva.
- Obr. 3.7 Nezbytná sofistikovaná podpora fúzní reakce.
- Obr. 3.8 Zjednodušený strom kauzálních vztahů vysokého energetického toku.
- Obr. 3.9 Divertorový terč s wolframovým laminátem.
- Obr. 3.10 Divertorový terč s wolframovým kompozitem.
- Obr. 3.11 Divertorový terč z funkčně gradovaných materiálů W-Cu.
- Obr. 3.12 Divertorový terč s tepelnou bariérou z Cu-pěny.
- Obr. 3.13 Reaktorová sonda TW3 pro testování vzorků první stěny.
- Obr. 3.14 Model vakuové nádoby experimentálního komplexu HELCZA.
- Obr. 3.15 Vakuová nádoba a elektronové dělo experimentálního komplexu HELCZA.
- Obr. 3.16 Skladba přímých investičních nákladů referenčního modelu DEMO2.
- Obr. 3.17 Skladba výrobních nákladů referenčního modelu DEMO2.
- Obr. 3.18 Vývoj čisté současné hodnoty a dynamické doby návratnosti.
- Obr. 3.19 Vývoj vnitřního výnosového procenta a indexu ziskovosti.
- Obr. 3.20 Investiční náklady vybraných energetických zdrojů.
- Obr. 3.21 Porovnání střední měrné výrobní ceny elektřiny LCOE různých typů elektráren.
- Obr. 3.22 Externí náklady vybraných energetických zdrojů.
- Obr. 3.23 Porovnání celkové střední měrné výrobní ceny elektřiny TCOE.
- Obr. 4.1 Lawsonova kritéria a pracovní body ITER a modelových elektráren DEMO.
- Obr. 4.2 Schéma inženýrské rovnováhy fúzní elektrárny.



- Obr. 4.3 Závislost kritéria inženýrské rovnováhy na účinnosti recirkulace.
- Obr. 4.4 Inženýrské kritérium v Q formulaci v závislosti na účinnosti recirkulace.
- Obr. 4.5 Schéma recirkulace výkonu fúzní elektrárny.
- Obr. 4.6 Schéma recirkulace výkonu fúzní elektrárny s pulsním reaktorem.
- Obr. 4.7 Čistá účinnost elektrárny v závislosti na zesílení reaktoru Q .
- Obr. 4.8 Kritériální faktor Q_{90} pro různé hodnoty faktoru multiplikace M_R .
- Obr. 4.9 Kritéria a pracovní body modelů DEMO1 a DEMO2 z tab. 1.1 v závislosti na hrubé účinnosti výroby elektřiny.
- Obr. 4.10 Kritéria a pracovní body modelů DEMO v závislosti na účinnosti systému ohřevu.
- Obr. 4.11 Čistá účinnost elektrárny v závislosti na účinnosti systému ohřevu.
- Obr. 5.1 Tři sektory vakuové nádoby reaktoru ITER budou osazeny Hallovými senzory.
- Obr. 5.2 Schematický náčrt Hallova jevu.
- Obr. 5.3 Superpozice normálového a planárního Hallova napětí.
- Obr. 5.4 Schematický náčrt citlivé vrstvy Hallova senzoru.
- Obr. 5.5 Bismutový Hallův senzor 9,6 x 9,6 mm.
- Obr. 5.6 Zvětšenina povrchu deponovaného bismutu elektronovým mikroskopem.
- Obr. 5.7 Senzor 9,6 x 9,6 mm s kontaktními drátky přivařenými bondováním.
- Obr. 5.8 Miniaturizované série bismutových senzorů M1 až M4.
- Obr. 5.9 Finální design bismutových senzorů pro ITER.
- Obr. 5.10 Reálná velikost senzorů.
- Obr. 5.11 Výrobní fáze senzorů.
- Obr. 5.12 Distanční maska pro magnetronové naprašování 24 senzorů.
- Obr. 5.13 Laboratorní měřicí sestava.
- Obr. 5.14 Schéma laboratorní měřicí sestavy.
- Obr. 5.15 Schéma sítě VISA TCP/IP.
- Obr. 5.16 Mobilní měřicí sestava.
- Obr. 5.17 Schéma mobilní měřicí sestavy.
- Obr. 5.18 Měřicí supravodivý systém PPMS 14.
- Obr. 5.19 Schéma systému PPMS.
- Obr. 5.20 Schéma měřicí sestavy s permanentním magnetem.
- Obr. 5.21 Výstupní napětí senzoru v případě magnetického pole kolmého k ploše senzoru.



- Obr. 5.22 Výstupní napětí senzoru v případě maximálního planárního Hallova jevu.
- Obr. 5.23 Výstupní napětí senzoru při nízkém magnetickém poli.
- Obr. 5.24 Závislost citlivosti bismutových Hallových senzorů na teplotě senzoru.
- Obr. 5.25 Výstupní napětí senzoru v normálovém magnetickém poli při různých teplotách.
- Obr. 5.26 Závislost výstupního napětí senzoru na teplotě senzoru při měření konstantního normálového magnetického pole.
- Obr. 5.27 Závislost Hallova koeficientu na magnetickém poli při pokojové teplotě.
- Obr. 5.28 Závislost Hallova koeficientu na magnetickém poli při různých teplotách.
- Obr. 5.29 Závislost Hallova koeficientu na teplotě při různých magnetických polích.
- Obr. 5.30 Ozařovací ampule s Hallovými senzory v hliníkovém pouzdru.
- Obr. 5.31 Porovnání citlivosti bismutových Hallových senzorů před a po ozáření.
- Obr. 5.32 Sensorová jednotka OVSS.
- Obr. 5.33 Vnitřek sensorové jednotky.
- Obr. 5.34 Zkompletovaná sensorová jednotka.
- Obr. 5.35 Schéma propojení sensorové jednotky a kontrolerů.
- Obr. 5.36 Test cyklickým ohříváním a ochlazováním v rozsahu -200 až +200 °C.
- Obr. 5.37 Test kabelové svorky zatížením do 350 N.
- Obr. 5.38 Schéma propojení senzorů do systému sběru dat reaktoru ITER.
- Obr. 5.39 Princip synchronní detekce.
- Obr. 5.40 Schéma proudové rotace v náhradním schématu Hallova senzoru.
- Obr. 5.41 Srovnávací testy prototypů kontroleru.
- Obr. 5.42 Druhý prototyp kontroleru.
- Obr. 5.43 Potlačení offsetu a planárního Hallova napětí kontrolerem.
- Obr. 5.44 Chyba měření normálového magnetického pole vztažená k měřicímu rozsahu.
- Obr. 5.45 Relativní chyba měření magnetického pole permanentního magnetu.
- Obr. 5.46 Nový optimalizovaný design sensorové jednotky.
- Obr. 5.47 Řez sensorovou jednotkou v oblasti indiové kapsle.
- Obr. 5.48 Otevřená sensorová jednotka před uzavřením indiové kapsle.
- Obr. 5.49 Plata fázového přechodu india při experimentální simulaci vypékacího cyklu.



Použité zkratky

AC	Alternating Current.
AD	Analog to Digital.
CCF	Cumulated Cash-Flow.
CCFE	Culham Centre for Fusion Energy.
CD	Current Drive.
CEA	Le Commissariat à l'Énergie Atomique.
CF	Cash-Flow.
CFC	Carbon Fibre Composite.
CFD	Computational Fluid Dynamics.
CODAC	Control, Data Acquisition and Communication.
CPU	Central Processor Unit.
DA	Digital to Analog.
DBC	Direct Bonded Copper.
DC	Direct Current.
DD	Deuterium-Deuterium.
DDS	Direct Digital Synthesis.
DEMO	Demonstrational Fusion Power Plant.
DLi	Deuterium-Lithium.
DONES	Demo Oriented Neutron Source.
dpa	Displacement Per Atom.
DT	Deuterium-Tritium.
EFDA	European Fusion Development Agreement.
ELM	Edge-Localized Mode.
ESS	Energy Storage System.
ExternE	External Costs of Energy.
F4E	Fusion for Energy, ITER European domestic agency.
FGM	Functionally Graded Materials.
GCR	Gas-Cooled Reactor.
HCD	Heating & Current Drive.
HCPB	Helium Cooled Pebble Beds blanket.
HCLL	Helium Cooled Lithium Lead blanket.



HELCSA	High Energy Czech Load Assembly.
HIP	Hot Isostatic Pressing.
HTS	High-Temperature Superconductor.
ICF	Inertial Confinement Fusion.
IFMIF	International Fusion Materials Irradiation Facility.
IPP	Institute of Plasma Physics.
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor.
JET	Joint European Torus.
KIT	Karlsruhe Institute of Technology.
LCOE	Levelized Cost of Electricity.
LVR-15	Experimentální lehkovodní reaktor v Řeži u Prahy.
MCF	Magnetic Confinement Fusion.
ODS	Oxide Dispersion Strengthened.
OVSS	Outer Vessel Steady-State Sensor.
OZE	Obnovitelné zdroje energie.
PFC	Plasma Facing Component.
PPCS	Power Plant Conceptual Study.
PWR	Pressurized Water Reactor.
RAFMS	Reduced Activation Ferritic Martensitic Steel.
RAO	Radioaktivní odpad.
RIEMF	Radiation Induced Electro-Motive Force.
RE	Runaway Electrons.
RT	Room Temperature.
RTD	Resistance Temperature Detector.
RTG	Rentgenové záření.
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments.
SOL	Scrape-Off Layer.
TCOE	Total Cost of Electricity.
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol.
TIEMF	Temperature Induced Electro-Motive Force.
VDE	Vertical Displacement Event.
VISA	Virtual Instrument Software Architecture.



Použitá označení

B	[T]	Magnetické pole.
C	[M\$]	Costs, roční provozní náklady.
C^{EXT}	[M\$]	External Costs, externí náklady.
CF	[M\$]	Cash-Flow, roční tok hotovosti.
DP	[M\$]	Depreciation, odpisy investičního majetku.
DPP	[rok]	Discounted Payback Period, dynamická doba návratnosti.
E	[GWh]	Roční čistá výroba elektřiny.
E_F	[eV]	Energie uvolněná při jedné fúzní reakci.
I	[A]	Napájecí proud.
I	[M\$]	Interests, úroky z úvěru.
IN	[M\$]	Roční investice.
IRR	[%]	Internal Rate of Return, vnitřní výnosové procento.
j	[A/m ²]	Proudová hustota.
$LCOE$	[\$/MWh]	Levelized Cost of Electricity, střední měrná výrobní cena elektřiny.
M_R	[-]	Faktor multiplikace fúzního výkonu reaktoru.
m_p	[V]	Alternující signál na výstupu z mixeru.
m_n	[V]	Alternující signál na výstupu z mixeru.
m	[V]	Výstupní signál lock-in zesilovače.
n	[m ⁻³]	Hustota plazmatu.
NPV	[G\$]	Net Present Value, čistá současná hodnota.
o_{in}	[V]	Offset signálové cesty vstupního signálu.
o_r	[V]	Offset signálové cesty referenčního signálu.
o_m	[V]	Offset mixeru.
p	[Pa]	Tlak plazmatu.
P_{DH}	[MW]	Zbytkový tepelný výkon.
P_F	[MW]	Fúzní výkon.
P_{GR}	[MW]	Hrubý elektrický výkon elektrárny.
P_H	[m ³ /C]	Planární Hallův koeficient.
P_H	[MW]	Výkon ohřevu plazmatu.
P_{HC}	[MW]	Příkon systému HCD.
P_{HC}^B	[MW]	Vyvážený příkon systému HCD.



P_{HL}	[MW]	Ztrátový výkon systému HCD.
P_L	[MW]	Ztrátový výkon plazmatu.
P_{TH}	[MW]	Tepelný výkon reaktoru.
P_{TH}^B	[MW]	Vyvážený tepelný výkon reaktoru.
P_{TL}	[MW]	Ztráty při konverzi tepelné energie na elektřinu.
P_{RL}	[MW]	Ztrátový výkon reaktoru.
P_{SC}	[MW]	Vlastní spotřeba elektrárny.
P_{TP}	[MW]	Výkon uvolněný při produkci tritia.
P_{NET}	[MW]	Čistý elektrický výkon elektrárny.
P_α	[MW]	Výkon přenášený α částicemi vniklými při fúzní reakci.
PI	[-]	Profitability Index, index ziskovosti
Q	[-]	Zesílení.
r	[%]	Discount rate, diskontní sazba.
r_i	[%]	Interest rate, úroková sazba.
R	[M\$]	Revenues, roční výnosy.
R_H	[m ³ /C]	Normálový Hallův koeficient.
R_{off}	[Ω]	Offsetový odpor senzoru.
t	[m]	Tloušťka citlivé vrstvy senzoru.
t	[rok]	Běžný rok.
t_{BT}	[hod]	Délka pulsu.
t_{DT}	[hod]	Délka prodlevy mezi pulsy.
T	[°C][eV]	Teplota.
T	[%]	Daň z příjmu.
T_L	[rok]	Doba ekonomické životnosti.
T_p	[rok]	Aktuální rok.
$TCOE$	[\$/MWh]	Total Cost of Electricity, celková měrná výrobní cena elektřiny.
U_{FS}	[V]	Celkový rozsah měření.
U_H	[V]	Normálové Hallovo napětí.
U_{out}	[V]	Výstupní napětí.
U_{off}	[V]	Offsetové napětí.
U_P	[V]	Planární Hallovo napětí.
U_r	[V]	Referenční napětí.



U_s	[V]	Napájecí napětí.
v	[m/s]	Rychlost.
V	[m ³]	Objem.
W_P	[MJ]	Tepelná energie plazmatu.
α	[°]	Úhel mezi vektorem B a osou x .
β	[°]	Úhel mezi vektorem B a osou y .
γ	[°]	Úhel mezi vektorem B a osou z .
ε_{DH}	[-]	Faktor zbytkového tepelného výkonu.
ε_H	[-]	Složka ohřevu faktoru recirkulace výkonu.
ε_R	[-]	Složka recirkulace faktoru recirkulace výkonu.
ε_{REC}	[-]	Faktor recirkulace výkonu.
η_{ESS}^{EL}	[-]	Účinnost zásobníku tepelné energie.
η_{ESS}^{TH}	[-]	Účinnost zásobníku elektrické energie.
η_{SC}	[-]	Koeficient vlastní spotřeby elektrárny.
η_{GR}	[-]	Hrubá účinnost výroby elektrické energie.
η_H	[-]	Účinnost ohřevu plazmatu (elektřina-tepelná energie plazmatu).
η_{NET}	[-]	Čistá účinnost výroby elektřiny.
η_{NET}^F	[-]	Čistá účinnost výroby elektřiny vztažená k fúznímu výkonu.
η_{NET}^H	[-]	Čistá účinnost výroby elektřiny s ohřevem paliva bez recirkulace.
η_{NET}^{NOH}	[-]	Čistá účinnost výroby elektřiny bez ohřevu paliva.
η_{NET}^{TH}	[-]	Čistá účinnost výroby elektřiny vztažená k tepelnému výkonu.
η_{NET}^R	[-]	Čistá účinnost výroby elektřiny vztažená k uvolněnému výkonu.
η'_{PO}	[-]	Koeficient pulsního režimu zásobníku tepelné energie.
η''_{PO}	[-]	Koeficient pulsního režimu zásobníku elektrické energie.
η_{REC}	[-]	Účinnost recirkulace.
ρ	[Ω m]	Měrný odpor.
σ	[m ²]	Účinný průřez reakce.
τ_E	[s]	Doba udržení energie v plazmatu.
Ω_i	[-]	Součinitel inženýrské rovnováhy.



Kapitola 1

Aktuální stav přípravy energetického využití jaderné fúze

Kapitola poskytuje stručný úvod do problematiky jaderné fúze a shrnuje základní informace o připravovaných fúzních elektrárnách. Podle plánu Evropské unie a dalších světových velmocí má být první fúzní elektrárna uvedena do provozu do roku 2050.



1.1 Úvod

V roce 1997 dosáhl fúzní reaktor JET (Joint European Torus) fúzního výkonu 16 MW. Tím byl podán důkaz o uskutečnitelnosti uvolňování energie řízenou jadernou fúzí. V současné době po celém světě pracují desítky fúzních zařízení, které rozvíjejí znalosti o řízené jaderné fúzi, chování vysokoteplotního plazmatu a fúzních technologiích [A1].

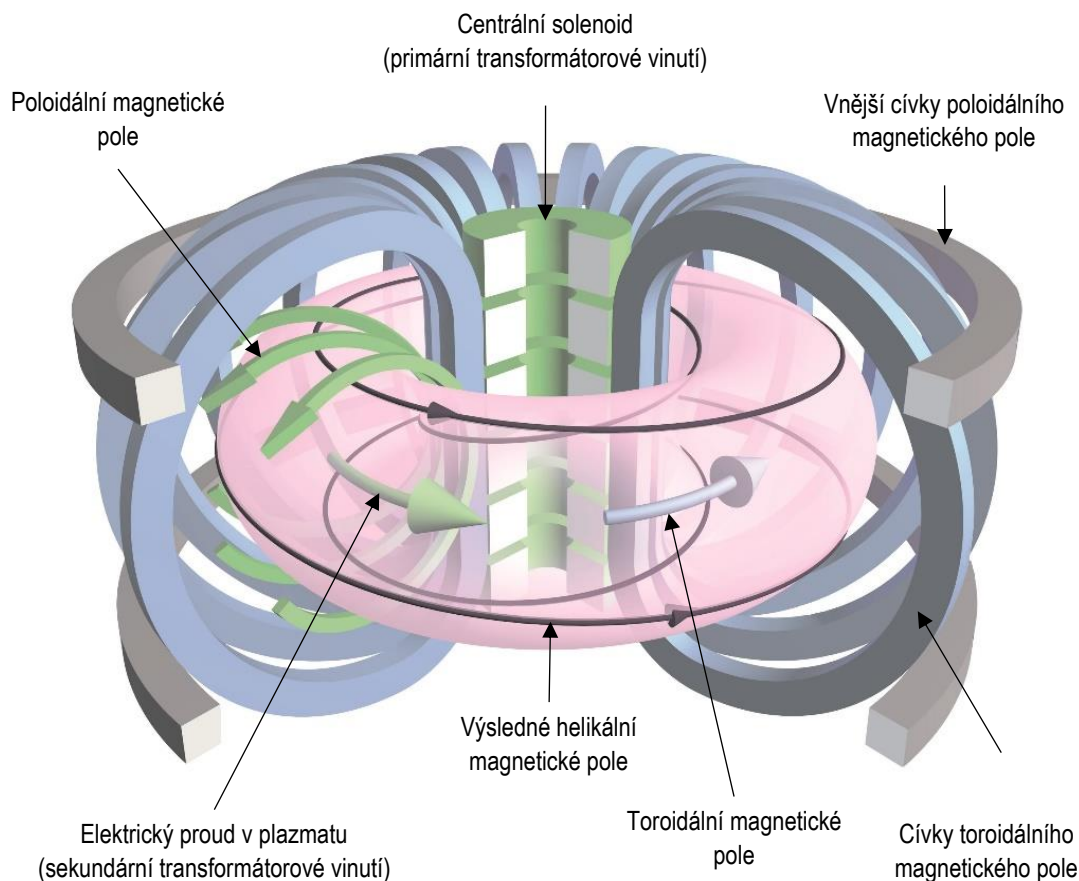
Prokázat technickou realizovatelnost energetického využití jaderné fúze má za cíl projekt mezinárodního termojaderného experimentálního reaktoru ITER. Reaktor ITER o fúzním výkonu 500 MW, který se staví ve francouzské Provence, bude testovat zařízení a technologie pro první fúzní elektrárny. Uvedení reaktoru do provozu je naplánováno na rok 2025. Na základě získaných zkušeností budou postaveny první fúzní elektrárny. Podle plánu Evropské unie by měla být první elektřina z jaderné fúze vyrobena do roku 2050 [1].

1.2 Tokamaky

V energetických fúzních reaktorech první generace bude probíhat termojaderná fúzní reakce jader deuteria a tritia. Optimální teplota pro průběh reakce je přibližně 160 milionů °C. Reaktanty budou ve skupenství plně ionizovaného plazmatu.

Nejpokročilejšími fúzními reaktory jsou tzv. tokamaky na bázi magnetického udržení plazmatu (obr. 1.1). Tokamak je původně ruský koncept fúzního reaktoru charakteristický indukčně generovaným elektrickým proudem v plazmatu, který spoluvytváří magnetické pole a ohřívá plazma [2].

Hlavní částí tokamaku je prstencová vakuová nádoba, umístěná na transformátorovém jádru. Současné tokamaky používají vzduchové transformátory s centrálním solenoidem. Transformátor indukce v plazmatu uvnitř nádoby vysoký elektrický proud, který generuje poloidální magnetické pole. Okolo vakuové nádoby jsou navinuty magnetické cívky, které vytvářejí toroidální magnetické pole. Součtem obou polí vzniká helikální magnetické pole, které brání kontaktu plazmatu s konstrukcí reaktoru. Indukovaný proud v plazmatu současně plazma ohřívá. Indukce elektrického proudu v plazmatu je klíčovou předností tokamaků, avšak komplikuje jejich energetické využití. Indukce probíhá pouze při změně elektrického proudu v primárním vinutí transformátoru, a proto tokamaky ze své podstaty pracují v pulzním režimu. Protože výroba elektřiny pro rozvodnou síť vyžaduje konstantní tok energie, budou energetické reaktory na bázi tokamaku vybaveny zařízením pro neinduktivní generování elektrického proudu [A2].



Obr. 1.1 Základní schéma reaktoru typu tokamak.

Pro dosažení teplot potřebných pro průběh termojaderné reakce na úrovni stovek milionů °C je plazma ohříváno fyzikálně a technicky sofistikovaným systémem ohřevu a generování elektrického proudu plazmatu HCD (Heating & Current Drive). Nejprve je plazma ohřáto indukovaným elektrickým proudem o velikosti až desítek megaampér. Se vzrůstající teplotou ale klesá elektrický odpor plazmatu a ohřev elektrickým proudem se stává neúčinným. Pro další ohřev plazmatu slouží svazky urychlených neutrálních atomů a elektromagnetické vlny.

Svazky urychlených neutrálních atomů a elektromagnetické vlny lze také využít pro neinduktivní generování elektrického proudu. Vstřikováním tangenciálního svazku neutrálních atomů dochází mezi svazkem a plazmatem k množství srážek vedoucích kromě ohřevu plazmatu ke vzniku elektrického proudu. Elektromagnetické vlny na cyklotronových frekvencích mohou zase na svém čele zachytit nabitě částice a vléct plazmatem elektrický proud [3],[A3].

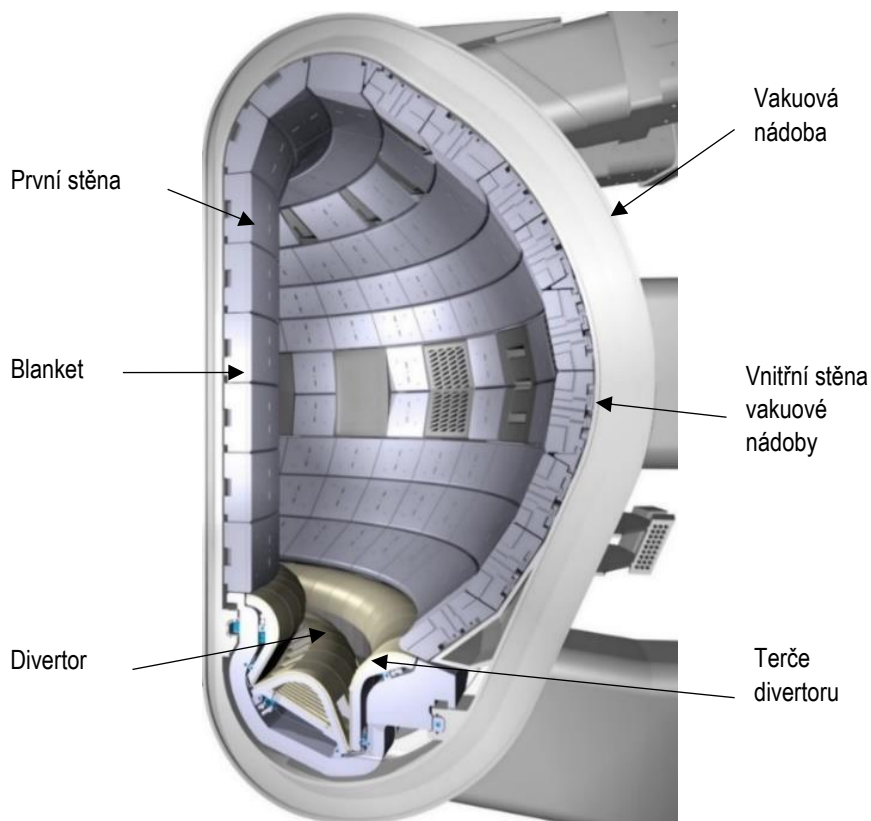


Pro provoz fúzního reaktoru je nezbytné v reálném čase monitorovat základní parametry plazmatu, jako je prostorové rozložení teploty, tlaku a hustoty elektronů a iontů nebo obsah nečistot v plazmatu, a identifikovat probíhající procesy jako jsou transport plazmatu, elektrický proud, změny magnetického pole nebo četnost fúzních reakcí [A3]. Měření a sledování parametrů plazmatu komplikuje jeho vysoká teplota, která až na výjimky vylučuje použití kontaktních senzorů. Proto je diagnostika plazmatu postavena především na měření a analýze polí a záření. Pasivní metody sledují magnetické a elektrické pole, rentgenové záření, rádiové záření, viditelné a infračervené záření nebo neutrální částice a ionty vylétávající z plazmatu. Aktivní metody analyzují záření, které je emitováno při interakci plazmatu s laserovými, mikrovlnnými nebo částicovými svazky. V případě energetických reaktorů bude působení plazmatu a fúzních neutronů natolik destruuující, že nebude možné řadu z existujících diagnostik používat. To se týká především diagnostických metod vyžadujících průzory do vakuové komory. Průzory, zrcadla a další komponenty diagnostických přístrojů vystavené plazmatu budou intenzivně poškozovány vysokým neutronovým tokem, odprašováním a naprašováním. V energetických reaktorech proto budou pro řízení reaktoru použity především diagnostiky, které nejsou působení plazmatu přímo vystavené, jako je magnetická, mikrovlnná nebo neutronová diagnostika.

1.3 Jaderná zóna

Při DT reakci, která bude probíhat v prvních fúzních energetických reaktorech, se fúzní energie uvolňuje ve formě kinetické energie heliových jader a neutronů vznikajících při reakci. Rozdělení energie odpovídá obrácenému poměru hmotnosti heliového jádra a neutronu: přibližně 4/5 uvolněné energie (~ 14 MeV) odnáší neutron a 1/5 energie ($\sim 3,6$ MeV) získává heliové jádro. Heliové jádro je kladně nabitě, a proto zůstává v plazmatu zachyceno magnetickým polem reaktoru, předává svou energii ostatním částicím plazmatu a ohřívá tak plazma. Neutrony bez elektrického náboje opouštějí plazma a pronikají do jaderných komponent reaktoru, kde jsou absorbovány. Hranicí jaderné zóny je vnitřní stěna vakuové nádoby. V energetickém reaktoru způsobí vysoký tok fúzních neutronů rozsáhlá radiační poškození struktury materiálů jaderné zóny, vodíkové a heliové křehnutí a transmutaci atomů [4]. Tepelný tok vytvoří v materiálech vysoké teplotní gradienty doprovázené termomechanickým napětím a při výkonových špičkách tavením povrchu a změnami struktury povrchové vrstvy [A4]. Hlavními součástmi jaderné zóny jsou první

stěna (First Wall), blanket a divertor (obr. 1.2) [A3]. První stěna a divertor se společně označují jako komponenty vystavené plazmatu (Plasma Facing Components).



Obr. 1.2 Jaderné komponenty fúzního reaktoru.

Pro povrchovou vrstvu první stěny reaktoru ITER bylo zvoleno beryllium, pevný kov s velmi nízkým atomovým číslem. První stěna je tvořena berylliovou vrstvou o tloušťce 10 mm difúzně navařenou technologií HIP (Hot Isostatic Pressing) na chladič z měděné slitiny CuCrZr. Chladičem protéká chladicí voda o tlaku 4 MPa a teplotě 70–110 °C. Nosná konstrukce první stěny je vyrobena z austenitické nerezové oceli AISI 316 LN-IG (ITER Grade) [A3]. První stěna energetických reaktorů by měla být vyráběna z nízkoaktivovatelných feriticko-martenzitických ocelí RAFMS (Reduced Activation Ferritic Martensitic Steel) a bude integrální součástí blanketu. Jako chladicí médium je preferováno helium o tlaku 8 MPa a výstupní teplotě 500 °C, alternativně voda o tlaku 15,5 MPa a výstupní teplotě 325 °C (PWR parametry) [4].

Blanket energetického reaktoru první generace fúzních elektráren bude absorbovat většinu neutronového toku z plazmatu, odvádět uvolněné teplo z reaktoru a zajišťovat



produkci tritia pro palivový cyklus reaktoru. Protože je preferovaná jaderná reakce produkce tritia ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ exotermická, bude blanket také generovat energii [A5]. Chlazení blanketu bude probíhat společně s chlazením první stěny. V případě použití lithia ve formě eutektické slitiny LiPb může být pro chlazení blanketu použita i tato slitina [A4].

Nejvíce zatíženou komponentou fúzních reaktorů je divertor, který odvádí povrchovou vrstvu plazmatu z reaktoru a směřuje ji na své terče. Divertorové terče reaktoru ITER budou vyrobeny z wolframových monobloků s chladicími trubkami z měděné slitiny CuCrZr s vestavěnými turbulizátory proudění. Odlišná teplotní roztažnost wolframu a slitiny CuCrZr je řešena mezivrstvou z čisté mědi. Terče budou chlazeny vodou o tlaku 4 MPa a teplotě 70 – 200 °C [5].

Požadavky na životnost terčů a odvod vysokých tepelných toků v energetických reaktorech pravděpodobně vyloučí použití wolframových monobloků, protože čistý wolfram má nedostatečnou tepelnou vodivost a trpí při teplotách nad 1200 °C rekrytalizací a při nízkých teplotách křehnutím. V důsledku těchto procesů je jeho pracovní pásmo pouze ~ 800 – 1200 °C a teplotní cykly by měly být omezeny pouze na toto pásmo. Materiálový výzkum se soustředí na hledání pokročilých materiálů a konstrukčních řešení, které by odstranily nedostatky čistého wolframu. Divertor reaktoru DEMO by měl být chlazen vodou o tlaku 5 MPa, vstupní teplotě 150 °C a výstupní teplotě 161,5 °C [A6].

Současné evropské referenční modely počítají s kombinací heliového chlazení první stěny, vodního chlazení divertoru a vakuové nádoby a parního cyklu sekundárního okruhu [6],[7]. Výstupní teploty chladicích médií z reaktoru se pohybují v širokém rozpětí od 150 do 500 °C. Aktuálně preferovaná kombinace médií o různé teplotě na výstupu z reaktoru vyžaduje několik primárních okruhů a klade vysoké nároky na optimalizaci sekundárního okruhu. Použití parního oběhu nemusí být v případě kombinace vysokopotenciálových a nízkopotenciálových zdrojů tepla optimální a podle provedených analýz by mohl dosáhnout vyšší účinnosti oběh s nadkritickým CO₂ [A7],[A8].

1.4 Fusion Roadmap

Vlajkovou lodí současného fúzního výzkumu je mezinárodní projekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Hlavním cílem projektu je prokázat technickou realizovatelnost fúzního zdroje energie. ITER bude testovat řízení plazmatu a řadu reaktorových technologií potřebných pro fúzní elektrárny jako jsou supravodivé



magnety, systémy ohřevu plazmatu, vakuový systém, palivový systém nebo tritiové hospodářství. Reaktor ITER nebude produkovat tritium ani vyrábět elektřinu, avšak umožní potřebné technologie otestovat. Reaktor dosáhne fúzního výkonu 500 MW při výkonu ohřevu 50 MW a překročí tak vědeckou rovnováhu (kap. 4). Výstavba reaktoru ITER byla zahájena v roce 2007 v jihofrancouzské Provence v sousedství výzkumného střediska CEA Cadarache [A1], první plazma je plánováno na rok 2025 a dosažení plného fúzního výkonu na rok 2036.

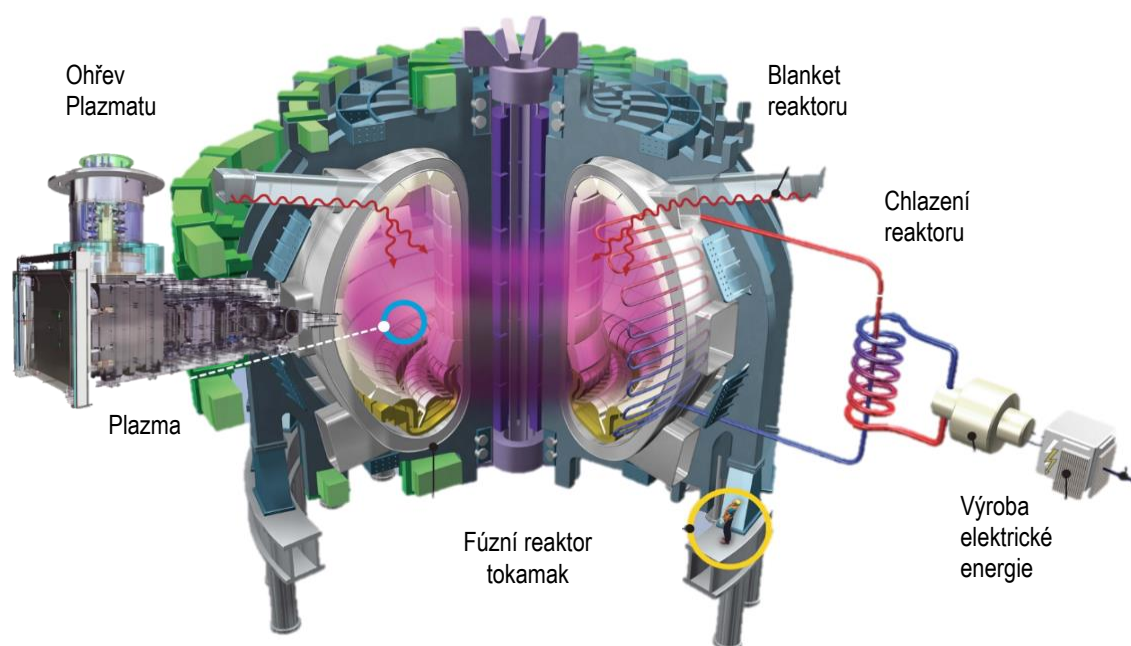
Na projekt ITER přímo navazují projekty DEMO (Demonstrational Fusion Power Plant). Projekty DEMO mají za cíl vyvinout a postavit elektrárnu s fúzním reaktorem, která bude demonstrovat výrobu elektřiny z jaderné fúze. Projekty DEMO byly v letech 2012-2014 zahájeny v Evropské unii, Jižní Koreji, Japonsku a Číně. V současnosti probíhá konceptuální výběr vhodných fúzních technologií [A1].

V roce 2012 Evropská komise odsouhlasila na základě dřívějších studií, především [8] a [9], klíčový dokument *Fusion Electricity: A roadmap to the realization of fusion energy* [1], zkráceně nazývaný *Fusion Roadmap*, který definuje záměr Evropské unie zahájit výrobu elektrické energie pomocí jaderné fúze do roku 2050. Pro dosažení stanovených cílů Fusion Roadmap popisuje 8 rámcových oblastí fúzního výzkumu a vývoje, na které má být soustředěno úsilí:

1. Provozní režimy plazmatu.
2. Odvod výkonu.
3. Radiačně odolné materiály.
4. Tritiová soběstačnost.
5. Bezpečnost zařízení.
6. Fúzní elektrárna DEMO.
7. Konkurenceschopná cena elektrické energie.
8. Stelarátory.

Pro výstavbu fúzní elektrárny DEMO Fusion Roadmap stanovila následující časový plán:

- | | |
|--|-----------|
| ▪ Sestavení koncepčního řešení fúzní elektrárny | 2014-2020 |
| ▪ Zpracování projektové dokumentace fúzní elektrárny | 2021-2030 |
| ▪ Výstavba a zprovoznění fúzní elektrárny | 2031-2042 |
| ▪ Připojení do elektrické sítě | 2047 |



Obr. 1.3 Zjednodušené schéma fúzní elektrárny [10].

Podle současné evropské představy bude elektrárna DEMO (obr. 1.3) realizována ve dvou etapách: blízké DEMO, označované jako DEMO1 a pokročilé DEMO, označované jako DEMO2 [11]. V etapě DEMO1 bude při návrhu a výstavbě upřednostněn realistický přístup zaručující zprovoznění elektrárny, před technicky inovativními, ale zatím nejistými řešeními, přičemž pokročilá řešení budou rozvíjena paralelně pro následující fázi DEMO2. Vybrané parametry referenčních modelů DEMO1 a DEMO2 jsou shrnuty v tabulce 1.1.

1.5 Závěr

Výzkum řízené jaderné fúze pokročil do fáze přípravy prvních fúzních elektráren. Podle plánu Evropské unie a dalších světových velmocí má být první fúzní elektrárna uvedena do provozu do roku 2050.

Detailní popis aktuálního stavu výzkumu jaderné fúze z pohledu energetického využití je volně dostupný na internetu v seriálu pěti článků *Základy fúzní energetiky* [A1]-[A5]. Vybrané otázky chlazení jaderných komponent jsou řešeny v člancích [A6] - [A10].

Stručný popis výzkumu jaderné fúze lze nalézt v popularizační publikaci Akademie věd ČR *Sputání slunce* [A11] a v řadě publikací v časopisech [A12]-[A27]. Výzkum fúzních technologií v ČR je shrnut v monografii *Historie aplikovaného výzkumu jaderné fúze v Řeži* [A28] a v článku *Overview on Fusion Nuclear Technology Experimental Testing* [A29].



Tab. 1.1 Základní parametry evropských referenčních modelů fúzní elektrárny DEMO [6],[7].

Referenční model	DEMO1 4/2015	DEMO2 5/2015
Fúzní výkon [MW]	2037	3255
Výkon ohřevu plazmatu [MW]	50	133
Faktor zesílení Q^*	40,7	24,5
Faktor multiplikace fúzního výkonu M_R^*	1,19	1,23
Provoz reaktoru, délka pulsu/prodlevy [hod]	2/0.5	Ustálený
Tepelný výkon reaktoru [MW]*	2463	4149
Hrubý elektrický výkon [MW]	914	1660
Celková spotřeba elektrárny [MW]	414	707
Čistý elektrický výkon [MW]	500	953
Čistá tepelná účinnost elektrárny [%]	20,3	23,0
Chlazení první stěny a blanketu	helium	helium
Tepelný výkon [MW]	2176	3673
Tlak [MPa]	8	8
Vstupní/výstupní teplota [°C]	300/500	300/500
Chlazení divertoru	voda	voda
Tepelný výkon [MW]	222	408
Tlak [MPa]	5	5
Vstupní/výstupní teplota [°C]	150/161,5	150/161,5
Chlazení vakuové nádoby	voda	voda
Tepelný výkon [MW]	65	68
Tlak [MPa]	3,15	3,15
Vstupní/výstupní teplota [°C]	190/200	190/200
Tepelný oběh sekundárního okruhu	parní	parní

* Faktor zesílení, faktor multiplikace a tepelný výkon reaktoru jsou popsány v kap. 4.



Kapitola 2

Cíle disertační práce a metoda jejich dosažení

Cílem teoretické části práce je analýza charakteristických rysů budoucí fúzní energetiky a ex-ante porovnání fúzních elektráren s provozovanými elektrárnami. Zvláštní pozornost je věnována recirkulaci výkonu ohřevu paliva. Cílem experimentální práce je vyvinutí prototypu radiačně a tepelně odolných kovových Halloových senzorů magnetického pole pro mezinárodní reaktor ITER.

2.1 Cíle disertační práce

Předložená disertační práce má tři průřezové cíle:

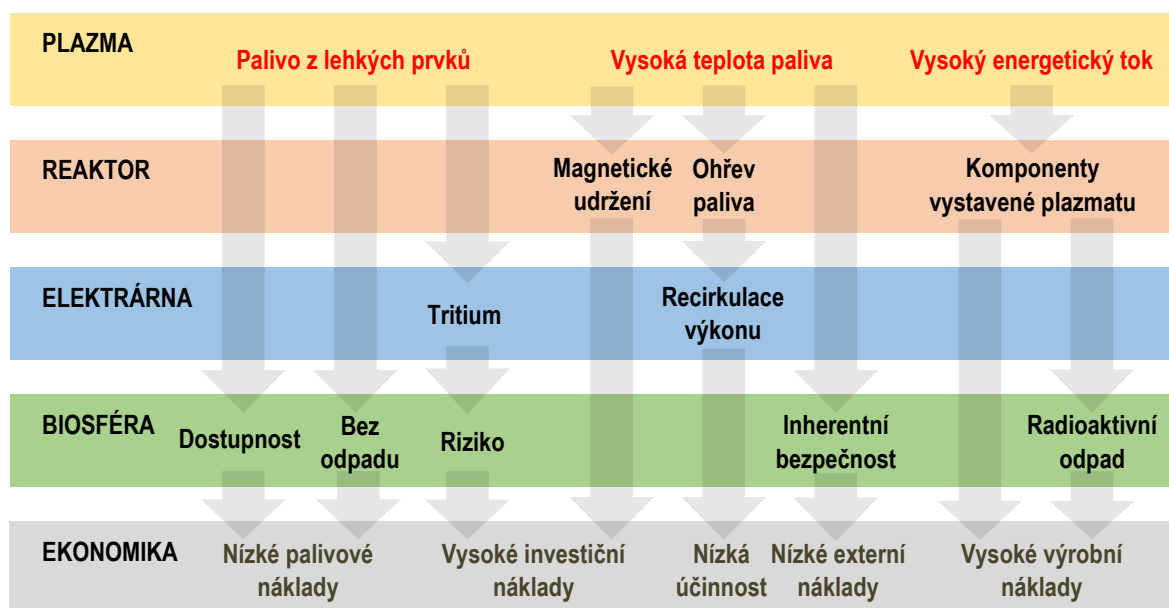
Prvním cílem je identifikace charakteristických rysů budoucí fúzní energetiky. Z fyzikální podstaty jaderné fúze vyplývají tři klíčové fyzikální rysy energetického využití jaderné fúze: fúzní palivo z lehkých chemických prvků, vysoká pracovní teplota paliva a vysoký energetický tok v reaktoru. Tyto fyzikální rysy predeterminují charakteristické rysy fúzní energetiky (obr. 2.1).

Druhým cílem je analýza energetické bilance budoucích fúzních elektráren z hlediska recirkulace vysokého elektrického výkonu při ohřevu paliva na vysoké teploty. Ztráty při recirkulaci výkonu ohřevu významně sníží čistou účinnost výroby elektrické energie.

Třetím, mezioborovým, cílem na úrovni reaktorové technologie je vyvinutí prototypu teplotně a radiačně odolných senzorů ustáleného magnetického pole pro mezinárodní termojaderný reaktor ITER. Sensory budou v reaktoru ITER testovány pro použití v budoucích fúzních elektrárnách.

2.1 Motivace

Pokrok v oblastech fyziky termojaderného plazmatu a fúzních technologií umožní v tomto století integrovat fúzní reaktory do energetiky. V roce 2012 byla zahájena intenzivní



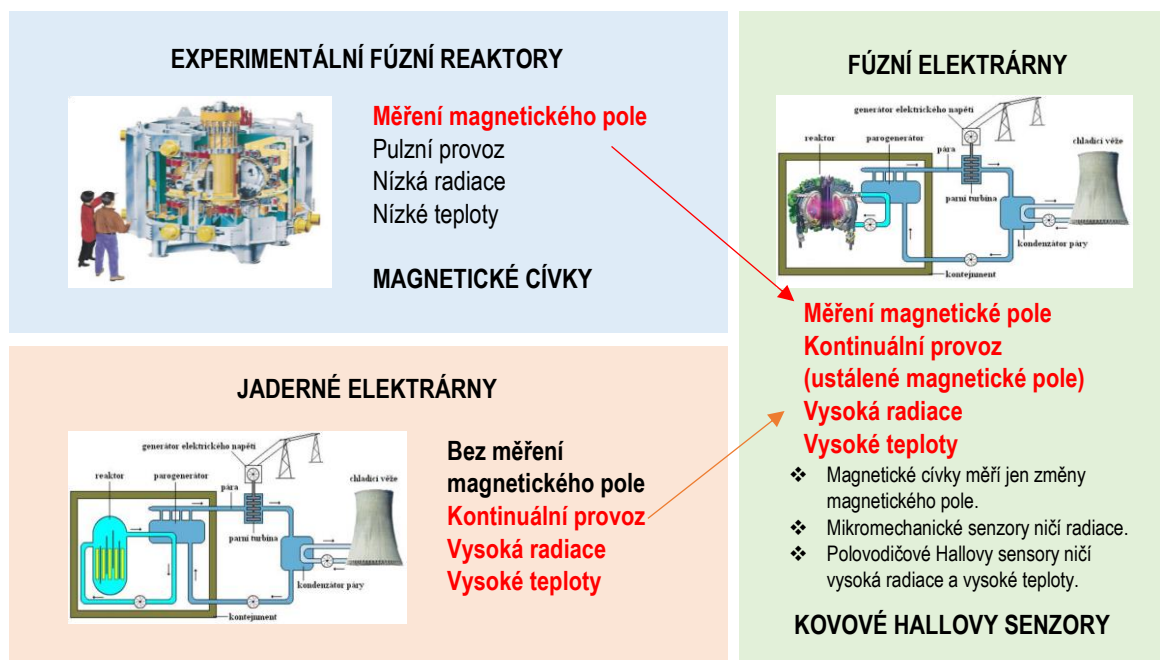
Obr. 2.1 Charakteristické rysy fúzních elektráren.



příprava první evropské fúzní elektrárny a fúzní výzkum se rozšiřuje do řady inženýrských a technologických profesí. Specifika integrace jaderné fúze do energetiky jsou ale obvykle uváděna heslovitě bez hlubšího vysvětlení jejich příčiny a vzájemných souvislostí. Prvním cílem práce je proto analýza a zhodnocení charakteristických rysů budoucích fúzních zdrojů (obr. 2.1).

Jedním z průřezů klíčových fyzikálních rysů jaderné fúze do technologie elektrárny je ohřev paliva na velmi vysoké teploty. Ohřev paliva na vysoké teploty si vyžádá vysoký elektrický příkon. Tepelná energie vložená do paliva ale bude vyzařována z paliva zpět a spolu s uvolněnou fúzní energií použita k výrobě elektřiny. Díky tomu nebude čistý výstupní výkon elektrárny snížen o příkon systému ohřevu, ale pouze o ztráty při recirkulaci výkonu ohřevu. Druhým cílem práce je analytický popis dopadu ohřevu paliva na čistou účinnost elektrárny.

Součástí přípravy technologií pro fúzní elektrárny je vývoj radiačně a teplotně odolných diagnostických přístrojů. Fúzní reaktory v současnosti používají k udržení horkého plazmatu magnetické pole, které s plazmatem interaguje a jeho měření je důležité pro řízení reaktoru. Experimentální fúzní reaktory s krátkými pulzy využívají pro měření magnetického pole magnetické cívky (obr. 2.2).



Obr. 2.2 Motivace vývoje senzorů ustáleného magnetického pole fúzních energetických reaktorů na bázi kovových Hallových senzorů.



Na rozdíl od experimentálních zařízení fúzní elektrárny budou vyžadovat měření ustáleného magnetického pole v prostředí vysokých tepelných a neutronových toků, pro které nejsou magnetické cívky ani jiné dostupné senzory vhodné. Cílem experimentální práce je proto vyvinout prototyp teplotně a radiačně odolných Hallových senzorů pro reaktor ITER, který bude testovat komponenty a technologie budoucích fúzních elektráren.

2.2 Metoda dosažení cílů

Identifikace charakteristických rysů fúzních zdrojů energie byla provedena formou kombinace fyzikální, kauzální a technicko-ekonomické analýzy. Jednotlivé analýzy vycházejí z údajů podložených externími odkazy na příslušné zdroje.

Dopad ohřevu paliva byl hodnocen na základě jeho vlivu na čistou účinnost elektrárny. Analytické vztahy pro čistou účinnost byly odvozeny z bilance hlavních výkonových toků fúzní elektrárny.

Vývoj prototypu teplotně a radiačně odolných senzorů ustáleného magnetického pole probíhal experimentálně a zahrnoval množství různých činností, např. návrh senzorů, výběr vhodných postupů výroby senzorů, měření jejich vlastností, návrh metod zpracování signálů, testování senzorů apod. Autor této práce se podílel na všech popsanych činnostech. Vzhledem k velkému rozsahu provedené práce je vývoj prototypu popsán formou prezentace jednotlivých dílčích výsledků práce.

Dosažené výsledky práce autor již publikoval v recenzovaných časopisech. Proto jsou v textu často uváděny odkazy na autorské publikace označené písmenem [A]. Referenční seznam autorských publikací je uveden samostatně v kapitole 9.2.



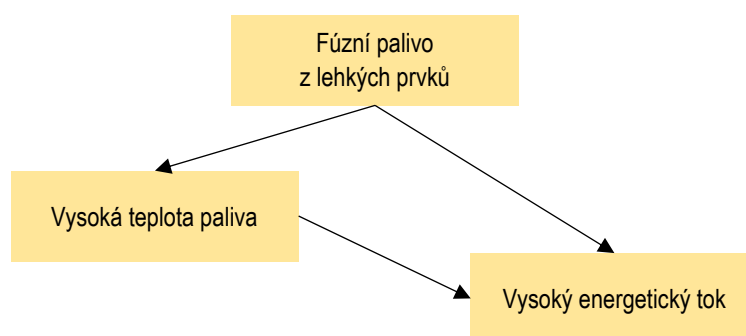
Kapitola 3

Charakteristické rysy fúzní energetiky

Klíčovými fyzikálními rysy fúzních zdrojů energie jsou palivo z lehkých chemických prvků, vysoká pracovní teplota paliva a vysoký energetický tok ve fúzním reaktoru. Tyto fyzikální rysy implikují nevyčerpatelné a dostupné zásoby paliva, bezemisní výrobu, inherentní jadernou bezpečnost, recirkulaci výkonu ohřevu paliva, nízkou životnost jaderných komponent, vznik sekundárně aktivovaných radioaktivních odpadů nebo specifickou strukturu výrobní ceny elektrické energie

3.1 Úvod

Klíčové charakteristické rysy fúzních zdrojů energie bezprostředně vycházejí z fyzikálních vlastností jaderné fúze. Vhodným palivem pro jadernou fúzi jsou lehké chemické prvky. Energetický zisk je podle současných znalostí možné dosáhnout pouze termojadernou fúzí probíhající při vysokých teplotách paliva. Vysokoenergetické neutrony uvolňované při fúzní reakci a tepelný tok z horkého paliva vytvářejí vysoký energetický tok působící na konstrukci reaktoru (obr. 3.1).

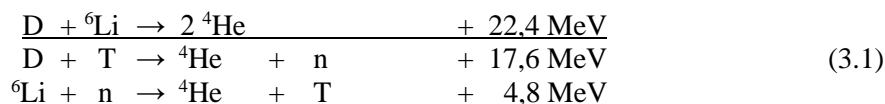


Obr. 3.1 Primární specifické rysy fúzních zdrojů energie.

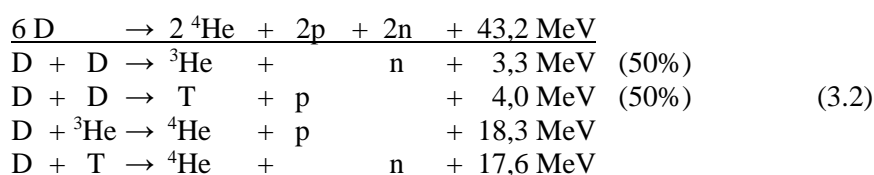
Za klíčové fyzikální rysy fúzních zdrojů energie lze proto označit palivo z lehkých prvků, jehož zásoby jsou prakticky nevyčerpatelné a při jeho spalování nevznikají žádné emise ani odpad, vysokou pracovní teplotu paliva vyžadující ohřev paliva a zakládající inherentní jadernou bezpečnost, a vysoký energetický tok způsobující nízkou životnost jaderných komponent [A30]. Tyto rysy implikují nízký vliv na životní prostředí a specifickou skladbu ceny vyráběné elektřiny.

3.2 Fúzní palivo z lehkých prvků

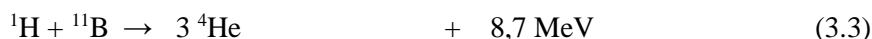
V energetických fúzních reaktorech první generace bude probíhat termojaderná fúzní reakce jader deuteria a tritia (DT reakce), protože z dostupných fúzních reakcí umožňuje nejsnáze vytvořit energetický zisk [2]. Optimální teplota pro průběh DT reakce je přibližně 160 milionů °C (kap. 4), při které jsou reaktanty ve skupenství plně ionizovaného plazmatu [A2]. Deuterium se bude získávat separací z vody, tritium se bude získávat jadernou reakcí ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ izotopu lithia ${}^6\text{Li}$ s neutrony vznikajícími přímo v reaktoru. Do palivového cyklu bude proto vstupovat deuterium a lithium jako DLi palivo. Celkový proces lze zjednodušeně zapsat jako souhrnnou reakci deuteria a lithia se vznikem helia:



Druhá generace fúzních reaktorů bude uvolňovat energii slučováním samotných jader deuteria (DD reakcí) a tritium již nebude nutné. Většina existujících fúzních zařízení tuto reakci využívá, avšak dosažení energetického zisku je obtížnější než v případě DT reakce. Reakční proces zahrnuje čtyři jaderné reakce a lze jej za předpokladu úplné recyklace reaktantů souhrnně zapsat jako reakci šesti jader deuteria za vzniku dvou jader helia, dvou protonů, dvou neutronů a uvolnění 43,2 MeV energie:



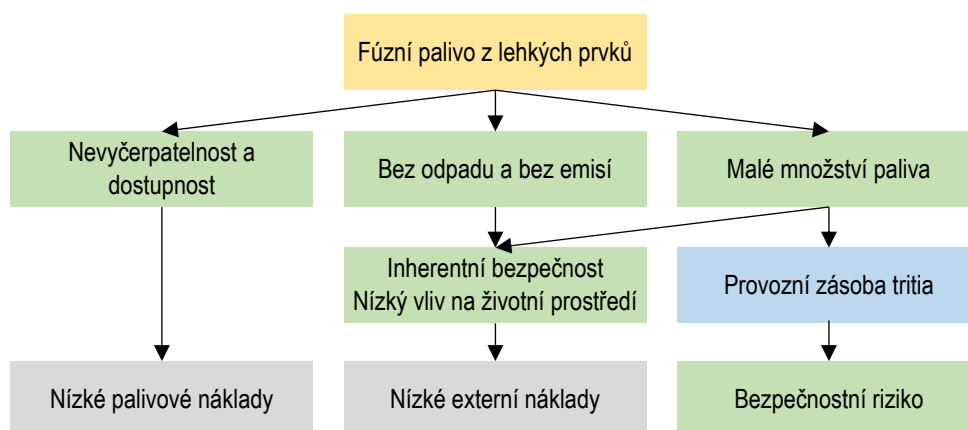
V dalších generacích fúzních reaktorů bude využívána bezneutronová fúze, například fúzní reakce jader vodíku a bóru, při které vznikají pouze elektricky nabitě částice udržitelné magnetickým polem reaktoru:



Bezneutronová fúze odstraní sekundární aktivaci konstrukce reaktoru a otevře cestu pro přímé magnetohydrodynamické generování elektrické energie bez použití termodynamického cyklu [A2].

Fenomenologicky představuje využití paliva z lehkých prvků další krok směrem ke zrodu vesmíru. První fúzní palivo vzniklo nukleosyntézou již krátce po velkém třesku a umožnilo zrození prvních hvězd syntetizujících další lehké prvky. Štěpné palivo z těžkých prvků se začalo tvořit až v závěru prvního hvězdného cyklu jadernou fúzí při explozích prvních supernov. Zahájení tvorby fosilních paliv se datuje nesrovnatelně později do dějin Země v období Karbonu před cca 350 miliony let. Původ paliv přímo implikuje jejich dostupné množství - lehké prvky fúzního paliva tvoří většinu viditelné hmoty vesmíru.

Na Zemi se lehké prvky použitelné jako palivo pro fúzní elektrárny nacházejí ve velkém množství ve vodě, především ve světových oceánech. Díky tomu je fúzní palivo dostupné kdekoli na Zemi. Zjednodušený strom kauzálních vztahů fúzního paliva z lehkých prvků ukazuje obr. 3.2 (s výjimkou vztahů na obr. 3.1).



Obr. 3.2 Zjednodušený strom kauzálních vztahů fúzního paliva z lehkých prvků. (Barvy rámečků odpovídají rozdělení do úrovní podle obr. 2.1.)

Izotop vodíku Deuterium je přírodní látka, která se přirozeně vyskytuje ve vodě. Ve světových oceánech se nachází $\sim 4,76 \times 10^{16}$ kg deuteria (tab. 3.1). Energetická kapacita zásob této příměsi vody je přibližně $1,6 \times 10^{31}$ J [A16].

OSN odhaduje, že populace Země poroste přibližně do roku 2100, kdy se ustálí na 10 miliardách obyvatel [14]. V tomto roce dosáhne spotřeba energie podle nejhoršího scénáře přibližně $1,75 \times 10^{21}$ J/rok [15]. Při úplném pokrytí této spotřeby jadernou fúzí by zásoby deuteria vystačily 2,81 miliardy let, při pravděpodobném pokrytí poloviny celosvětové spotřeby by vystačily přibližně 5,6 miliardy let. To je více než dostatečné, protože asi za 5,3 miliardy let dojde k vyhoření fúzního paliva na Slunci a k zániku Země.

Tab. 3.1 Zásoby deuteria.

Množství vody v oceánech [12]	$1,41 \times 10^{21}$	kg
Množství deuteria v oceánech [13]	$4,76 \times 10^{16}$	kg
Energetická kapacita 1 kg deuteria	$3,45 \times 10^{14}$	J/kg
Energetická kapacita zásob deuteria	$1,64 \times 10^{31}$	J
Denní spotřeba deuteria v elektrárně o elektrickém výkonu 1 GW _e při účinnosti výroby 30%	0,83	kg
Celosvětová spotřeba energie 2100 [15]	$1,75 \times 10^{21}$	J/rok
Doba do vyčerpání zásob deuteria při zajištění poloviny celosvětové spotřeby roku 2100	$5,63 \times 10^9$	let

Lithium, druhá složka DLi paliva první generace fúzních elektráren, je také přírodní látka, V zemské kůře je přibližně $9,9 \times 10^{10}$ kg lithia a v oceánech $2,47 \times 10^{14}$ kg (tab. 3.2).



Zásoby izotopu lithia ${}^6\text{Li}$ pro první generaci fúzních elektráren jsou celkově $1,83 \times 10^{13}$ kg. Pokud by měla být fúzní reakce DT používána delší dobu, což se nepředpokládá, zásoby lithia v oceánech by vystačily na pokrytí poloviny předpokládané celosvětové spotřeby roku 2100 po dobu až 1,53 milionu let.

Tab. 3.2 Zásoby lithia.

Množství vody v oceánech [12]	$1,41 \times 10^{21}$	kg
Množství lithia v oceánech [16]	$2,44 \times 10^{14}$	kg
Množství izotopu ${}^6\text{Li}$ v oceánech	$1,83 \times 10^{13}$	kg
Energetická kapacita 1 kg ${}^6\text{Li}$	$2,45 \times 10^{14}$	J/kg
Energetická kapacita zásob ${}^6\text{Li}$	$4,47 \times 10^{27}$	J
Denní spotřeba lithia v elektrárně o elektrickém výkonu 1 GW_e při účinnosti výroby 30%	1,18	kg
Celosvětová spotřeba energie 2100 [15]	$1,75 \times 10^{21}$	J/rok
Doba do vyčerpání zásob ${}^6\text{Li}$ při zajištění poloviny celosvětové spotřeby roku 2100	$1,53 \times 10^6$	let

Stávající fúzní reaktory pracují především s DD plazmatem a je jen otázkou pokroku fúzních technologií, kdy bude možné DD reakci využít i v energetických reaktorech. Deuterium se nachází v běžně dostupné vodě. Tím je dána jeho univerzální dostupnost ve všech zemích po celém světě, v celém antropogenním prostoru. Dostupnost deuteria je kvalitativně vyšší než dostupnost obnovitelných zdrojů energie, které jsou závislé na geografických podmínkách a na nahodilosti počasí. Klimatické výkyvy, např. dlouhotrvající sucho, sice mohou omezit dostupnost fúzního paliva, avšak jeho vysoká energetická kapacita a bezpečnost umožňují jeho snadný transport. Denní spotřeba DD paliva ve fúzní elektrárně o elektrickém výkonu 1 GWe bude činit přibližně 0,83 kg (tab. 3.1). Toto množství paliva lze teoreticky získat z pouhých 25 m^3 vody (tab. 3.3). I po započítání reálné výtěžnosti deuteria a jeho ztrát, bude pro zajištění paliva uvažované elektrárny o výkonu 1 GWe stačit několik desítek krychlových metrů vody denně.

Tab. 3.3 Spotřeba vody.

Hmotnostní výskyt HDO ve vodě [13]	$3,12 \times 10^{-2}$	%
Hmotnostní výskyt D2O ve vodě [13]	$2,44 \times 10^{-6}$	%
Množství deuteria v 1 m^3 vody	0,033	kg
Denní množství vody nutné pro separaci deuteria v elektrárně o elektrickém výkonu 1 GWe v případě 100% výtěžnosti deuteria	25,0	m^3



Při separaci deuteria z vody dojde ke snížení jeho lokální koncentrace v místě návratu vody do vodního zdroje. Přírodní procesy, difúze a proudění vody, budou přirozeně a nepřetržitě tuto koncentraci vyrovnávat s okolní vodou bez zásahu člověka. Protože čerpání deuteria bude probíhat v malých množstvích v řádu několika kilogramů denně a chemické vlastnosti vodíkových izotopů jsou identické, vliv na životní prostředí bude zanedbatelný. Pro srovnání, přirozený únik vodíku a helia ze Země do vesmíru dosahuje až 90 milionů kg ročně a naopak jejich přírůstek z vesmíru činí přibližně 40 milionů kg ročně [A16].

Primární dostupnost lithia, druhé složky dočasného DLi paliva, je dána jeho nerostnou povahou. Současná těžba lithia probíhá ve velkých suchozemských nalezištích v Chile, Bolívii, USA, Číně a Austrálii. Velké zásoby lithia jsou také u nás v Krušných horách nebo v Srbsku. V oceánech je až 10 000 krát více lithia než na pevnině, avšak s koncentrací o několik řádů nižší. Přes nízkou koncentraci zásoby lithia v oceánech potenciálně nabízejí podobně neomezenou dostupnost jako deuterium. Konkrétní zdroj lithia pro fúzní reaktory bude záviset na vývoji ceny lithia ze suchozemských nalezišť na komoditním trhu. Cílem vývoje fúzních technologií ale bude rychlý přechod fúzní energetiky na DD palivo a vyloučení lithia z palivového cyklu.

Využití jaderné fúze dalších prvků, např. vodíku a bóru, dále rozšíří zásoby fúzního paliva. V antropogenním časovém měřítku používaném pro hodnocení obnovitelných zdrojů energie, tj. v období srovnatelném s délkou existence lidstva, lze proto zásoby fúzního paliva v antropogenním prostoru považovat za nevyčerpatelné a dobře dostupné [A16].

Fúzní zdroje energie nebudou vytvářet žádné emise. Jde o bezuhlíkovou metodu výroby elektrické energie, při které se neuvolňují žádné skleníkové plyny. Odpadem fúzní reakce bude přírodní inertní plyn helium, kterého je na Zemi nedostatek. Fúzní elektrárna o elektrickém výkonu 1 GWe vyprodukuje 0,5 - 1,1 kg helia denně (tab. 3.4). Helium je základním chladivem používaným v kryogenní technice a ve fúzních elektrárnách se bude používat především pro chlazení supravodivých magnetických cívek. Vyprodukované helium proto bude využito přímo v elektrárně na doplnění chladicích systémů.

Tab. 3.4 Produkce helia.

Orientační množství vyprodukovaného helia při DT reakci v elektrárně o výkonu 1 GWe	~ 1,06	kg/den
Orientační množství vyprodukovaného helia při DD reakci v elektrárně o výkonu 1 GWe	~ 0,55	kg/den



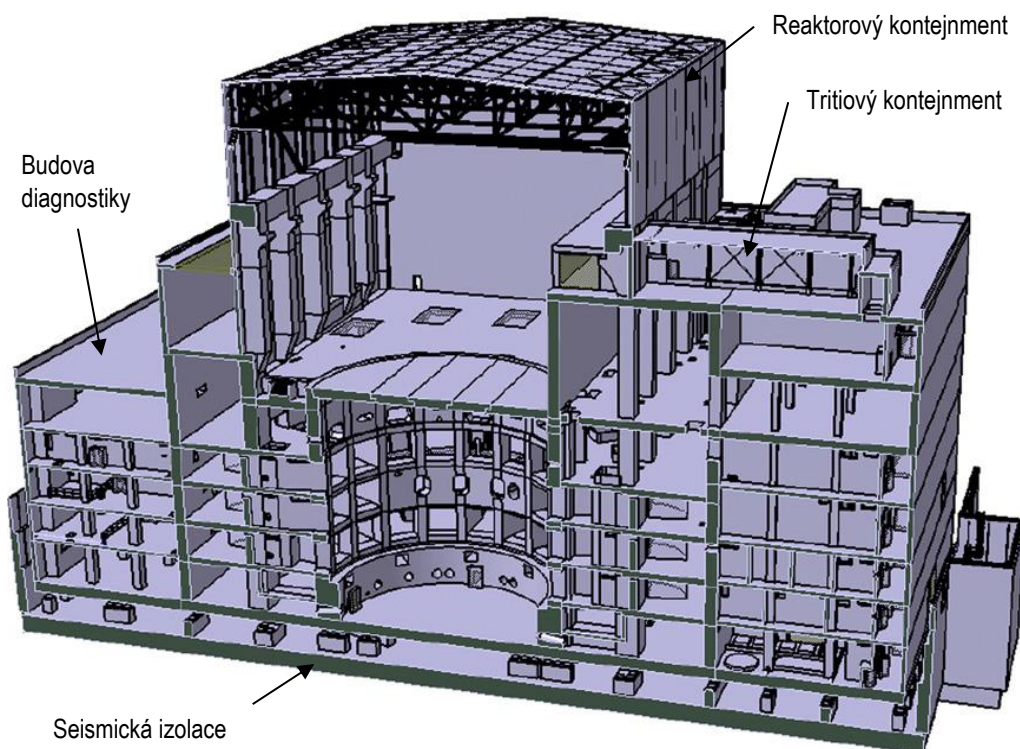
Protože jaderná fúze probíhá při jakémkoliv množství reaktantů, bude důležitým aspektem inherentní bezpečnosti fúzních reaktorů malé množství fúzního paliva v reaktoru v řádu gramů. Palivo bude do reaktoru průběžně doplňováno a v případě zastavení palivového systému dojde k přirozenému zastavení fúzní reakce. Malé množství paliva v reaktoru také umožní rychlé a nedestruktivní ochlazení paliva prostým kontaktem s konstrukcí reaktoru. Vzhledem k malému množství paliva nepředstavuje bezpečnostní riziko ani jeho havarijní únik z reaktoru [A17].

Podobně jako u štěpných jaderných elektráren bude fúzní reaktor umístěn v ochranném kontejnmentu, jehož úkolem bude zabránit při mimořádných událostech rozšíření radioaktivních látek (tritia a sekundárně aktivovaných materiálů jaderné zóny reaktoru) mimo kontrolovaný prostor. V druhém ochranném kontejnmentu bude umístěno tritiové hospodářství. V tritiovém kontejnmentu bude probíhat extrakce deuteria a tritia z transportních médií, uskladnění provozní zásoby deuteria a tritia, uskladnění ^3He vznikajícího rozpadem tritia a příprava fúzního paliva. V obou ochranných kontejnmentech bude probíhat kontinuální detritiace vzduchu.

Pro provoz fúzní elektrárny bude nezbytné udržovat provozní zásobu fúzního paliva. V první generaci fúzních elektráren využívajících DT reakci si provozní zásoba paliva vyžádá uskladnění několika kg tritia v tritiovém kontejnmentu. Uskladněné tritium s aktivitou na úrovni $\sim 10^6$ TBq bude představovat největší bezpečnostní riziko fúzních elektráren první generace. Tritium je velice slabý β zářič, který se s poločasem 12,3 let rozpadá na stabilní izotop helia ^3He . K jeho odstínění stačí 6 mm vzduchu nebo 1 μm kovu. Zdravotní nebezpečí však hrozí při jeho požití, vdechnutí, anebo pokud se jinou cestou dostane do organismu, kde se může hromadit a z blízkosti ozařovat tělesné tkáně. Důležitou vlastností tritia, stejně jako všech izotopů vodíku, je vysoká permeabilita, která znesnadňuje jeho skladování. Úniku tritia ze skladovacích nádrží lze ale efektivně zabránit vícestěnnými zásobníky. V případě úniku plynného tritia mimo kontejnment bude hrát roli, že jde o velmi lehký plyn, který bude přirozeně stoupat vzhůru a rychle se rozptýlovat do atmosféry.

Rizikovým faktorem z hlediska úniku tritia bude zemětřesení a jeho doprovodné jevy. Seismická ochrana musí v maximální míře garantovat celistvost úložiště tritia a obou kontejnmentů a bude zajištěna prostřednictvím řady aktivních a pasivních opatření. Pasivní opatření spočívají především v uložení reaktorového a tritiového kontejnmentu na společnou seismickou izolaci, která utlumí otřesy kontejnmentů a minimalizuje riziko poškození

fúzních zařízení a potrubních rozvodů. Mezi aktivní antiseismická opatření patří především monitorovací systém a systém včasného varování před přicházejícím zemětřesením, který zastaví probíhající fúzní reakci v reaktoru ochlazením plazmatu, odstaví fúzní technologie a uzavře zásobníky paliva [A31],[A32]. Reaktorový komplex ITER a seismické izolátory reaktoru jsou zobrazeny na obr. 3.3 a 3.4.



Obr. 3.3 Reaktorový komplex ITER - budova diagnostiky, reaktorový kontejnment, tritiový kontejnment [A31].



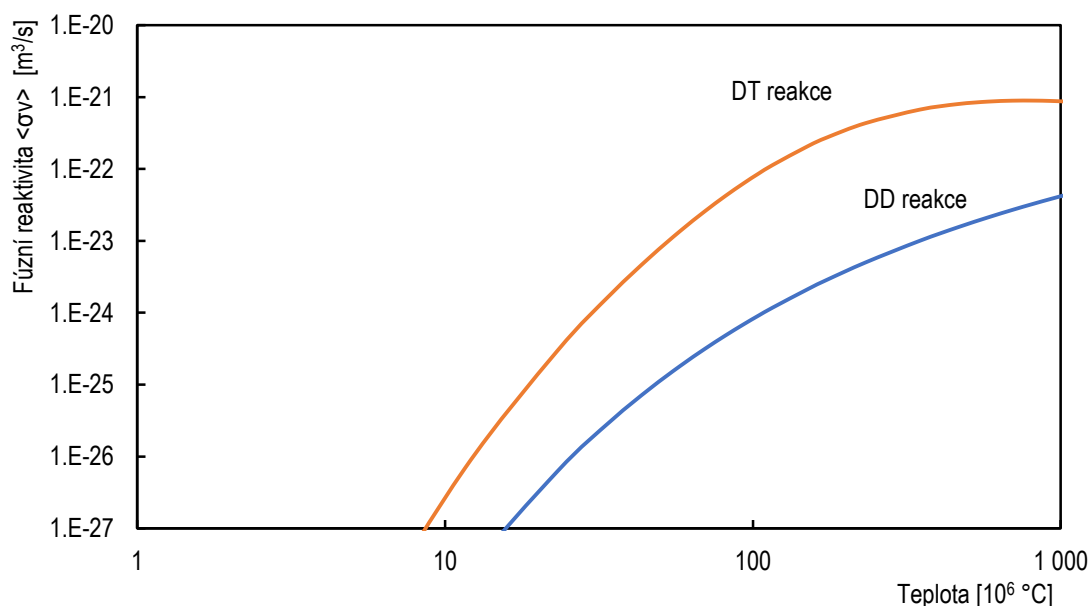
Obr. 3.4 Seismické izolátory reaktoru ITER [A31].



V dlouhodobém výhledu nejprve dojde k přechodu od DT reakce k DD reakci. Tím odpadne nutnost vyrábět a skladovat tritium. Bezneutronová fúze v budoucnu prakticky vyloučí sekundární aktivaci reaktorové konstrukce. Pokročilé fúzní reaktory budoucnosti proto budou provozovány bez jaderných bezpečnostních rizik.

3.3 Vysoká teplota paliva

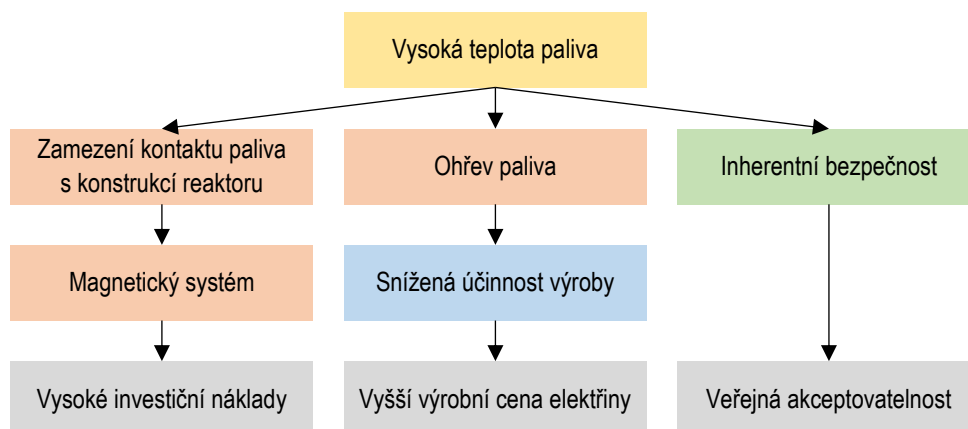
Fundamentálním rysem termojaderné fúze je, že probíhá pouze při velmi vysokých teplotách paliva (obr. 3.5). Optimální teplota, při které je četnost reakcí nejvyšší, je v reaktorech s magnetickým udržením pro DT plazma přibližně 160 milionů °C, pro DD plazma přibližně 175 milionů °C a pro bezneutronovou fúzi vodíku a bóru 1,4 miliardy °C.



Obr. 3.5 Fúzní reaktivita reakcí DT a DD v závislosti na teplotě reaktantů.

Vysoká teplota paliva determinuje celý návrh fúzního reaktoru. Zjednodušený strom kauzálních vztahů vysoké teploty paliva ukazuje obr. 3.6.

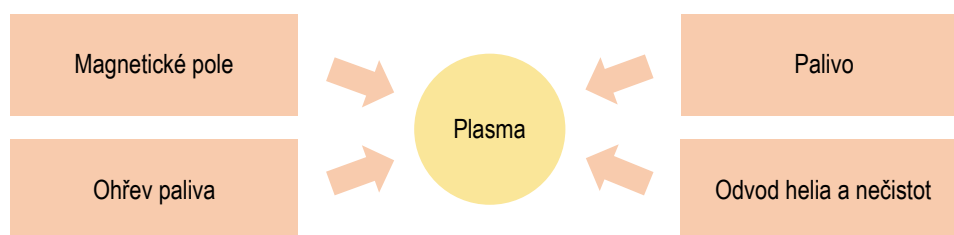
Především je nutné zamezit kontaktu horkého paliva s konstrukcí reaktoru. Reaktory typu tokamak pro tento účel využívají magnetické pole. Fyzika termojaderného plazmatu v magnetickém poli je ale velmi komplikovaná a vyžaduje náročný výzkum. V plazmatu vznikají nestability, které se projevují stochastickým zatěžováním komponent vystavených plazmatu výkonovými špičkami. Tyto špičky mohou lokálně poškodit povrch komponent, avšak velmi malé množství horkého paliva v reaktoru a celkově nízká energie plazmatu zaručují okamžité ochlazení paliva pouhým kontaktem s povrchem komponent.



Obr. 3.6 Zjednodušený strom kauzálních vztahů vysoké teploty paliva. (Barvy rámečků odpovídají rozdělení do úrovní podle obr. 2.1.)

Ohřev paliva na vysoké teploty vyžaduje sofistikovaný systém ohřevu, jehož spotřeba bude hrát významnou roli v energetické bilanci fúzní elektrárny. Výkon ohřevu absorbovaný v plazmatu však bude obecně vyzářen zpět jako součást tepelného výkonu reaktoru a znovu využit pro výrobu elektrické energie. Čistá účinnost elektrárny proto nebude snížena spotřebou systému ohřevu HCD, ale pouze ztrátami při recirkulaci výkonu ohřevu. Vliv ohřevu paliva je podrobně analyzován v kapitole 4.

Jaderná bezpečnost fúzních reaktorů vychází z faktu, že udržení vysoké teploty paliva a probíhající fúzní reakce v reaktoru vyžadují aktivní součinnost řady reaktorových technologií. V případě selhání nebo odstavení kterékoliv z těchto technologií dojde k přirozenému ukončení reakce.



Obr. 3.7 Nezbytná podpora průběhu fúzní reakce.

Hlavní systémy nezbytné podpory průběhu fúzní reakce jsou zobrazeny na obr. 3.7:

- Magnetické pole – porucha magnetického pole způsobí kontakt plazmatu s první stěnou, který vyvolá okamžité ochlazení plazmatu a zastavení fúzní reakce.



- Ohřev paliva – při výpadku ohřevu paliva dojde k jeho postupnému ochlazení a zastavení fúzní reakce (s výjimkou stavu zapálení plazmatu, ve kterém se plazma ohřívá autonomně). Při neinduktivní generaci elektrického proudu způsobí výpadek ztrátu udržení plazmatu a jeho ochlazení kontaktem s první stěnou.
- Palivo – při zastavení dodávky paliva se fúzní reakce přirozeně zastaví.
- Odvod helia a nečistot - nárůst koncentrace helia, které je produktem fúzních reakcí, sníží koncentraci paliva a tím způsobí útlum fúzní reakce. S množstvím nečistot roste vyzařování energie z plazmatu a plazma chladne. Ochlazením plazmatu se zastaví fúzní reakce. Tímto způsobem lze fúzní reakci podle potřeby zastavit vstříknutím plynu do plazmatu.

Protože ve fúzním reaktoru nemůže jaderná reakce fyzikálně probíhat bez aktivní podpory reaktorových technologií, je fúzní reaktor inherentně (vnitřně) bezpečný zdroj energie. To spolu s minimálním množstvím paliva v reaktoru přinese zásadní změnu do bezpečnosti jaderných elektráren. Fúzní reaktory budou stejně jako štěpné reaktory uvolňovat vazebnou energii atomového jádra, avšak odlišný způsob jejího uvolňování odstraní riziko nekontrolované jaderné reakce.

Vysoká teplota paliva z technického hlediska předurčuje provoz prvních generací fúzních elektráren v režimu base-load, ale v budoucnu bude možné provozovat fúzní reaktory v případě potřeby i v režimu peak-load. Dosažení požadované teploty paliva by mohlo proběhnout v závislosti na výkonu systému HCD relativně rychle (v řádu minut), problémem jsou teplotní cykly zvyšující termomechanickou zátěž konstrukce reaktoru. Vykrytí energetických špiček budoucími fúzními zdroji v režimu peak-load je proto podmíněno vyvinutím dostatečně odolných materiálů a konstrukcí komponent jaderné zóny.

3.4 Vysoký energetický tok

Jaderné komponenty budou vystavené vysokému energetickému toku z plazmatu tvořenému neutronovým zářením, tepelnou radiací horkého plazmatu a tepelnou kondukcí při přímé interakci s horkým plazmatem. Tento tok způsobí degradaci konstrukčních materiálů komponent. Zjednodušený strom kauzálních vztahů vysokého energetického toku ukazuje obr. 3.8.

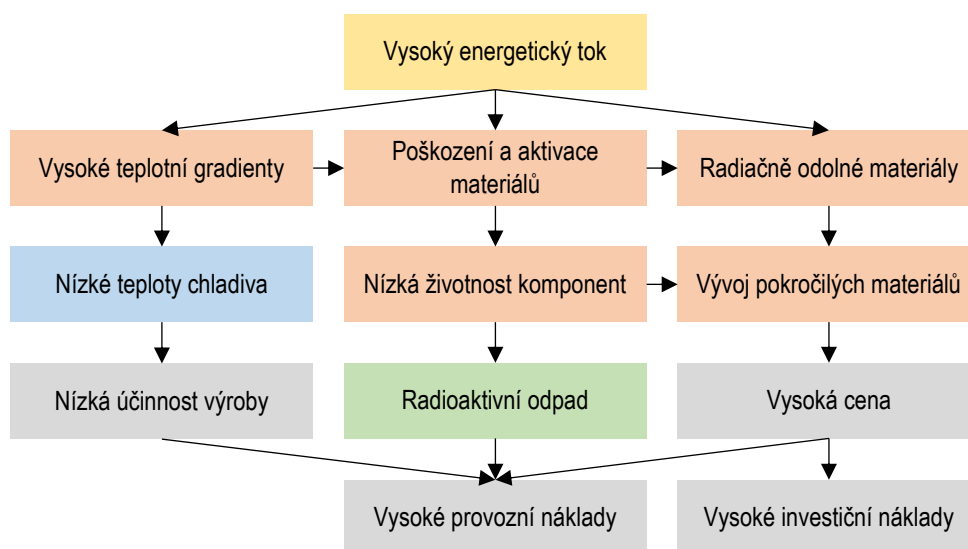
Neutronové zatížení první stěny reaktoru ITER dosáhne 10^{18} n/m²s při energii neutronů 14 MeV [5] a vyvolá za dobu životnosti reaktoru poškození materiálů až 5,3 dpa [5].



V energetických reaktorech se neutronové zatížení první stěny předpokládá v rozmezí 10^{17} - 10^{18} n/m²s [6],[7]. Poškození materiálů komponent by za 40 let provozu reaktoru dosáhlo až 500 dpa, pokud by nedošlo k jejich výměně [4]. U první verze blanketu elektrárny DEMO se za několikaletou dobu životnosti modulů omezenou působením vysokých tepelných toků předpokládá poškození do 20 dpa [4]. Energetická hustota neutronového toku dosáhne 1,5-2,5 MW/m².

Nominální tepelné zatížení první stěny bude v reaktoru ITER i v energetických reaktorech v rozmezí 0,5–5 MW/m² v závislosti na poloidální poloze v reaktoru [5]-[7]. Při některých nestabilitách plazmatu (konkrétně při nestabilitě označované jako ubíhající elektrony – runaway electrons) může špičková hustota tepelného toku vzrůst na krátkou dobu až na 50 GW/m² [17]. Vzhledem k nízké celkové energii plazmatu jsou špičkové zátěže omezeny na velmi krátkou dobu. Proto se jejich vliv projeví pouze natavením nebo odpařením tenké povrchové vrstvy exponovaných komponent [18].

Jedním z důsledků vysokých tepelných toků na povrch komponent vystavených plazmatu bude vznik vysokých teplotních gradientů v tepelně zatížené stěně. Udržení pracovní teploty exponovaného povrchu bude při vysokém teplotním gradientu vyžadovat nízké teploty chladiva. Vysoké tepelné toky tak nepřímou vyvolají snížení termodynamické účinnosti výroby elektrické energie. Proto mezi hlavní cíle výzkumu fyziky plazmatu a konstrukce fúzních reaktorů patří odstranění nebo snížení vysokých tepelných toků [19].



3.8 Zjednodušený strom kauzálních vztahů vysokého energetického toku. (Barvy rámečků odpovídají rozdělení do úrovní podle obr. 2.1.)



Divertorové terče budou díky své poloze a sklonu méně zatíženy neutronovým tokem než první stěna. Neutronové poškození materiálu divertoru reaktoru ITER se předpokládá do výše 3 dpa za životnost reaktoru [5]. V energetických reaktorech by neutronové poškození materiálů terčů za 40 let provozu bez výměny dosáhlo až 300 dpa [4]. Vzhledem k omezení jejich životnosti vlivem souběžného působení neutronového toku a vysokých tepelných toků se předpokládá jejich průběžná výměna, díky které radiační poškození modulů nepřesáhne 20 dpa [4].

Terče budou nepřetržitě interagovat s dopadajícím horkým plazmatem. Projektovaná nominální tepelná zátěž divertorových terčů reaktoru ITER je 5 - 10 MW/m² [5] v závislosti na poloze vůči dopadajícímu plazmatu. V případě energetických reaktorů může kontinuální nominální tepelná zátěž terčů dosáhnout na malé ploše až 150 MW/m² [4]. Pulsní výkonové špičky v divertoru mohou při nestabilitách plazmatu dosáhnout hustoty toku až 20 GW/m² [A33]. Materiálové a konstrukční řešení divertorových terčů odolné vůči vysoké neutronové a tepelné zátěži představuje jednu z hlavních výzev fúzního výzkumu.

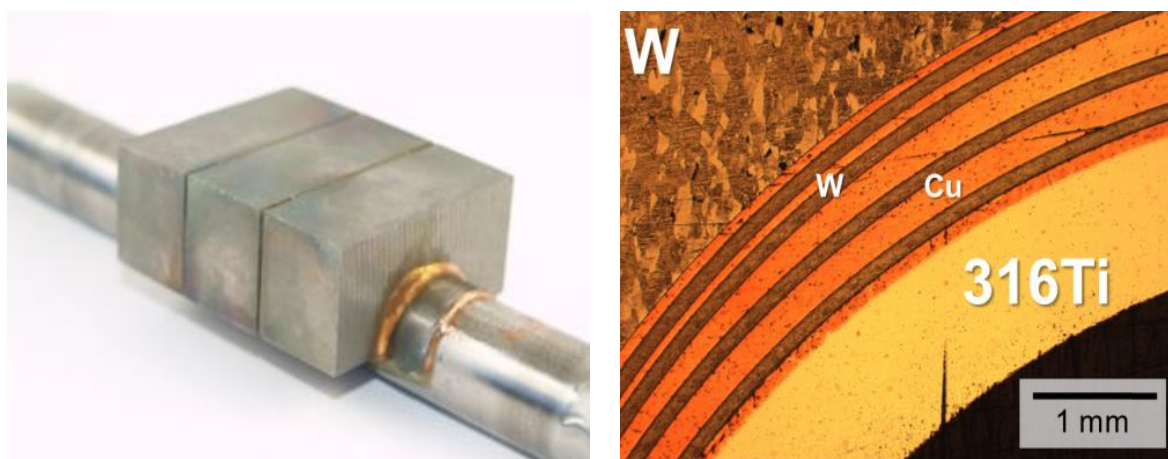
Výzkum se soustředí především na pokročilé wolframové materiály, které nabízejí lepší termomechanické parametry, především vyšší tepelnou vodivost a vyšší odolnost proti křehnutí a vzniku trhlin. V tabulce 3.5 jsou uvedeny současné varianty řešení divertorových terčů chlazených tlakovou vodou vyvíjených v rámci návrhu evropského reaktoru DEMO [A6]: wolframové lamináty, wolframové kompozity, wolframové funkčně gradované materiály, konstrukční řešení s tepelnou bariérou nebo kombinace wolframu s chrómem.

Tab. 3.5 Varianty provedení divertorových terčů DEMO [A6].

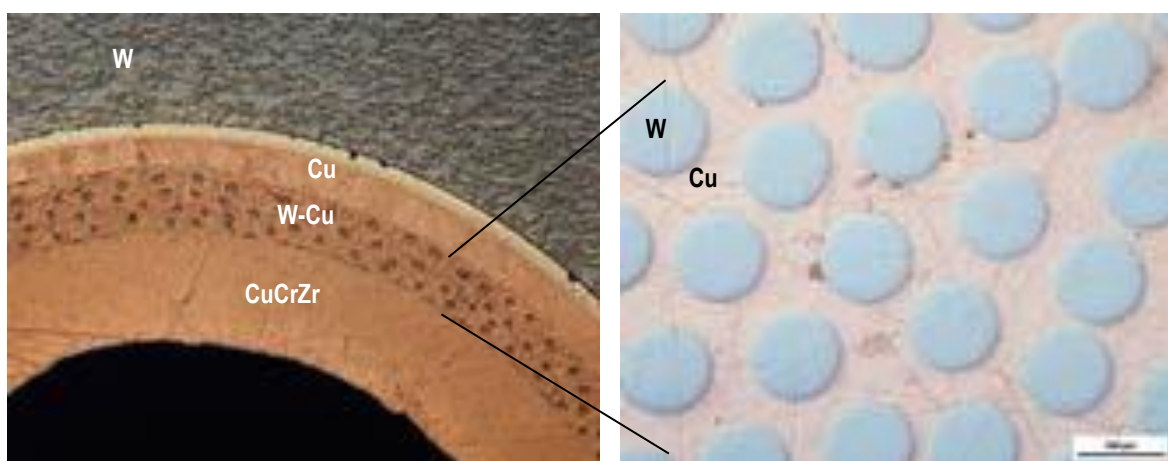
Koncept	Povrch	Mezivrstva	Chladič	Charakteristiky
Monoblok	W	Cu	CuCrZr	základní varianta (ITER)
Laminát	W	W/Cu	AISI 316Ti	termomechanická odolnost
Kompozit	W	W/Cu	CuCrZr	termomechanická odolnost
Funkčně gradovaný materiál	W	W/Cu	CuCrZr	zvýšená tepelná vodivost
Tepelná bariéra	W	Cu pěna	CuCrZr	úprava pracovního pásma
Chróm	W	Cr/Cu	CuCrZr	pevnost a odolnost

Wolframové lamináty jsou tvořeny prokládanými wolframovými a měďnými vrstvami (obr. 3.9). Kombinace wolframu a mědi zvyšuje tepelnou vodivost materiálu a současně

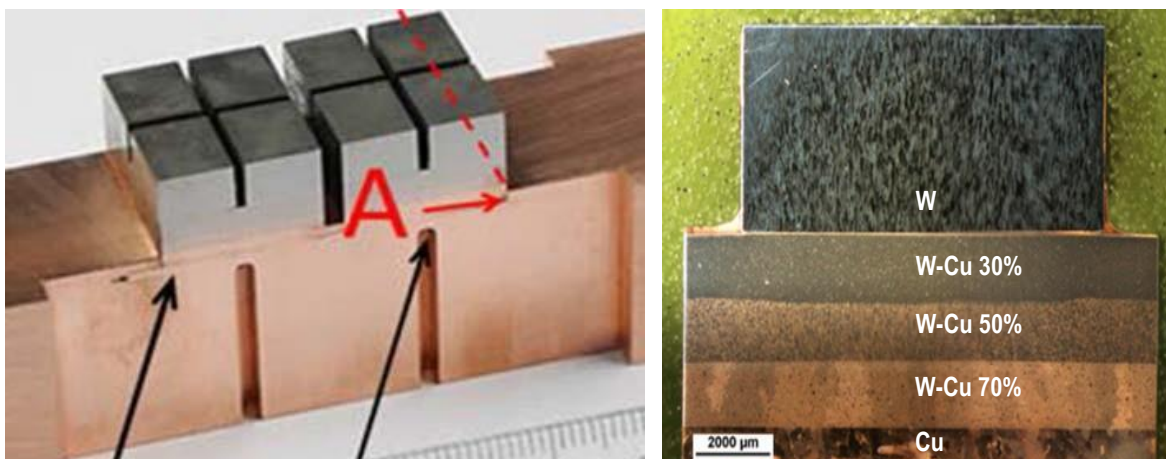
brání šíření prasklin. Wolframové kompozity zvyšují odolnost wolframového materiálu vůči teplotním cyklům nahrazením monobloku wolframu wolframovými vlákny nebo integrací wolframových vláken do mědi (obr. 3.10). Wolframové funkčně gradované materiály (FGM) jsou založeny na postupném přechodu nejčastěji mezi mědí a wolframem se zlepšenou tepelnou vodivostí při zachování vysoké odolnosti povrchové vrstvy materiálu (obr. 3.11). Specifickým řešením zlepšení termomechanických vlastností terčů je vložení tepelné bariéry z měděné pěny mezi wolframový monoblok a chladicí kanál (obr. 3.12). Tepelná bariéra způsobí zvýšení pracovní teploty wolframu nad pásmo křehnutí a současně se vyrovnáním teplot v objemu monobloku wolframu sníží vnitřní termomechanické napětí.



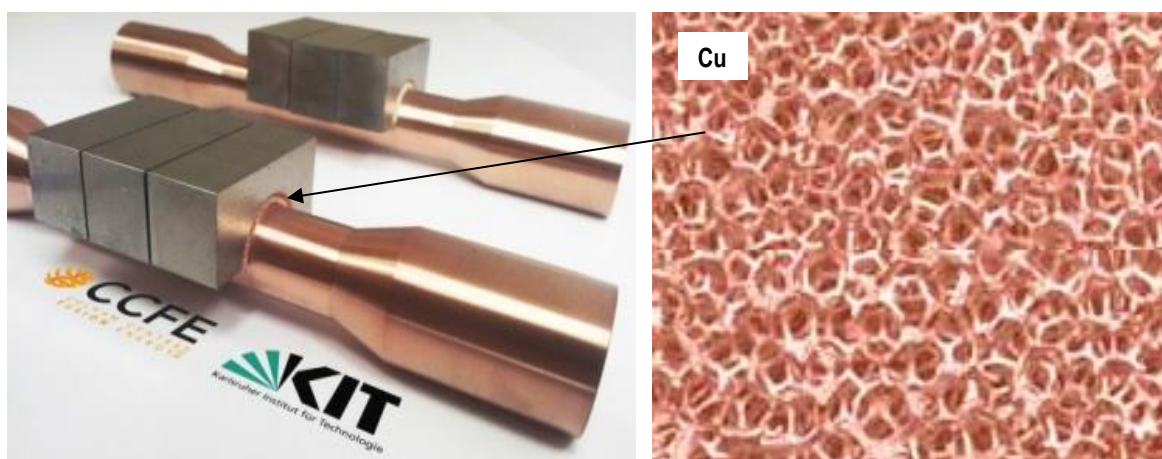
Obr. 3.9 Divertorový terč s wolframovým laminátem. Wolframová fólie je prokládána měděnou fólií (KIT, Německo).



Obr. 3.10 Divertorový terč s wolframovým kompozitem. Mechanické vlastnosti mědi jsou zlepšeny wolframovými vlákny (IPP Garching, Německo).



Obr. 3.11 Divertorový terč s funkčně gradovanými materiály W-Cu. Spoj kovů je tvořen postupným přechodem mezi mědí a wolframem (IPP Garching, Německo).



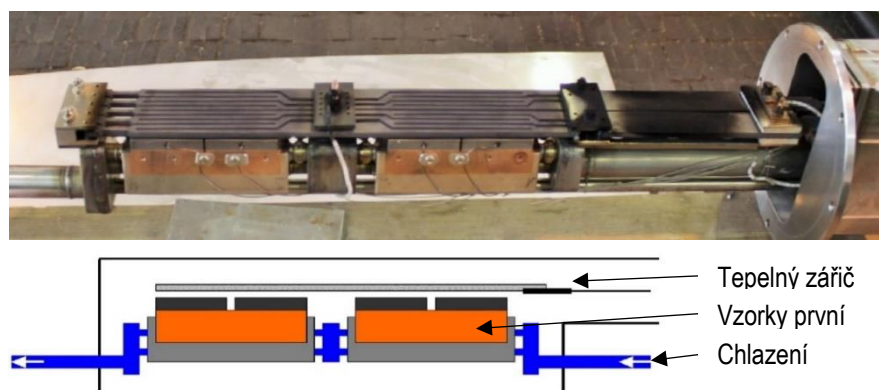
Obr. 3.12 Divertorový terč s tepelnou bariérou z Cu-pěny. Měděná pěna zvyšuje pracovní teplotu wolframu nad oblast křehnutí (CCFE Culham, Anglie).

Jinou zvažovanou možností je provedení terčů z tekutého kovu. Tekutý kov dobře snáší vysoké neutronové i tepelné zatížení, přináší ale současně řadu komplikací, především nebezpečí znečištění plazmatu a vnitroreaktorových povrchů. Proto je jeho využití podmíněno dalším výzkumem [A34]. Opačnou cestou řešení nedostatečné odolnosti divertorových terčů je snížení jejich špičkové tepelné zátěže, například rozmítáním dopadajícího plazmatu na větší plochu terčů navržené v [A33].

Jedním z předpokladů úspěšného vývoje jaderných komponent fúzních energetických reaktorů je jejich testování relevantní neutronovou fluencí umožňující dosáhnout poškození materiálů komponent odpovídajícího jejich plánované životnosti. Z hlediska časové realizovatelnosti testů to předpokládá neutronový tok vyšší než 10^{18} n/m²s při energii

neutronů blízké 14 MeV. Výstavba zařízení, které by testování umožnilo, je plánována již od devadesátých let minulého století na základě tehdejší dohody mezi EU, Japonskem, Ruskem a USA. Zařízení se označuje zkratkou IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) a mělo dosáhnout radiačního poškození testovaného materiálu více než 20 dpa/rok (Fe) [20]. Pravděpodobně z důvodu nedostatku finančních prostředků však z jeho výstavby prozatím sešlo. V Evropě probíhá příprava menšího ozařovacího zařízení DONES (DEMO Oriented Neutron Source) s polovičním výkonem oproti IFMIF [21], avšak ani tento projekt nemá doposud zajištěné financování. Na světě tak neexistuje a ani není ve výstavbě zařízení, které by umožnilo otestovat jaderné komponenty neutronovou fluencí odpovídající fúzním energetickým reaktorům.

Výzkum se proto soustředí na ozařování malých vzorků materiálů a konstrukcí v experimentálních štěpných reaktorech. Ačkoliv se neutronové spektrum štěpných reaktorů významně liší od spektra fúzních reaktorů, jde o nejlepší dostupné testy. V tomto segmentu zastává důležité místo jaderný reaktor LVR-15 v Řeži u Prahy. Neutronový tok rychlých neutronů v pásmu 1 – 20 MeV dosahuje v závislosti na poloze v aktivní zóně reaktoru 10^{15} – 10^{17} n/m²s a dosažitelné poškození materiálu je přibližně 2 dpa/rok (Fe). V uplynulých 15 letech v LVR-15 proběhla řada ozařovacích testů shrnutých v [A29]. Mimořádným úspěchem bylo testování vzorků první stěny neutronovým tokem a tepelným cyklováním. Byla vyvinuta reaktorová sonda umožňující v aktivní zóně reaktoru cyklicky ohřívat vzorky první stěny reaktoru ITER tepelným tokem 0,5 MW/m² (obr. 3.13). Při souběžném neutronovém a tepelném ozařování bylo při radiačním poškození 0,55 dpa (Fe) dosaženo rekordních 17 000 teplotních cyklů. Vzorky první stěny při testech prokázaly vysokou odolnost a byla ověřena technologie spojování jednotlivých materiálů vzorků HIP [A35].



Obr. 3.13 Reaktorová sonda TW3 pro testování vzorků první stěny [A35].



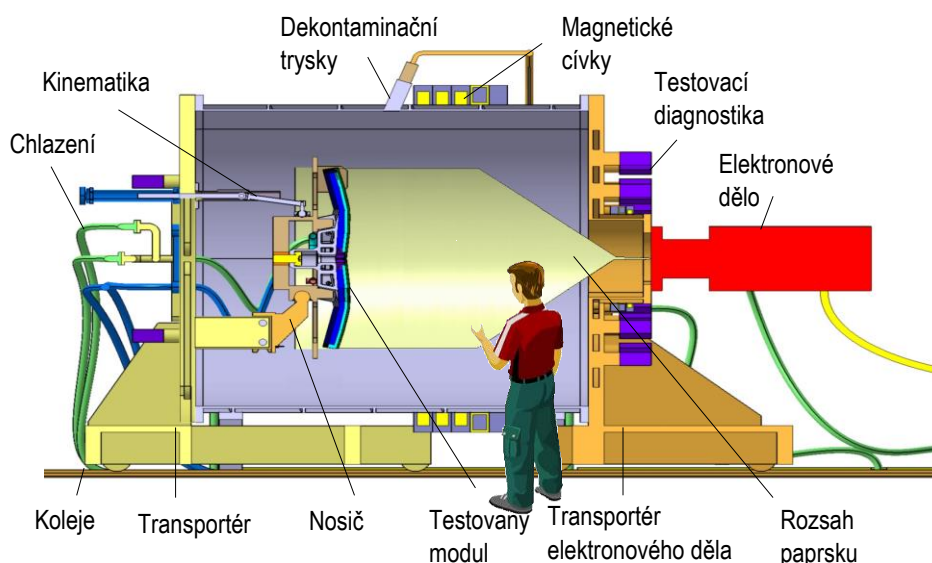
V reaktoru také průběžně probíhají ozařovací testy komponent vyvíjených pro reaktor DEMO, jednak Hallových senzorů (kap. 5) a jednak vysokoteplotních supravodičů HTS (High-Temperature Superconductor) s cílem popsat vliv neutronového záření na jejich funkčnost [A36].

V oblasti testování vysokým tepelným tokem mají výzkumné organizace k dispozici řadu testovacích zařízení využívajících pro simulaci ohřevu povrchu výkonné zdroje elektronů nebo protonů. Elektronový svazek lépe simuluje radiační tepelný tok, protonový svazek lépe simuluje interakci horkého plazmatu s povrchem. S blížící se kompletní reaktoru ITER bylo rozhodnuto o výstavbě několika zařízení pro tepelné testování plnoformátových prototypů a sériových modulů komponent vystavených plazmatu reaktoru ITER. První takové zařízení bylo postaveno v Rusku, druhé v Jižní Koreji a třetí je zprovožňováno v České republice.

Pro testování evropských modulů první stěny a divertorových terčů byl evropskou agenturou pro výstavbu reaktoru ITER Fusion for Energy v Barceloně vybrán technický návrh zařízení HELCZA autora této práce [A37]. Tento návrh pak byl pod jeho vedením rozpracován ([A38]-[A43]) do stavu souborného řešení [A44], které agentura schválila v roce 2015.

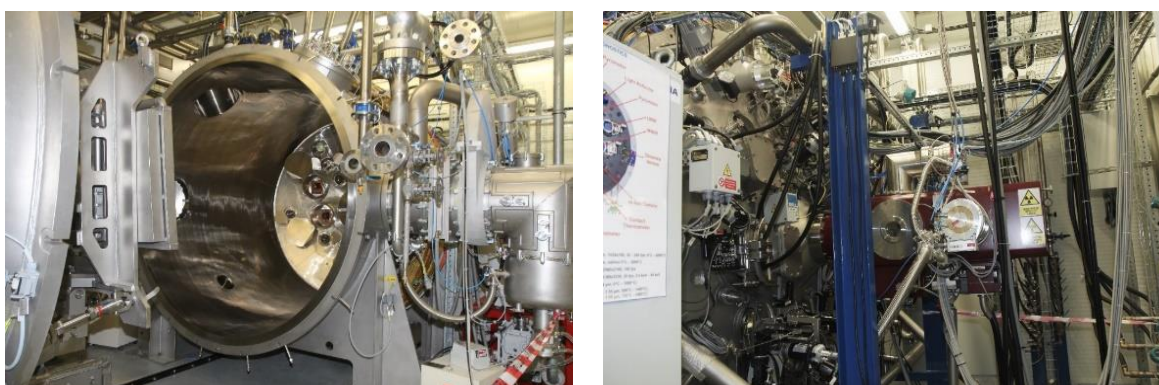
Testovací komplex HELCZA (High Energy Load Czech Assembly) nabídne ve srovnání s ostatními zařízeními širší portfolio testů, nejvyšší výkon ohřevu, věrnější simulaci tepelného toku z plazmatu, variabilnější testovací parametry a přesnější diagnostiku. HELCZA byla navržena jako multifunkční testovací komplex, zahrnující nedestruktivní infračervené testování, přesné termohydraulické testování v rozsahu od pokojových parametrů až po parametry tlakovodních reaktorů PWR/VVER a zátěžové testování cyklickým vysokým tepelným tokem.

HELCZA je vybavena elektronovým dělem o výkonu elektronového svazku 800 kW a unikátním magnetickým fokusačním systémem (obr. 3.14), který umožní ozařovat povrch testovaných modulů v širokém rozsahu úhlů dopadu elektronového svazku. Základní funkcí HELCZA je cyklické zatěžování modulů první stěny a divertorových terčů vysokým tepelným tokem a jejich diagnostika. Testovací absorbovaná tepelná zátěž od 0,5 do 20 MW/m² si vyžádá se započtením odrazivosti povrchu komponent povrchovou zátěž elektronovým paprskem v rozsahu 0,52 – 40 MW/m². Vyšší tepelné toky do ~ 40 GW/m² umožní testování materiálů při simulaci tepelného působení nestabilit plazmatu.



Obr. 3.14 Model vakuové nádoby experimentálního komplexu HELCZA.

Magnetická deflece výkonového elektronového paprsku umožní simulovat vektor dopadajícího tepelného toku v souladu s podmínkami ve fúzním reaktoru. Testovat bude možné prototypové, předsériové a sériové moduly do velikosti $\sim 2,25 \text{ m}^2$. Prototypy budou testovány dlouhodobým zátěžovým teplotním cyklováním, sériové moduly budou testovány funkčním testem ověřujícím jejich chladicí kanály a nepoškozenou strukturu před instalací do reaktoru [A44]. V současnosti (5/2018) je testovací komplex HELCZA ve fázi zprovoznování (obr. 3.15) a již proběhla řada úspěšných zkoušek [A45].



Obr. 3.15 Vakuová nádoba a elektronové dělo experimentálního komplexu HELCZA.

Neutronová a tepelná zátěž jaderných komponent fúzních energetických reaktorů bude natolik vysoká, že současné technologické možnosti neumožňují zajistit životnost jaderných komponent po celou dobu provozu fúzní elektrárny. Průměrná životnost divertorových terčů



se odhaduje na 4,5 roku, životnost modulů první stěny a blanketu na 10 let [6],[7]. Reálná životnost komponent bude záviset především na počtu a velikosti výkonových špiček vyvolaných nestabilitami plazmatu.

Při pravidelných odstávkách elektráren bude prováděna detailní prohlídka jaderných komponent v reaktoru a poškozené nebo limitně opotřebené moduly budou vyměněny. Tyto úkony budou probíhat v prostředí silné radiace z jaderných komponent aktivovaných fúzními neutrony a za vysokých teplot až 500 °C způsobených tepelnou setrvačností a uvolňovaným zbytkovým teplem. Poškozené moduly jaderných komponent budou robotickými dálkovými manipulátory vyjmuty z reaktoru a nahrazeny novými moduly. Vyjmuté moduly budou převezeny do skladu radioaktivního odpadu a později recyklovány. Komponenty jaderné zóny budou vyráběny z materiálů odolných proti radiačnímu poškození a bez chemických prvků způsobujících po ozáření dlouhodobou vysokou radioaktivitu, například z nízkoaktivovatelných ocelí RAFMS nebo wolframu, a proto bude možné odpad recyklovat již po 50-100 letech od vyjmutí z reaktoru [4].

Náročný vývoj, použití pokročilých materiálů a nízká životnost jaderných komponent významně zvýší investiční a provozní náklady fúzních elektráren. Nízká životnost komponent také zvýší množství sekundárně aktivovaného radioaktivního odpadu.

3.5 Vliv na životní prostředí

Na základě rysů fúzních zdrojů energie popsaných v předchozích kapitolách lze sestavit souhrnnou environmentální charakteristiku [A16].

Fúzní zdroje energie:

- jsou přírodní,
- jsou inherentně bezpečné,
- jsou bezemisní,
- využívají palivo, které se nalézá v antropogenním prostoru v dosahu činnosti lidstva a je v antropogenním časovém měřítku nevyčerpatelné,
- využívají palivo, které je při čerpání průběžně doplňované přírodními přirozenými procesy a toky a vrací se do svého původního stavu (s výjimkou dočasného využití lithia za suchozemských nalezišť),
- produkují recyklovatelný odpad,
- nepoškozují životní prostředí a mohou být proto použity znovu a znovu,



- umožňují získávat konstantní vysoký energetický výkon.

Z uvedené charakteristiky vyplývá, že jaderná fúze splňuje veškeré požadavky kladené na obnovitelné zdroje energie (OZE) [A16]. Negativní vliv na životní prostředí fúzních zdrojů může být nižší než vliv OZE, protože výroba elektřiny nebude závislá na počasí, nebude ovlivňovat rozsáhlé biotopy a nebude vyžadovat rozsáhlé zásokové fosilní zdroje.

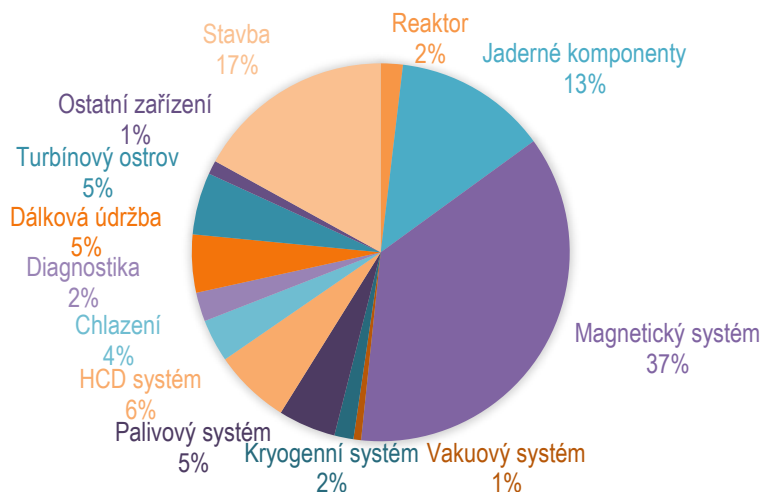
Bez ohledu na skutečnost, že jaderná fúze splňuje všechny požadavky kladené na OZE, mezi OZE není zařazena [A18]. Důvodem je politicko-administrativní pojetí kategorie OZE a předpojatý postoj ekologických odborníků [22].

3.6 Cena vyráběné elektřiny

Pro kvalitativní ekonomické porovnání budoucích fúzních elektráren s jinými typy elektráren byla provedena ex-ante analýza jejich technicko-ekonomické efektivity. Pro analýzu byl zvolen evropský referenční model demonstrační fúzní elektrárny DEMO2 [7]. Parametry elektrárny jsou uvedeny v tab. 1.1. Model byl sestaven ve Středisku pro fúzní energetiku CCFE v britském Culhamu a v současnosti představuje jeden z nejpřesnějších odhadů nákladů na výstavbu a provoz fúzních elektráren [A46]. Investiční náklady fúzní elektrárny DEMO2 v cenách roku 2015 jsou shrnuty v tabulce 3.6. Uvedené náklady jsou typu “overnight costs” a nezahrnují cenu peněz. Z obr. 3.16 je patrný poloviční podíl nákladů určený pro systém magnetického udržení plazmatu a jaderné komponenty.

Tab. 3.6 Investiční náklady (overnight costs) referenčního modelu DEMO2 [7].

Reaktor bez jaderných komponent	114	M\$
Jaderné komponenty	793	M\$
Magnetický systém	2216	M\$
Vakuový systém	39	M\$
Kryogenní systém	99	M\$
Palivový systém	298	M\$
Systém ohřevu HCD	395	M\$
Chlazení	221	M\$
Diagnostika	150	M\$
Dálková údržba	300	M\$
Turbínový ostrov	321	M\$
Ostatní zařízení	71	M\$
Stavba	1027	M\$
Přímé náklady	6043	M\$
Nepřímé náklady	1473	M\$
Rozpočtová rezerva	1009	M\$
Celkové investiční náklady	8525	M\$

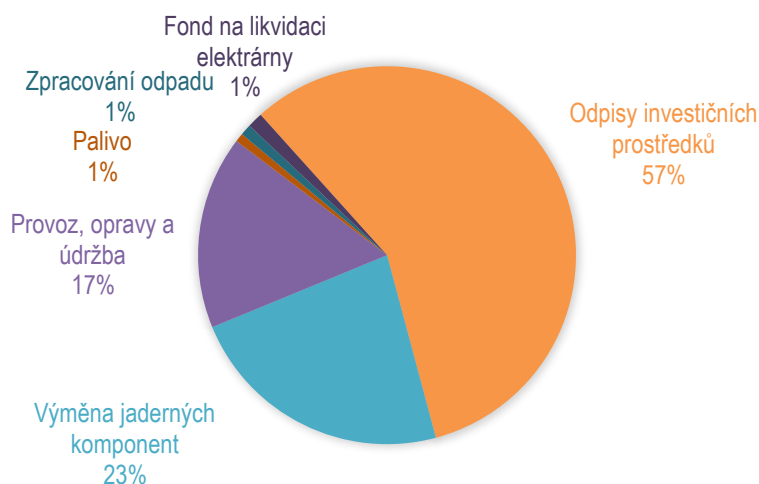


Obr. 3.16 Skladba přímých investičních nákladů referenčního modelu DEMO2.

Výrobní náklady budou majoritně ovlivněné vysokými odpisy investičních nákladů. Tab. 3.7 shrnuje výrobní náklady modelu DEMO2 v cenách roku 2015, procentuální skladba je zobrazena na obr. 3.17. Provozní náklady fúzních elektráren budou charakteristické nízkou cenou paliva a vysokými náklady na výměnu jaderných komponent reaktoru [A46].

Tab. 3.7 Výrobní náklady referenčního modelu DEMO2 bez započítání ceny peněz [7].

Odpisy investičních prostředků	34,10	\$/MWh
Náklady na výměnu jaderných komponent	13,61	\$/MWh
Provoz, opravy a údržba	9,81	\$/MWh
Palivo	0,44	\$/MWh
Zpracování odpadu	0,56	\$/MWh
Fond na likvidaci elektrárny	0,78	\$/MWh
Výrobní náklady bez započítání ceny peněz	59,3	\$/MWh



Obr. 3.17 Skladba výrobních nákladů referenčního modelu DEMO2.



Jak bylo popsáno dříve, tepelné a neutronové zatížení jaderných komponent bude natolik vysoké, že v současnosti nelze vyrobit jaderné komponenty s životností odpovídající životnosti elektrárny. 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\$. Nízké náklady na palivo a převaha nových technologií v investičních a výrobních nákladech vytvoří velký prostor pro snižování výrobních nákladů na základě implementace výsledků výzkumu, vývoje a optimalizace těchto technologií [A46].

Analýza byla provedena ve stálých cenách roku 2015 s reálnou diskontní sazbou. Diskontní sazba byla zvolena na střední úrovni ve výši 7% s předpokladem, že případná vyšší míra rizikovosti bude pokryta státní garancí díky politickému a společenskému významu projektu (oproti [A46] byla diskontní sazba zvýšena). Úroková sazba byla aplikována ve výši 2%. S ohledem na výchozí model byl výpočet proveden v amerických 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 30%. Odpisová doba byla zvolena desetiletá. Délka provozu elektrárny byla stanovena podle použitého modelu elektrárny DEMO2 čtyřicet let, fáze technické přípravy a fáze výstavby byly zvoleny desetileté stejně jako fáze likvidace elektrárny.

Analyzovanými kritérii technicko-ekonomické efektivnosti elektrárny DEMO2 byly čistá současná hodnota projektu, index ziskovosti, vnitřní výnosové procento, dynamická doba návratnosti a střední měrná cena elektrické energie [A46]. Čistá současná hodnota NPV byla vypočtena podle rovnice:

$$NPV = \sum_{t=0}^{T_L-1} [(R_t - C_t - I_t - DP_t) \cdot (1 - T_t) + DP_t - IN_t] \cdot (1 + r)^{-t}, \quad (3.4)$$

kde t označuje běžný rok, T_L dobu ekonomické životnosti elektrárny, R_t roční výnosy, C_t roční provozní náklady, I_t roční finanční náklady na úvěr, DP_t roční odpisy, T_t sazbu daně z příjmu, IN_t roční investice a r reálnou diskontní sazbu. Index ziskovosti PI vyjadřuje poměr výnosů projektu k celkovým investičním nákladům IN :

$$PI = \frac{\sum_{t=0}^{T_L-1} [(R_t - C_t - I_t - DP_t) \cdot (1 - T_t) + DP_t - IN_t] \cdot (1 + r)^{-t}}{IN}. \quad (3.5)$$



Vnitřní výnosové procento IRR , které při diskontování poskytuje za dobu životnosti právě nulovou hodnotu diskontovaného toku hotovosti, bylo zjišťováno iteračním procesem podle rovnice:

$$\sum_{t=0}^{T_L-1} [(R_t - C_t - I_t - DP_t) \cdot (1 - T_t) + DP_t - IN_t] \cdot (1 + IRR)^{-t} = 0 . \quad (3.6)$$

Dynamická doba návratnosti DPP udávající počet let, ve kterém tvorba finančních zdrojů převáží nad jejich čerpáním se započítáním časové hodnoty peněz, byla nalezena podle rovnice:

$$\sum_{t=0}^{DPP-1} [(R_t - C_t - I_t - DP_t) \cdot (1 - T_t) + DP_t - IN_t] \cdot (1 + r)^{-t} - IN = 0 . \quad (3.7)$$

Střední měrná cena elektřiny $LCOE$ zahrnující náklady na výrobu elektřiny vč. investovaného kapitálu vztahované k celkově vyrobenému množství elektřiny za celou dobu životnosti elektrárny byla vypočtena podle rovnice:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{T_L-1} (IN_t + C_t + I_t) \cdot (1+r)^{-t}}{\sum_{t=0}^{T_L-1} E_t \cdot (1+r)^{-t}} , \quad (3.8)$$

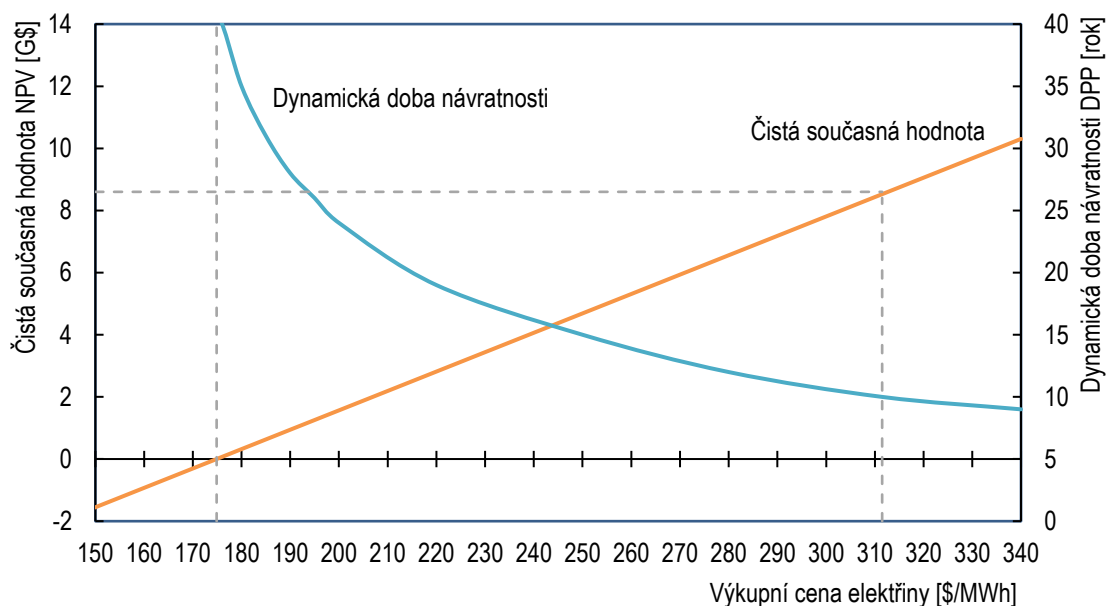
kde E_t označuje čistou roční výrobu elektřiny. Celková střední měrná cena elektřiny $TCOE$ započítává také externí náklady C_t^{EXT} související s výrobou:

$$TCOE = \frac{\sum_{t=0}^{T_L-1} (IN_t + C_t + I_t + E_t \cdot C_t^{EXT}) \cdot (1+r)^{-t}}{\sum_{t=0}^{T_L-1} E_t \cdot (1+r)^{-t}} , \quad (3.9)$$

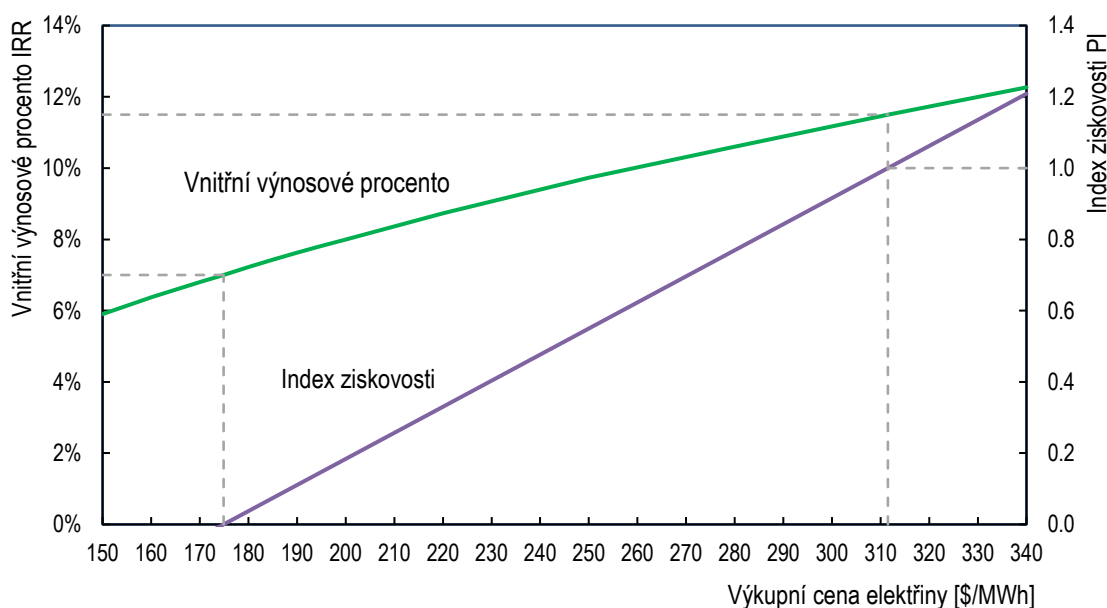
Střední měrná cena elektřiny $LCOE$ elektrárny DEMO2 byla zjištěna ve výši 160 \$/MWh a mezní výkupní cena elektrické energie ve výši 175 \$/MWh. Čistá současná hodnota projektu by dosáhla výše vstupních investic při výkupní ceně elektřiny 312 \$/MWh. Výsledky analýzy jsou shrnuty v tabulce 3.8. Vývoj kritérií technicko-ekonomické efektivity v závislosti na výkupní ceně elektrické energie je zobrazen na obr. 3.18 a 3.19 [A46].

Tab. 3.8 Parametry technicko-ekonomické efektivity modelu DEMO2 [A46].

Index ziskovosti PI	0.00	1.00
Čistá současná hodnota NPV [G\$]	0.00	8.53
Vnitřní výnosové procento IRR [%]	7.0%	11.5%
Dynamická doba návratnosti DPP [roky]	40	10
Výrobní cena elektřiny bez započítání ceny peněz [\$/MWh]	59.3	59.3
Střední měrná cena elektřiny $LCOE$ [\$/MWh]	160.3	160.3
Celková střední měrná cena elektřiny včetně externích nákladů $TCOE$ [\$/MWh]	161.4	161.4
Mezní výkupní cena elektřiny [\$/MWh]	174.9	311.5



Obr. 3.18 Vývoj čisté současné hodnoty a dynamické doby návratnosti v závislosti na výkupní ceně elektřiny.



Obr. 3.19 Vývoj vnitřního výnosového procenta a indexu ziskovosti v závislosti na výkupní ceně elektřiny.

Citlivostní analýza ukázala vysokou závislost ekonomické efektivity elektrárny na výši investičních nákladů a na účinnosti výroby elektrické energie [A46].

Vysoké investiční náklady jsou z velké části zapříčiněny nedostatečnými znalostmi fúzních technologií a souvisejícími riziky. Na základě postupně získaného know-how se tyto náklady budou snižovat (learning factor). Obecně může toto snížení dosáhnout až 40% při výstavbě desáté elektrárny [23] a vysoký podíl pokročilých technologií poskytne další



prostor pro snižování nákladů na základě implementace výsledků vědy a výzkumu [A46].

V případě fúzních elektráren není díky inherentní bezpečnosti fúzních reaktorů důvod k růstu nákladů na zajištění jaderné bezpečnosti, ke kterému dochází ve stávající jaderné energetice. Podobně nebude nutné ani zvyšování nákladů na ochranu životního prostředí. Proto lze očekávat, že trend vývoje investičních nákladů fúzních elektráren bude sestupný v návaznosti na vývoj, zdokonalování, optimalizaci a standardizaci fúzních technologií.

Vyšší účinnost výroby zvýší množství vyrobené elektřiny bez nárůstu tepelného výkonu reaktoru a bez zkrácení životnosti jaderných komponent. Zvýšení účinnosti výroby z 23% na 30% by snížilo mezní výkupní cenu elektřiny o více než 21%, jak dokládá tab. 3.9. Prostor pro zvýšení účinnosti je především ve zvýšení zesílení reaktoru Q a snížení ztrát recirkulace výkonu ohřevu paliva (kap. 4).

Tab. 3.9 Technicko-ekonomická kritéria efektivnosti v závislosti na čisté tepelné účinnosti.

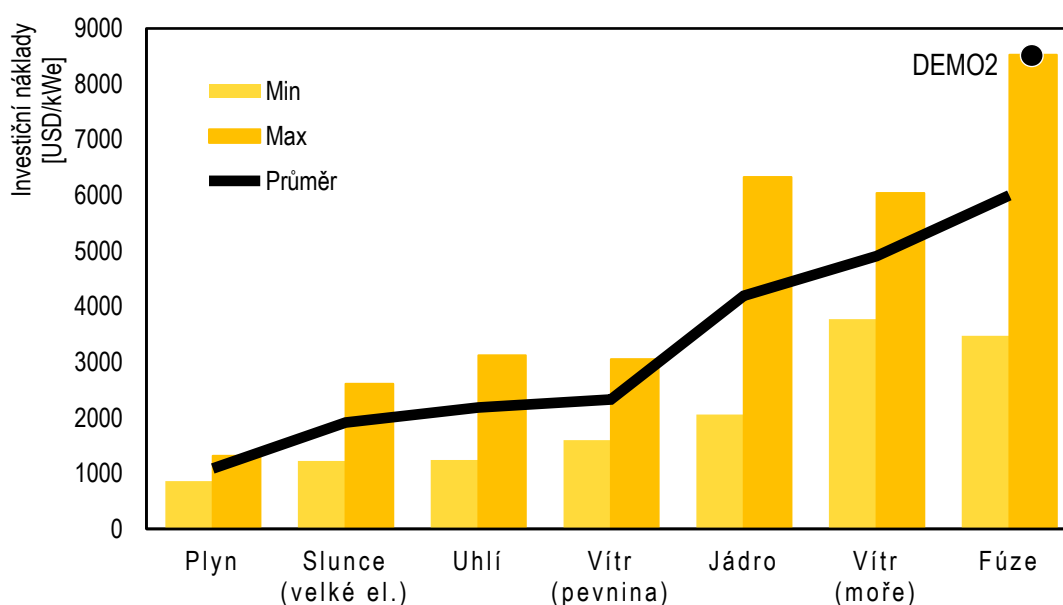
Čistá tepelná účinnost elektrárny	23%	30%	33%
Střední měrná cena elektřiny[\$/MWh]	160.3	125.5	115.1
Mezní výkupní cena elektřiny[\$/MWh]	174.9	136.7	125.3

Zjištěná mezní výkupní cena elektrické energie modelu ve výši 175 \$/MWh je několikanásobně vyšší, než byla ve srovnávacím roce tržní cena elektřiny. Nerentabilita energetického projektu šetrného k životnímu prostředí bez veřejné podpory ale není v současnosti 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 v případě výstavby jaderných elektráren ve Velké Británii nebo v ČR. Analyzovaný model fúzní elektrárny by byl při průměrné ceně elektřiny na burze ~34 \$/MWh v roce 2015 rentabilní při dotaci ~141 \$/MWh.

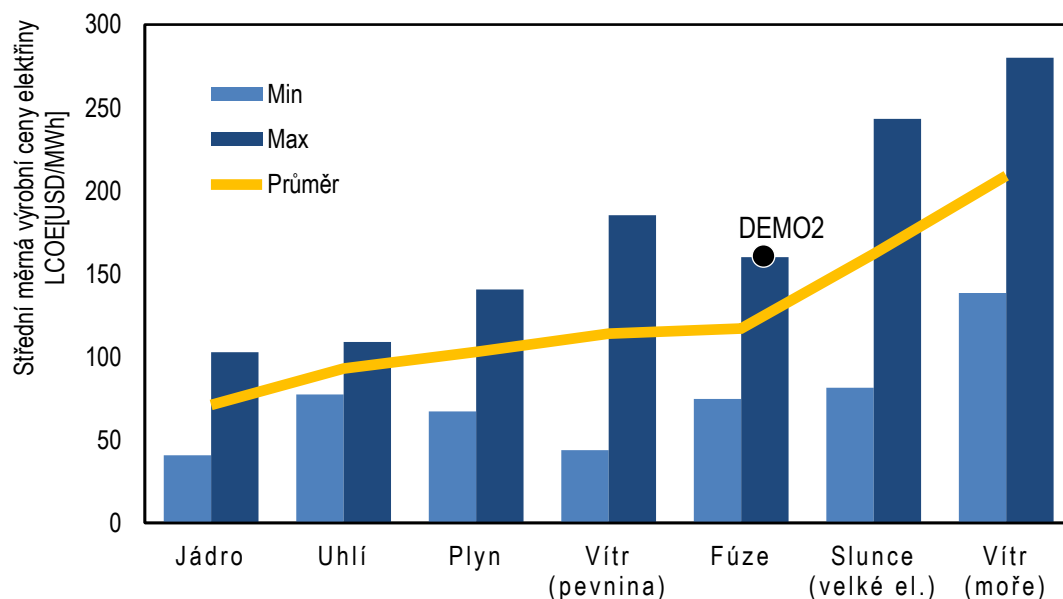
Uvedená dotace je srovnatelná s dotacemi poskytovanými mořským větrným elektrárnám, které v EU v roce 2012 činily 136 \$/MWh v cenách roku 2015, a je přibližně o třetinu menší než dotace poskytované ve stejném roce pro fotovoltaické elektrárny ve výši 249 \$/MWh v cenách roku 2015 [24]. Uvedené dotace obnovitelným zdrojům navíc nezahrnují náklady na udržování rozsáhlých zásokových fosilních zdrojů, které v případě provozování fúzních elektráren nebudou nutné. V porovnání s těmito obnovitelnými zdroji by fúzní elektrárny vyráběly elektrickou energii stejně čistě a ekologicky, avšak levněji [A46].

3.7 Porovnání s existujícími elektrárnami

Pro porovnání ekonomické efektivity fúzních elektráren s jinými typy elektráren byla použita statistická data o investičních nákladech a o středních měrných výrobních cenách LCOE při 7% diskontní sazbě publikovaná OECD v roce 2015 [25], data publikovaná evropskou agenturou EFDA [4] a analyzovaný model fúzní elektrárny DEMO2. Ceny byly přepočítány na cenovou úroveň roku 2015. Porovnání zahrnuje jaderné, uhelné, plynové, větrné a fotovoltaické elektrárny.



Obr. 3.20 Investiční náklady vybraných typů elektráren.



Obr. 3.21 Porovnání střední měrné výrobní ceny elektřiny LCOE.



Jak dokumentuje obr. 3.20, jaderná fúze bude z hlediska investic jedním z nejdražších energetických zdrojů srovnatelným v tomto pohledu s mořskými větrnými parky [A46]. Porovnání LCOE na obr. 3.21 vycházející z rozsáhlého souboru dat zemí OECD ukazuje srovnatelné výrobní ceny elektřiny z jaderných a fosilních elektráren a vyšší výrobní ceny větrných a fotovoltaických elektráren. Jaderná fúze by vyráběla elektřinu za vyšší cenu než jaderné nebo fosilní zdroje, avšak levněji než fotovoltaické nebo mořské větrné elektrárny.

Graf na obr. 3.21 nezahrnuje negativní vliv výroby v jednotlivých typech elektráren na životní prostředí, který je zvláště vysoký v případě fosilních zdrojů. Pro vyhodnocení celkové výhodnosti jednotlivých elektráren byla provedena internalizace externích nákladů a do výpočtu střední měrné výrobní ceny elektřiny byly započítány externí náklady podle rovnice (3.6).

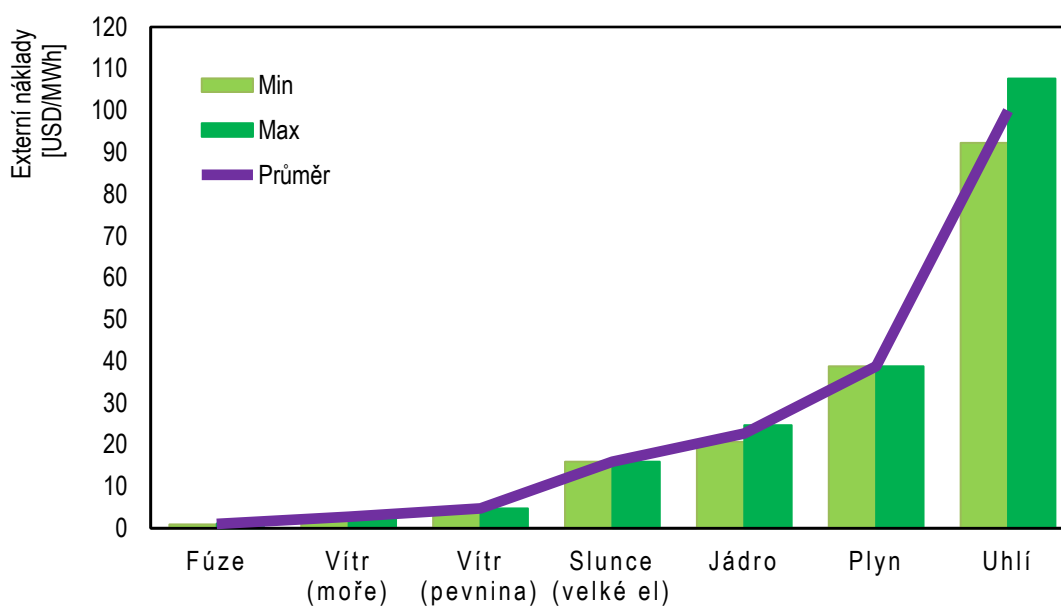
Použitá evropská metodika pro ocenění externích nákladů ExternE (External Costs of Energy) hodnotí tři hlavní kategorie dopadů energetiky:

- 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.).

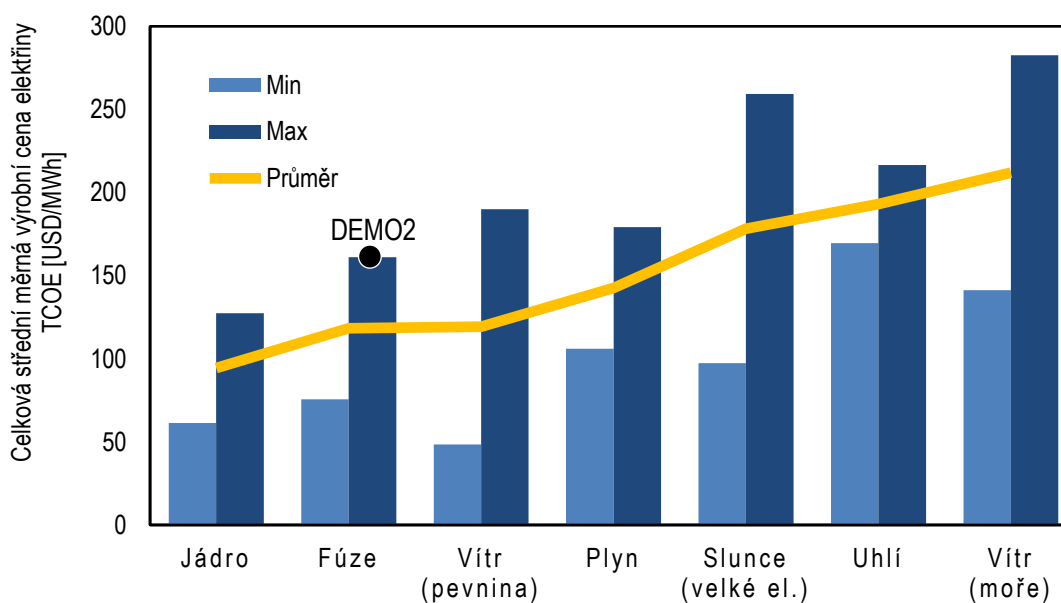
Dopady zahrnují změny klimatu, poškozování ozonové vrstvy, okyselení půdy, eutrofizace sladkovodního a mořského prostředí, zvyšování toxicity prostředí, zvyšování radiačního pozadí, zábor zemědělské půdy, zábor plochy ve městech, transformace přírodní půdy, vyčerpávání vodních zdrojů, vyčerpávání nerostných nalezišť, vyčerpávání zdrojů energie a nehody a havárie [24].

Graf na obr. 3.22 shrnuje externí náklady různých typů elektráren podle [24] a [4] vyčíslené metodikou ExternE v cenách roku 2015. Externí náklady jaderné fúze budou v souladu s ekologickou a bezpečnou výrobou elektrické energie velice nízké. Vliv fúzních elektráren na životní prostředí bude nejnižší ze známých zdrojů energie a srovnatelný s vlivem větrných elektráren.

Graf na obr. 3.23 ukazuje výsledné srovnání celkových středních měrných výrobních cen elektřiny TCOE zahrnujících externí náklady výroby. Dopady výroby elektřiny na životní prostředí výrazně zdražují fosilní elektrárny a naopak zvýhodňují fúzní elektrárny. Při započítání vlivu na životní prostředí budou fúzní elektrárny druhým ekonomicky nejefektivnějším energetickým zdrojem [A46].



Obr. 3.22 Externí náklady vybraných typů elektráren.



Obr. 3.23 Porovnání celkové střední měrné výrobní ceny elektřiny TCOE zahrnující externí náklady.

3.8 Validita výsledků

Validita prezentovaných výsledků technicko-ekonomické analýzy úzce souvisí s validitou vstupních dat z použitých modelů fúzních elektráren. Příprava fúzních elektráren je v současnosti v počáteční konceptuální fázi, a proto použité vstupní údaje představují pouze hrubý odhad, který bude v budoucnu postupně upřesňován.



Nejistota modelů je z části snížena použitím existujících technologií. Využití referenčních projektů z jaderné energetiky pro nefúzní technologie a zkušeností z probíhající realizace velkých fúzních projektů, jako je ITER nebo japonský reaktor JT-60SA, snižuje technická a ekonomická rizika a tím i nejistotu celkového odhadu. Přesto jsou prezentované výsledky zatíženy vysokou nejistotou, protože výstavba fúzních elektráren nezačne dříve než ve druhé polovině století. Je velmi obtížné předvídat vývoj globální ekonomiky a jednotlivých energetických technologií na několik desetiletí dopředu. Reálný průběh integrace jaderné syntézy do energetiky bude záviset na vědeckém a technickém vývoji celého energetického sektoru [A46].

Ověření ekonomických charakteristik fúzních elektráren nebude možné, dokud nebudou první fúzní elektrárny zprovozněny a nějakou dobu provozovány. Ex-ante hodnocení je proto jedinou možností porovnání těchto elektráren s existujícími a představuje nezbytný nástroj pro stanovování priorit vývoje energetiky [A46].

3.9 Závěr

Složení fúzního paliva z lehkých chemických prvků znamená prakticky nevyčerpatelné množství dostupného paliva a minimální vliv fúzních zdrojů energie na životní prostředí, všeobecná dostupnost vody odstraní energetickou závislost na nalezištích energetických surovin. Vysoká provozní teplota paliva tvoří základ pro inherentní jadernou bezpečnost fúzních reaktorů za cenu snížení čisté účinnosti výroby elektřiny. Inherentní bezpečnost fúzních reaktorů a prakticky nevyčerpatelné zásoby paliva jsou hlavními motivy integrace jaderné fúze do energetiky.

Vysoká energetická zátěž jaderných komponent v energetických reaktorech představuje v současnosti největší překážku konkurenceschopného energetického využití jaderné fúze. Vývoj těchto komponent zasahuje do řady výzkumných oblastí, především do materiálového výzkumu, fyziky pevných látek, termomechaniky a termohydrauliky. Základní požadavky na hledané materiály lze shrnout do tří požadavků: odolnost vůči neutronovému toku, vysoká pracovní teplota a vysoká tepelná vodivost. Nedostupnost materiálů vyhovujících současně těmto třem požadavkům má řadu kritických důsledků, především nízkou životnost jaderných komponent, zvýšení množství radioaktivního odpadu, omezení výstupních teplot chladicích médií, snížení účinnosti výroby elektrické energie a finální významné zvýšení výrobních nákladů.



Nedostatečná schopnost dostupných materiálů odolávat vysokým energetickým tokům vedla k vytvoření koncepce průběžné výměny jaderných komponent v průběhu provozování reaktoru. Na základě této koncepce je součástí fúzního výzkumu také vývoj robotických systémů dálkové diagnostiky a výměny jaderných komponent při odstávkách reaktoru.

Technicko-ekonomická ex-ante analýza modelu fúzní elektrárny DEMO2 ukázala ekonomická specifika budoucí fúzní energetiky. Analyzovaný model fúzní elektrárny DEMO2 byl shledán při současných cenách elektřiny jako nerentabilní a jeho realizace by si vyžádala dotaci výkupní ceny elektřiny, která by ale byla nižší, než je poskytovaná podpora fotovoltaických elektráren. Při internalizaci externích nákladů na výrobu elektrické energie by fúzní elektrárny byly jedním z ekonomicky nejvýhodnějších energetických zdrojů [A47].

Zpracovaná analýza charakteristických rysů doložila hlavní motivaci integrace jaderné fúze do energetiky, kterou je bezpečná, ekonomicky schůdná, průmyslová výroba elektřiny s nevyčerpatelnými zásobami paliva a bez negativního vlivu na životní prostředí. Současně identifikovala největší současnou výzvu této integrace, kterou je absence dostatečně radiačně a tepelně odolných materiálů a nemožnost testovat nové materiály relevantním neutronovým tokem.

Charakteristické rysy fúzní energetiky byly řešeny v řadě článků a reportů, především v článku *Jaderná bezpečnost fúzních elektráren a jejich vliv na životní prostředí* [A30]. Otázky seismické bezpečnosti fúzních elektráren byly analyzovány v článku *Moderní trendy seismického zabezpečení jaderných elektráren* [A31],[A32]. Problematika vlivu fúzní energetiky na životní prostředí byla diskutována v článcích *Fúzní palivo a obnovitelné zdroje* [A16], *Jaderná fúze – budoucnost energetiky* [A17] a *Je jaderná fúze obnovitelný zdroj?* [A18].

Vývoj evropského řešení divertoru byl rozebrán v článku *Conceptual design studies for the European DEMO divertor: Rationale and first results* [A6]. Testování vzorků první stěny v jaderném reaktoru LVR-15 bylo popsáno v článku *In-pile testing of ITER first wall mock-ups at relevant thermal loading conditions in the LVR-15 nuclear research reactor* [A31]. Podrobné informace o komplexu HELCZA jsou uvedeny v projektové dokumentaci *Experimental Complex HELCZA Initial Report* [A44] a shrnutí v článku *HELCZA High Heat Flux Test Facility for Testing ITER EU First Wall Components* [A45].

Analýza technicko-ekonomické efektivity fúzních elektráren byla publikována



v člancích *Ekonomika fúzní energetiky* [A46] a *Approximation of the Economy of Fusion Energy* [A47].



Kapitola 4

Analýza energetické bilance budoucích fúzních elektráren

Specifickým rysem fúzní energetiky bude ohřev paliva na vysoké teploty doprovázený recirkulací vysokého elektrického výkonu. Recirkulace výkonu ohřevu bude snižovat dopad ohřevu paliva na výstupní výkon fúzních elektráren. V kapitole jsou identifikovány hlavní výkonové toky fúzních elektráren a jsou odvozeny analytické rovnice popisující vliv ohřevu paliva na čistou účinnost výroby elektrické energie.



4.1 Úvod

Nutnost ohřát fúzní palivo na vysoké teploty přinese do energetiky nový technologický rys – recirkulaci vysokého elektrického výkonu. Část vyrobené elektřiny bude při ohřevu plazmatu ve formě tepla vracena zpět do reaktoru a následně jako součást tepelného výkonu reaktoru bude opět využita k výrobě elektrické energie. Recirkulace výkonu ohřevu sníží dopad ohřevu paliva na čistý výkon elektrárny.

K recirkulaci výkonu dochází v menší či větší míře ve většině energetických oběhů, například část příkonu čerpadel nebo kompresorů přechází do pracovního média. Fúzní elektrárny budou charakteristické tím, že recirkulovaný elektrický výkon může v prvních fúzních elektrárnách dosahovat až desítek procent hrubého elektrického výkonu. Ztráty při recirkulaci výkonu ohřevu pak výrazně sníží čistou účinnost výroby elektrické energie.

V souladu se současnou koncepcí evropského fúzního výzkumu je následující analýza provedena pro reaktory s magnetickým udržením plazmatu typu tokamak. Jako fúzní palivo se předpokládá směs deuteria a tritia v poměru 1:1 se zanedbatelným množstvím nečistot, shodná teplota iontů a elektronů a ustálený stav plazmatu. Pro výpočet fúzní reaktivity byla použita metodika podle Bucky [26].

4.2 Lawsonovo kritérium

Podmínky pro energetické využití jaderné fúze jako první zformuloval britský inženýr J. D. Lawson ve své práci z roku 1955 [27]. Lawsonovo kritérium zjednodušeně říká, že fúzní palivo musí na dostatečně dlouhou dobu dosáhnout takovou hustotu a teplotu, aby četnost fúzních reakcí zajistila celkový energetický zisk. Potřebná teplota se přitom pohybuje na úrovni stovek milionů stupňů Celsia a výše.

V současném pojetí Lawsonovo kritérium označuje rovnice energetické rovnováhy fúzního paliva a stanovuje podmínky pro fúzní reaktor, které musí být splněny, aby byla příslušná energetická rovnováha dosažena. Dosažení rovnováhy fúzního výkonu a výkonu ohřevu plazmatu se označuje jako vědecký zlom (scientific breakeven), dosažení rovnováhy fúzního výkonu absorbovaného v plazmatu a ztrátového výkonu plazmatu se označuje jako zapálení (ignition). Dosažení rovnováhy hrubého výkonu fúzní elektrárny a celkové spotřeby elektrárny se označuje jako inženýrský zlom (engineering breakeven) [A2].

Lawsonovo kritérium stanovuje pro dosažení každé z uvedených energetických rovnováh minimální hodnotu součinu hustoty slučovaných jader n při teplotě T a časového



intervalu τ_E , po který bude v plazmatu udržena energie:

$$n \tau_E \geq f(T). \quad (4.1)$$

První generace fúzních elektráren bude postavena na bázi reaktorů s magnetickým udržením plazmatu. V reaktorech s magnetickým udržením tlak plazmatu odpovídá tlaku vnějšího magnetického pole. Při ustáleném tlaku jsou hustota a teplota plazmatu závislé parametry, protože platí $nT \approx const.$ Rovnice Lawsonova kritéria proto přechází do tvaru trojného součinu:

$$n T \tau_E \geq f'(T). \quad (4.2)$$

4.3 Kritéria výkonové rovnováhy plazmatu

Lawsonovo kritérium vědecké rovnováhy popisuje vztah mezi energetickým vstupem a výstupem plazmatu [A48]. Vědecká rovnováha (scientific breakeven) nastává v okamžiku, kdy fúzní výkon P_F dosáhne hodnoty výkonu ohřevu P_H . Kritérium vědecké rovnováhy je splněno pokud:

$$P_F \geq P_H. \quad (4.3)$$

Bez splnění kritéria (4.3) plazma vyžaduje pro udržení svých parametrů výkon ohřevu vyšší, než je uvolňovaný fúzní výkon. Ztrátový výkon plazmatu P_L lze vyjádřit poměrem kinetické energie plazmatu E_K a doby udržení energie plazmatu τ_E , za kterou dojde ke ztrátě této energie:

$$P_L = \frac{E_K}{\tau_E}. \quad (4.4)$$

Kinetická energie částic ideálního plynu je při předpokladu, že molekuly plynu jsou prakticky hmotné body a lze zanedbat energii rotačního pohybu molekul, dána vztahem:

$$E_K = \frac{3}{2}NT, \quad (4.5)$$

kde N je počet částic a T je teplota plynu v [eV]. Celkový počet částic N se v případě plazmatu z vodíkových izotopů skládá z poloviny z atomových jader a z poloviny z elektronů. Hustotu atomových jader DT paliva označíme n a celkový počet částic v objemu V je pak $N = 2nV$. Dosazením do vztahu (4.4) získáme:

$$P_L = \frac{3nTV}{\tau_E}. \quad (4.6)$$

Aby bylo plazma v tepelné rovnováze, musí být energetické ztráty plazmatu



vyrovnávány doplňováním energie. K tomuto doplňování energie lze použít dva základní zdroje – energii termalizovaných α částic uvolňovaných při fúzní reakci a energii dodávanou zvenčí:

$$P_L = P_\alpha + P_H, \quad (4.7)$$

kde P_α je výkon α částic a P_H je výkon vnějšího ohřevu plazmatu. Výkon P_α je součástí celkového uvolňovaného fúzního výkonu P_F , v případě DT reakce P_α představuje přibližně pětinu P_F :

$$P_\alpha \cong 0,2 P_F. \quad (4.8)$$

Fúzní výkon P_F pro DT směs se shodnou koncentrací jader deuteria a tritia je dán vztahem

$$P_F = \frac{n^2}{4} \langle \sigma v \rangle E_F V, \quad (4.9)$$

kde $\langle \sigma v \rangle$ je průměrná hodnota součinu účinného průřezu reakce $\sigma(v)$ a relativní rychlosti jader v přes maxwellovské rozdělení rychlostí při teplotě T označovaná jako fúzní reaktivita, V je objem plazmatu a E_F je energie uvolněná při jedné fúzní reakci. Dosazením uvedených vztahů do (4.3) lze odvodit trojný součin:

$$nT\tau_E \geq \frac{10 T^2}{\langle \sigma v \rangle E_F}. \quad (4.10)$$

Za předpokladu přibližně parabolického profilu teploty v průřezu plazmatu je teplota v ose plazmatu dvojnásobkem průměrné objemové teploty plazmatu. Dosazením průměrné teploty do rovnice (4.10) získáme finální rovnici kritéria vědecké rovnováhy:

$$n\bar{T}\tau_E \geq \frac{20 \bar{T}^2}{\langle \sigma v \rangle E_F}. \quad (4.11)$$

Dosažení kritéria vědecké rovnováhy je v současnosti jedním z hlavních cílů fúzního výzkumu. Žádné fúzní zařízení doposud rovnici (4.11) nesplnilo. Nicméně například japonský tokamak JT-60 dosáhl v roce 1998 s DD plazmatem ekvivalentní parametry plazmatu splňujících kritérium DT reakce [6]. Reaktor ITER dosáhne vědecké rovnováhy a uvolňovaný fúzní výkon desetinásobně překročí potřebný výkon ohřevu [A48].

Druhým Lawsonovým kritériem je kritérium zapálení (ignition), které se také vztahuje k energetické bilanci samotného plazmatu. Kritérium porovnává velikost části fúzního výkonu absorbovaného přímo v plazmatu vůči energetickým ztrátám plazmatu. Pokud



výkon absorbovaný v plazmatu přesáhne jeho energetické ztráty, plazma se bude autonomně ohřívat a pro udržení fúzní reakce nebude nutný externí ohřev.

Ve stavu zapálení budou energetické ztráty plazmatu plně kompenzovány energií termalizovaných α částic, uvolňovaných při fúzní reakci:

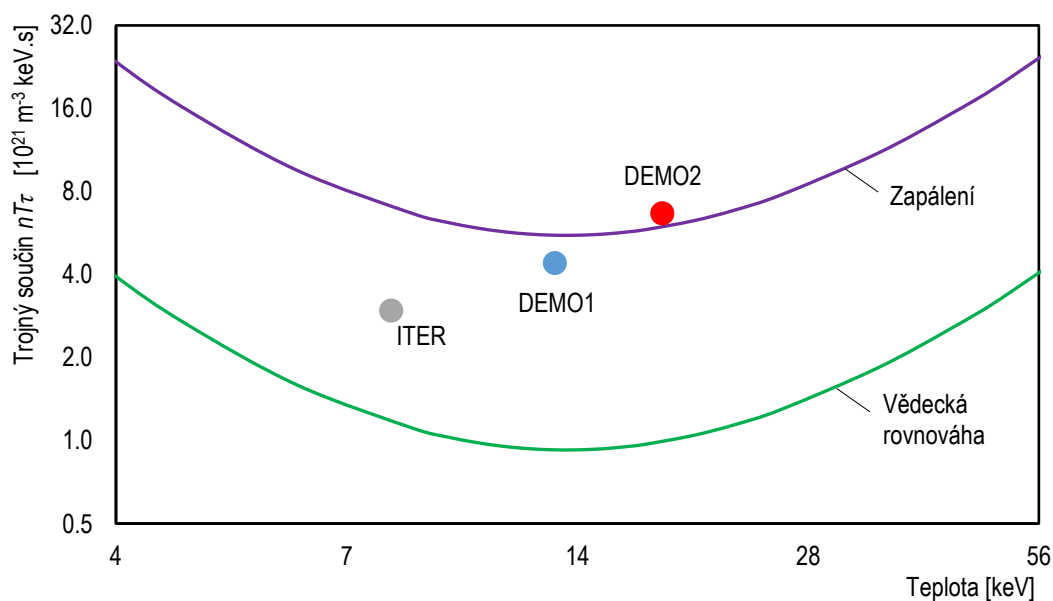
$$P_{\alpha} \geq P_L. \quad (4.12)$$

Shodným postupem jako v předchozím případě lze odvodit kritériální rovnici trojného součinu zapálení [A48] ve tvaru:

$$n\bar{T}\tau_E \geq \frac{120\bar{T}^2}{\langle\sigma v\rangle_{EF}}. \quad (4.13)$$

Z porovnání rovnic (4.11) a (4.13) vyplývá, že v případě DT plazmatu je kritérium zapálení fúzní reakce 6x vyšší než kritérium vědecké rovnováhy. Jak ukazuje graf obou kritérií zobrazený na obr. 4.1, splnění kritérií lze nejnázne dosáhnout při teplotě 14 keV (~163 mil. °C), kdy jsou požadované podmínky nejmírnější. Pro úzký rozsah teplot v okolí této teploty se trojné součiny zpravidla považují za konstantní a kritéria se zapisují ve zjednodušené formě [A2]:

Kritérium vědecké rovnováhy	$n T \tau_E \geq 0,93 \times 10^{21} \text{ [m}^{-3}\text{keV s]}$
Kritérium zapálení	$n T \tau_E \geq 5,55 \times 10^{21} \text{ [m}^{-3}\text{keV s]}$



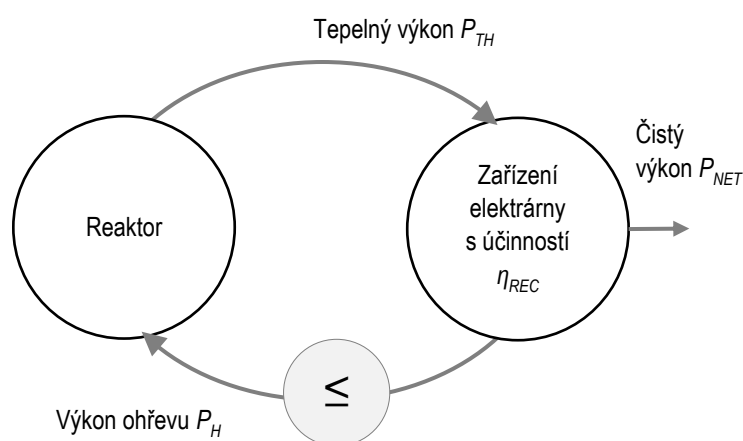
Obr. 4.1 Lawsonova kritéria a pracovní body ITER a modelových elektráren DEMO z tab. 1.1.

4.4 Kritérium inženýrské rovnováhy

Kritérium inženýrské rovnováhy stanovuje parametry fúzního plazmatu, které v prvním přiblížení umožní, aby fúzní elektrárna dosáhla zisku ve výrobě elektřiny a mohla ji dodávat do rozvodné sítě [A49]. Inženýrská rovnováha je dosažena, pokud tepelný výkon reaktoru P_{TH} transformovaný technologií elektrárny dosáhne hodnoty výkonu ohřevu plazmatu P_H (obr. 4.2):

$$\eta_{REC} P_{TH} \geq P_H, \quad (4.14)$$

kde η_{REC} je celková účinnost transformace části tepelného výkonu reaktoru využité pro ohřev plazmatu na výkon ohřevu plazmatu prostřednictvím technologie elektrárny [A49].



Obr. 4.2 Schéma inženýrské rovnováhy fúzní elektrárny.

Jak je ukázáno v [A49], rovnice (4.14) může být upravena s použitím koeficientu Ω_i do tvaru:

$$P_\alpha \geq \Omega_i P_L. \quad (4.15)$$

Velikost koeficientu Ω_i závisí na účinnosti recirkulace výkonu η_{REC} a na velikosti energetické multiplikace výkonu M_R :

$$\Omega_i = \frac{1 - \eta_{REC}}{1 - (1 - 5M_R)\eta_{REC}}. \quad (4.16)$$

Faktor energetické multiplikace výkonu M_R je definovaný jako poměr celkového výkonu získávaného ve fúzním reaktoru vůči fúznímu výkonu P_F :

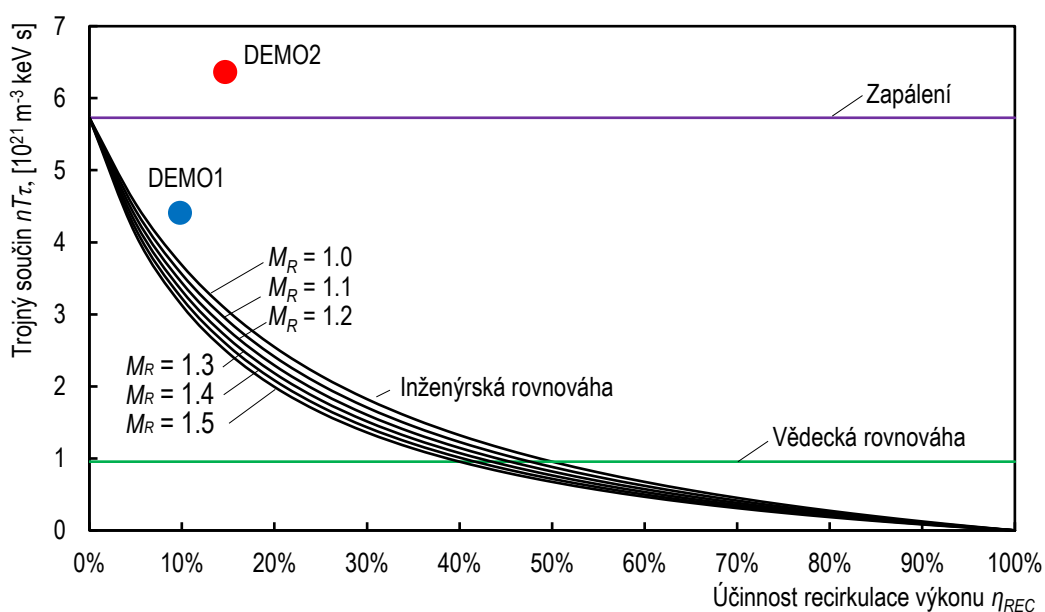
$$M_R = \frac{P_F + P_B - P_{RL}}{P_F}, \quad (4.17)$$

kde P_B je výkon uvolňovaný v blanketu reaktoru při výrobě tritia a P_{RL} jsou energetické ztráty reaktoru.

Dosazením do vztahu (4.15) získáme rovnici kritéria inženýrské rovnováhy:

$$n\bar{T}\tau_E \geq \Omega_i \frac{120 \bar{T}^2}{\langle \sigma v \rangle E_F}. \quad (4.18)$$

Koeficient Ω_i způsobuje, že se hodnota kritéria inženýrské rovnováhy mění v závislosti na účinnosti recirkulace výkonu ohřevu od hodnoty kritéria zapálení do nuly (obr. 4.3). Na obr. 4.3 jsou také zakresleny pracovní body elektráren DEMO podle tab. 1.1.



Obr. 4.3 Závislost kritéria inženýrské rovnováhy na účinnosti recirkulace při teplotě 14 keV.

Nulová účinnost recirkulace η_{REC} popisuje stav, ve kterém není ohřev plazmatu funkční a pokud má elektrárna vyrábět elektřinu, pak se musí plazma ohřívat autonomně termalizací α částic vznikajících při fúzní reakci při splnění kritéria zapálení. Účinnost recirkulace rovná 100% naopak označuje stav, ve kterém výkon ohřevu recirkuluje zařízením elektrárny bez ztrát, plazma je udržováno na pracovní teplotě bez potřeby další energie recirkulací výkonu ohřevu a veškerý uvolňovaný fúzní výkon může být využit pro výrobu elektřiny pro rozvodnou síť. Cirkulace výkonu bez ztrát ovšem není fyzikálně možná, vysoké ztráty souvisejí například s termodynamickou účinností tepelného oběhu elektrárny nebo s účinností systému ohřevu HCD.

Pozoruhodným přínosem recirkulace výkonu je teoretická možnost fúzních



„podkritických“ elektráren nesplňujících kritérium vědecké rovnováhy při účinnostech recirkulace výkonu vyšších než $\sim 50\%$. Dosažení takové účinnosti je velmi obtížné ale ne nemožné, například při použití MHD generátorů pro přímou výrobu elektrické energie. Podkritické elektrárny by pro svoji činnost nevyžadovaly tak vysoké parametry plazmatu. To by umožnilo postavit malé kompaktní fúzní elektrárny, u kterých by účinná recirkulace výkonu ohřevu zajistila navrácení velké části ztrátového výkonu zpět do plazmatu.

4.5 Bezrozměrná formulace kritéria

Užitečnou charakteristikou fúzního reaktoru je faktor zesílení reaktoru Q definovaný jako poměr fúzního výkonu P_F a výkonu vnějšího ohřevu plazmatu P_H :

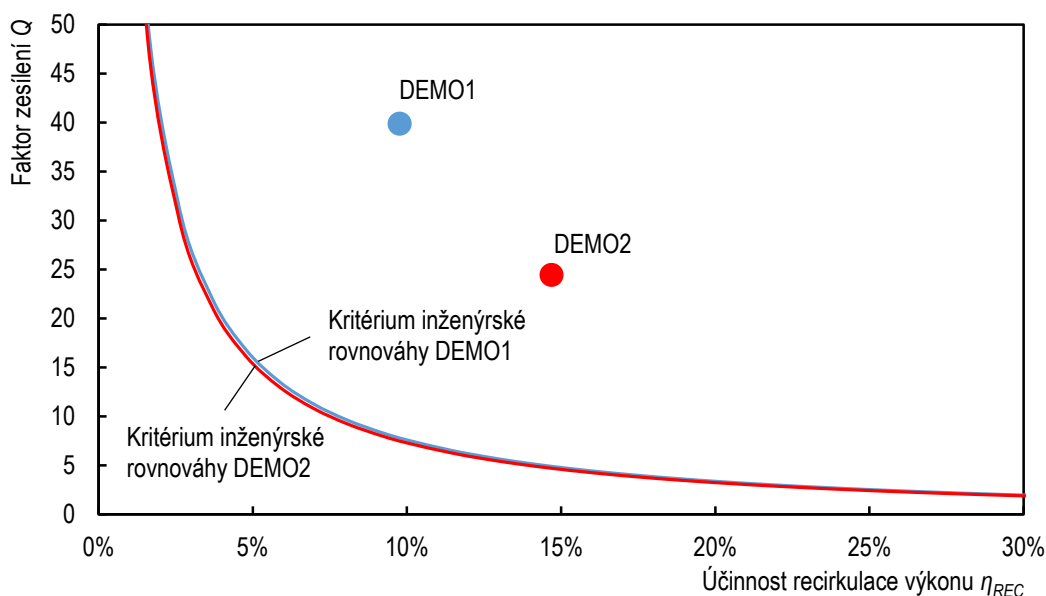
$$Q = \frac{P_F}{P_H}. \quad (4.19)$$

Faktor zesílení lze využít k odvození bezrozměrné formulace kritéria inženýrské rovnováhy [A49]. Úpravou rovnice (4.14) získáme rovnici kritéria inženýrské rovnováhy pro faktor zesílení ve tvaru:

$$Q \geq Q_B, \quad (4.20)$$

kde Q_B je faktor zesílení nutný pro dosažení inženýrské rovnováhy:

$$Q_B = \frac{1 - \eta_{REC}}{M_R \eta_{REC}}. \quad (4.21)$$



Obr. 4.4 Inženýrské kritérium modelů fúzních elektráren podle tab. 1.1 v bezrozměrné formulaci.

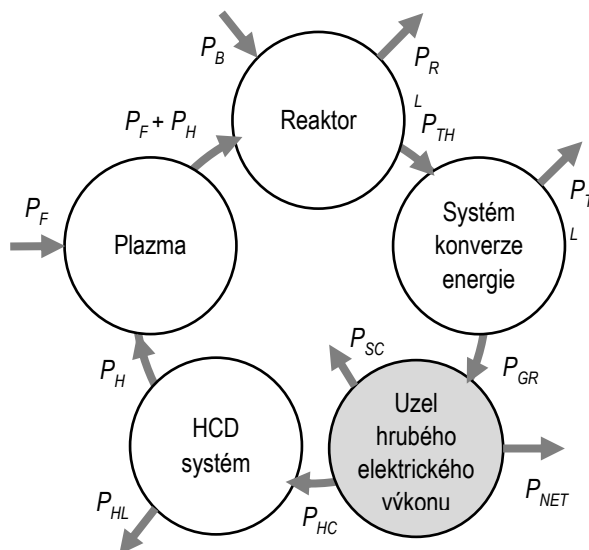
Inženýrská rovnováha bude dosažena, pokud faktor zesílení reaktoru Q dosáhne hodnoty faktoru Q_B . Graf na obr. 4.4 ukazuje hodnotu faktoru Q_B v závislosti na účinnosti recirkulace η_{REC} . Rovnice (4.20) nenahrazuje rovnici (4.18), ale specifikuje minimální zesílení reaktoru nutné pro dosažení inženýrského kritéria.

Z grafu vyplývá, že oba modely DEMO splňují kritérium inženýrské rovnováhy a budou tedy vyrábět elektrickou energii pro rozvodnou síť. Není ale zřejmé, s jakou účinností bude tato výroba probíhat. Pro zjištění vlivu ohřevu plazmatu na čistou účinnost výroby elektrické energie sestavíme energetickou bilanci elektrárny zahrnující recirkulaci výkonu ohřevu.

4.6 Recirkulace výkonu

Základní schéma recirkulace výkonu je zobrazeno na obr. 4.5. Pro účel této analýzy je spotřeba systému ohřevu HCD posuzována odděleně od vlastní spotřeby elektrárny.

P_F označuje fúzní výkon, P_H výkon ohřevu plazmatu systémem HCD, P_B výkon uvolňovaný v blanketu při generování tritia, P_{RL} ztrátový výkon reaktoru, P_{TH} tepelný výkon reaktoru, P_{TL} ztráty při konverzi tepelné energie na elektrickou, P_{GR} hrubý elektrický výkon elektrárny, P_{SC} vlastní spotřebu elektrárny s výjimkou spotřeby systému HCD, P_{NET} čistý výkon elektrárny do rozvodné sítě, P_{HC} příkon systému HCD a P_{HL} ztrátový výkon systému HCD [A50].



Obr. 4.5 Schéma recirkulace výkonu fúzní elektrárny s kontinuálně pracujícím reaktorem.

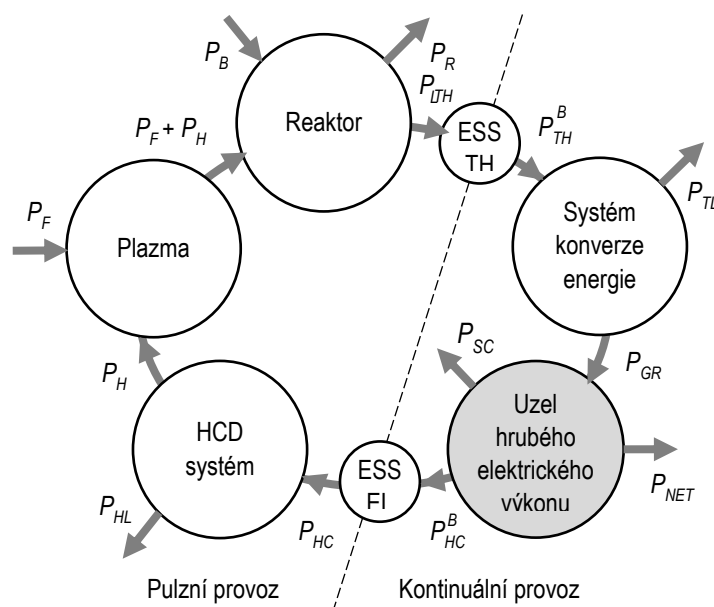
Tepelný výkon energetického fúzního reaktoru P_{TH} v ustáleném stavu lze s pomocí výkonových faktorů zapsat jako součet fúzního výkonu multiplikovaného v blanketu a

zpětně vyzařovaného výkonu ohřevu plazmatu:

$$P_{TH} = P_F \left(M_R + \frac{1}{Q} \right). \quad (4.22)$$

Bezrozměrné parametry M_R a Q jsou definovány ve vztazích (4.17) a (4.19).

Při výstavbě prvních fúzních elektráren nemusí být ještě dokončen vývoj neinduktivního generování elektrického proudu a reaktor může pracovat v pulsním režimu [10]. V případě elektrárny s pulsním fúzním reaktorem bude do schématu elektrárny včleněn zásobník tepelné energie ESS TH (Thermal Energy Storage System) vyrovnávající prodlevy energetického provozu reaktoru, aby byl zajištěn konstantní tok páry na turbínu. Současně musí být kompenzována pulsní spotřeba systému HCD zásobníkem elektrické energie ESS EL, který zabrání kolísání výstupního výkonu elektrárny P_{NET} . Schéma elektrárny s pulsním fúzním reaktorem je zobrazeno na obr. 4.6, kde P_{TH}^B označuje vyvážený tepelný výkon reaktoru a P_{HC}^B vyvážený příkon systému HCD.



Obr. 4.6 Schéma recirkulace výkonu fúzní elektrárny s pulsním reaktorem.

4.7 Účinnost recirkulace výkonu

Účinnost recirkulace výkonu je definována jako podíl výkonu ohřevu předaného do plazmatu P_H vůči části tepelného výkonu reaktoru využitě po konverzi pro ohřev plazmatu. Tuto účinnost lze určit na základě parciálních účinností jednotlivých po sobě jdoucích



procesů: konverze tepelné energie na elektrickou, vlastní spotřeby elektrárny a konverze elektrické energie na tepelnou energii plazmatu. Protože bude recirkulující výkon započítán do celkových výkonových toků již v projektové fázi, bude účinnost jeho konverze z tepelné energie na elektrickou shodná s hrubou účinností výroby elektrické energie. Procentuální vliv vlastní spotřeby bude také shodný [A50]. Proto lze účinnost recirkulace η_{REC} zapsat rovnicí:

$$\eta_{REC} = \eta_{GR} \eta_{SC} \eta_H, \quad (4.23)$$

kde η_{GR} je hrubá elektrická účinnost elektrárny, η_H je účinnost konverze elektrické energie do tepelné energie plazmatu, a faktor η_{SC} charakterizuje vliv vlastní spotřeby elektrárny:

$$\eta_{SC} = 1 - \frac{P_{SC}}{P_{GR}}. \quad (4.24)$$

V případě pulsního režimu reaktoru definujeme dva koeficienty pulsního režimu η'_{PO} a η''_{PO} . Koeficient η'_{PO} popisuje vliv zásobníku tepelné energie, koeficient η''_{PO} popisuje vliv zásobníku elektrické energie (obr. 4.6). Pulzní provoz reaktoru lze zjednodušeně charakterizovat se zanedbáním přechodových jevů délkou pulzu t_{BT} (burn time) a délkou prodlevy t_{DT} (dwell time). V době prodlevy nebude tepelný výkon reaktoru nulový a bude tvořen zbytkovým tepelným výkonem reaktoru P_{DH} (decay heat). Zbytkový tepelný výkon reaktoru je dobře známý ze štěpných jaderných reaktorů, v případě fúzního energetického reaktoru bude vyvíjen sekundárně aktivovanou konstrukcí jaderné zóny reaktoru a dosáhne řádově jednotek procent fúzního výkonu [28].

Odvozené rovnice pro koeficienty jsou následující:

$$\eta'_{PO} = (t_{BT} \eta_{ESS}^{TH} + t_{DT} \varepsilon_{DH}) / (t_{BT} \eta_{ESS}^{TH} + t_{DT}), \quad (4.25)$$

$$\eta''_{PO} = \eta_{ESS}^{EL} (t_{BT} + t_{DT}) / t_{BT}, \quad (4.26)$$

$$\varepsilon_{DH} = P_{DH} / P_{TH}, \quad (4.27)$$

kde η_{ESS}^{TH} označuje účinnost zásobníku tepelné energie, η_{ESS}^{EL} účinnost zásobníku elektrické energie, P_{DH} je zbytkový výkon reaktoru a ε_{DH} je faktor zbytkového tepelného výkonu. Účinnost recirkulace výkonu elektrárny s pulsním reaktorem je pak [A50]:

$$\eta_{REC} = \eta'_{PO} \eta_{GR} \eta_{SC} \eta''_{PO} \eta_H. \quad (4.28)$$

4.8 Čistá účinnost fúzní elektrárny

Vztah čisté účinnosti byl odvozen z výkonové bilanční rovnice v uzlu hrubého



elektrického výkonu elektrárny v souladu s obr. 4.5:

$$P_{GR} = P_{SC} + P_{HC} + P_{NET}. \quad (4.29)$$

Čistá účinnost jaderných a fosilních elektráren je obvykle vztahována k tepelnému výkonu energetického zdroje. V případě fúzního reaktoru je tepelný výkon reaktoru tvořen třemi složkami: primárním fúzním výkonem, sekundárním výkonem blanketu uvolňovaným při produkci tritia závislým na fúzním výkonu a recirkulujícím výkonem ohřevu plazmatu. Formálně jsou proto tři možnosti výpočtu čisté účinnosti: porovnání čistého výstupního výkonu s primárním fúzním výkonem ([6]-[9]), s celkovým tepelným výkonem reaktoru ([A50]) nebo s výkonem uvolňovaným v reaktoru.

Pro výběr správného konceptu čisté účinnosti bylo provedeno posouzení konzistence jednotlivých formulací v myšlenkovém stavu systému bez ztrát. Všechny dílčí účinnosti byly stanoveny rovné jedné s předpokladem, že v takovém případě je konzistentní hodnota čisté účinnosti elektrárny také rovna jedné:

- a) Čistá účinnost vztažená k fúznímu výkonu P_F vychází ze skutečnosti, že fúzní výkon je primárním generovaným výkonem. Tento přístup je použit v evropských studiích fúzních elektráren [6]-[9]. Vztah pro fúzní čistou účinnost elektrárny η_{NET}^F odvozený z rovnice (4.29) má tvar:

$$\eta_{NET}^F = \eta_{GR}\eta_{SC} \left(M_R - \frac{1-\eta_{REC}}{\eta_{REC}Q} \right). \quad (4.30)$$

V případě myšlenkového stavu bez ztrát je podle vztahu (4.30) čistá účinnost rovná faktoru multiplikace výkonu M_R :

$$\eta_{NET}^F = M_R. \quad (4.31)$$

Protože faktor multiplikace výkonu bude obecně větší než 1, fúzní čistá účinnost může být ve stavu bez ztrát obecně větší než 1 a její formulace je proto nekonzistentní.

- b) Čistá účinnost vztažená k celkovému tepelnému výkonu reaktoru P_{TH} je tradiční přístup a používá se v jaderné a tepelné energetice. Tento přístup byl také použit v [A50]. Čistá účinnost je vztažena k součtu tepelného výkonu uvolněnému v reaktoru a recirkulujícího tepelného výkonu podle rovnice (4.22). Vztah pro čistou tepelnou účinnost odvozený z rovnice (4.29) má tvar:

$$\eta_{NET}^{TH} = \eta_{GR}\eta_{SC} \left(1 - \frac{1}{\eta_{REC}(QM_R+1)} \right). \quad (4.32)$$



V případě myšlenkového stavu bez ztrát rovnice (4.32) přechází do tvaru:

$$\eta_{NET}^{TH} = 1 - \frac{1}{Q_{M_R+1}}. \quad (4.33)$$

Čistá účinnost vztažená k celkovému tepelnému výkonu reaktoru může být ve stavu bez ztrát obecně menší než 1. Proto je i tato formulace čisté účinnosti nekonzistentní.

- c) Čistá účinnost vztažená k uvolněnému výkonu ($P_F + P_B$) vychází z toho, že čistý výstupní výkon elektrárny primárně souvisí s generovaným výkonem, tedy fúzním výkonem a výkonem blanketu, a nikoliv s recirkulujícím výkonem, který reaktorem pouze prochází a je opět využit pro ohřev paliva. Vztah pro čistou účinnost vztaženou k uvolňovanému výkonu má tvar:

$$\eta_{NET}^R = \eta_{GR}\eta_{SC} \left(1 - \frac{1-\eta_{REC}}{\eta_{REC}Q_{M_R}}\right). \quad (4.34)$$

V případě myšlenkového stavu bez ztrát přejde rovnice (4.34) do tvaru:

$$\eta_{NET}^R = 1. \quad (4.35)$$

Protože je čistá účinnost vztažená k uvolněnému výkonu ve stavu bez ztrát rovna jedné, je tato formulace účinnosti konzistentní.

Díky recirkulaci výkonu ohřevu reaktorem nelze pro výpočet čisté účinnosti použít celkový tepelný výkon reaktoru a musí být použit pouze tepelný výkon uvolňovaný v reaktoru. Pro další analýzu proto bude používána čistá účinnost založená na tepelném výkonu uvolňovaném v reaktoru:

$$\eta_{NET} = \frac{P_{NET}}{P_{FM_R}}, \quad (4.36)$$

$$\eta_{NET} = \eta_{GR}\eta_{SC} \left(1 - \frac{1-\eta_{REC}}{\eta_{REC}Q_{M_R}}\right), \quad (4.37)$$

kde součin $\eta_{GR}\eta_{SC}$ představuje čistou účinnost elektrárny bez ohřevu plazmatu a zlomek v závorce reprezentuje vliv ztrát recirkulace výkonu ohřevu.

V případě elektrárny s pulsním reaktorem má výkonová bilanční rovnice v uzlu hrubého elektrického výkonu elektrárny tvar podle obr. 4.6:

$$P_{GR} = P_{SC} + P_{HC}^B + P_{NET}. \quad (4.38)$$

Vztah pro čistou účinnost pak zahrnuje koeficienty pulzního režimu podle (4.28)

$$\eta_{NET} = \eta_{GR}\eta_{SC}\eta'_{PO} \left(1 - \frac{1-\eta_{REC}}{\eta_{REC}Q_{M_R}}\right). \quad (4.39)$$

Rovnice čisté účinnosti (4.37) a (4.39) pro kontinuální a pulsní schéma mohou být přepsány do společné formy:

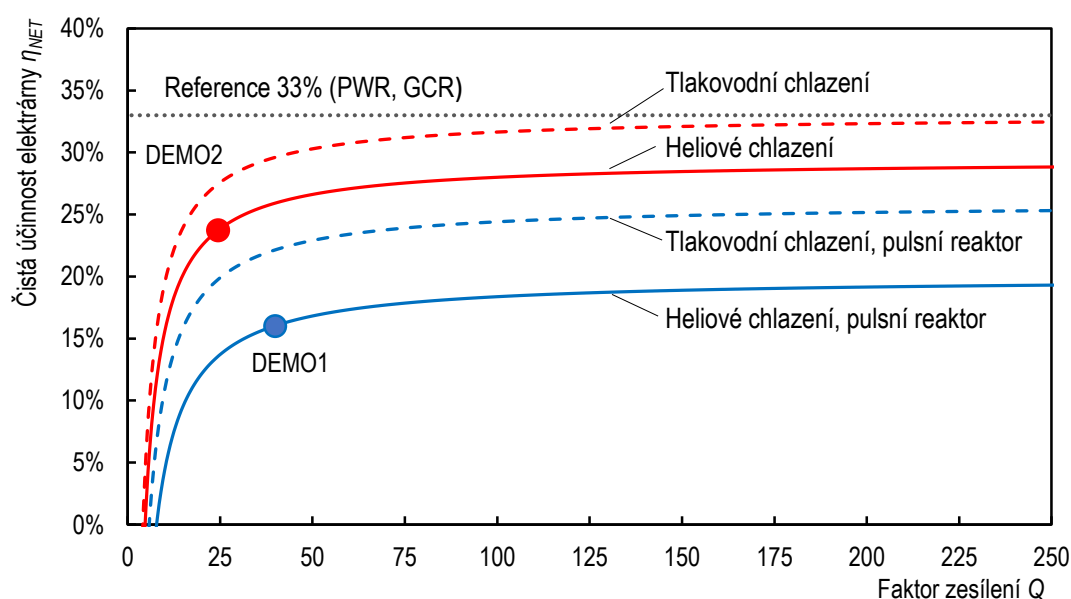
$$\eta_{NET} = \eta_{NET}^{NOH} (1 - \varepsilon_{REC}), \quad (4.40)$$

kde η_{NET}^{NOH} označuje čistou účinnost elektrárny bez ohřevu paliva a ε_{REC} je faktor ztrát recirkulace výkonu ohřevu:

$$\varepsilon_{REC} = \frac{1 - \eta_{REC}}{\eta_{REC} Q_{MR}}. \quad (4.41)$$

Rovnice (4.40) je finální rovnicí pro výpočet vlivu ztrát recirkulace výkonu na čistou účinnost fúzní elektrárny. Faktor ε_{REC} zahrnuje vliv příkonu systému HCD a současně částečnou kompenzaci tohoto vlivu recirkulací výkonu ohřevu.

Graf na obr. 4.7 ilustruje závislost čisté účinnosti fúzní elektrárny na zesílení reaktoru Q , vyvolanou vlivem ztrát recirkulace výkonu podle rovnice (4.40) v případě různých typů reaktorů [A48]. Jsou zobrazeny závislosti pro modely DEMO1 a DEMO2 popsané v tabulce 1.1 chlazené heliem (plná čára) a k nim jsou doplněny varianty stejných reaktorů avšak chlazených tlakovou vodou (čárkovaná čára). Rozdíl mezi plynem a vodou chlazenými reaktory je způsoben rozdílnou vlastní spotřebou související s vysokými tlakovými ztrátami chladicích kanálů reaktoru. Důvodem pro použití helia v modelech DEMO1 a DEMO2 je mnohostranná nekompatibilita vody s fúzními technologiemi [A4].



Obr. 4.7 Čistá účinnost elektrárny v závislosti na zesílení reaktoru Q , typu reaktoru a typu chlazení reaktoru. Zobrazené pracovní body DEMO1 a DEMO2 odpovídají elektrárnám podle tab. 1.1.



4.9 Přínos recirkulace výkonu

S cílem identifikovat vlastní přínos recirkulace výkonu lze faktor ε_{REC} (4.41) rozložit na složku vyvolanou spotřebou systému HCD a složku související s recirkulací výkonu ohřevu. Složka spotřeby systému HCD má tvar:

$$\varepsilon_H = \frac{1}{\eta_{REC} Q_{M_R}}. \quad (4.42)$$

Složka recirkulace výkonu má tvar:

$$\varepsilon_R = -\frac{1}{Q_{M_R}}. \quad (4.43)$$

Přínos recirkulace se stane transparentní, pokud zahrneme spotřebu systému HCD (4.42) do vlastní spotřeby elektrárny. Tento přístup odpovídá konvenčnímu přístupu používanému v energetice. Čistou účinnost se zahrnutím ohřevu jako součásti vlastní spotřeby elektrárny avšak bez recirkulace výkonu ohřevu označíme η_{NET}^H . Rovnice čisté účinnosti má pak tvar:

$$\eta_{NET} = \eta_{NET}^H (1 - \varepsilon_R), \quad (4.44)$$

Ve speciálním případě fúzního reaktoru bez produkce tritia, například při využití DD reakce, rovnice (4.44) přechází do tvaru:

$$\eta_{NET} = \eta_{NET}^H \left(1 + \frac{1}{Q}\right). \quad (4.45)$$

Rovnice (4.44) a (4.45) jsou finálními rovnicemi popisujícími přínos recirkulace výkonu k potlačení vlivu ohřevu paliva na čistou účinnost elektrárny. Rovnice (4.45) odhaluje vedlejší význam faktoru zesílení Q , jehož reciproká hodnota odpovídá zvýšení čisté účinnosti elektrárny vyvolané recirkulací výkonu ohřevu.

4.10 Validace výpočtu čisté účinnosti

Odvozená rovnice (4.40) byla použita pro výpočet čisté účinnosti modelů elektráren DEMO1 a DEMO2. V tabulce 4.1 jsou uvedeny čisté účinnosti modelů podle [6] a [7] a vypočtené hodnoty podle rovnice (4.40). Zjištěné účinnosti se od detailního výpočtu liší o méně než 0,5 %.

Tab. 4.1 Validace odhadu vlivu ztrát recirkulace výkonu na čistou účinnost.

Čistá účinnost	Modelová data	Rovnice (4.40)
DEMO 1	20,7 %	20,6 %
DEMO 2	23,7 %	23,7 %

4.11 Kritéria 90% a 95% účinnosti

Jak ukazuje obr. 4.4, modely elektráren DEMO1 a DEMO2 splňují kritérium inženýrské rovnováhy. Aplikace faktoru zesílení reaktoru Q umožňuje sestavit bezrozměrná kritéria popisující podmínky, které jsou nutné pro omezení vlivu ztrát recirkulace výkonu pod 10%, respektive 5 % čisté účinnosti elektrárny. Odvození kritéria 90% účinnosti vychází z rovnice (4.40):

$$\varepsilon_{REC} \leq 0.1 . \quad (4.46)$$

Úpravou rovnice (4.46) získáme rovnici kritéria účinnosti 90% pro faktor zesílení:

$$Q \geq Q_{90} , \quad (4.47)$$

kde Q_{90} je faktor zesílení při kterém dojde vlivem ztrát recirkulace výkonu právě k 10% snížení čisté účinnosti elektrárny (obr. 4.8):

$$Q_{90} = 10 \frac{1 - \eta_{REC}}{\eta_{REC} M_R} , \quad (4.48)$$

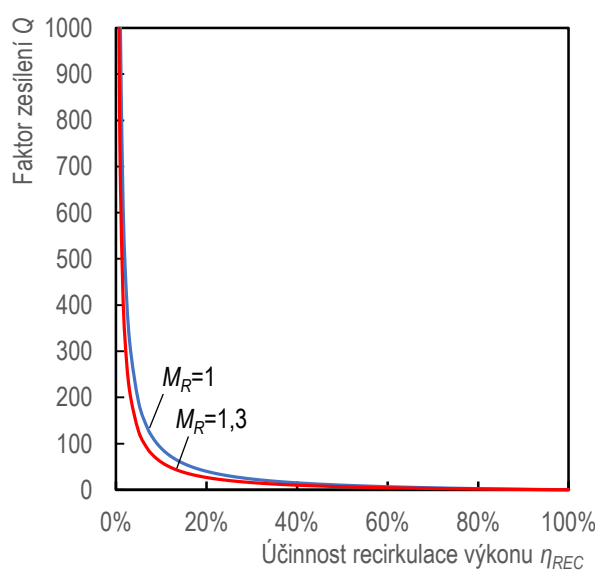
$$Q_{90} = 10 Q_B , \quad (4.49)$$

kde Q_B je faktor zesílení nutný pro dosažení inženýrské rovnováhy podle rovnice (4.21).

Odvození kritéria 95% účinnosti je provedeno stejným postupem:

$$\varepsilon_{REC} \leq 0.05 . \quad (4.50)$$

$$Q \geq Q_{95} , \quad (4.51)$$



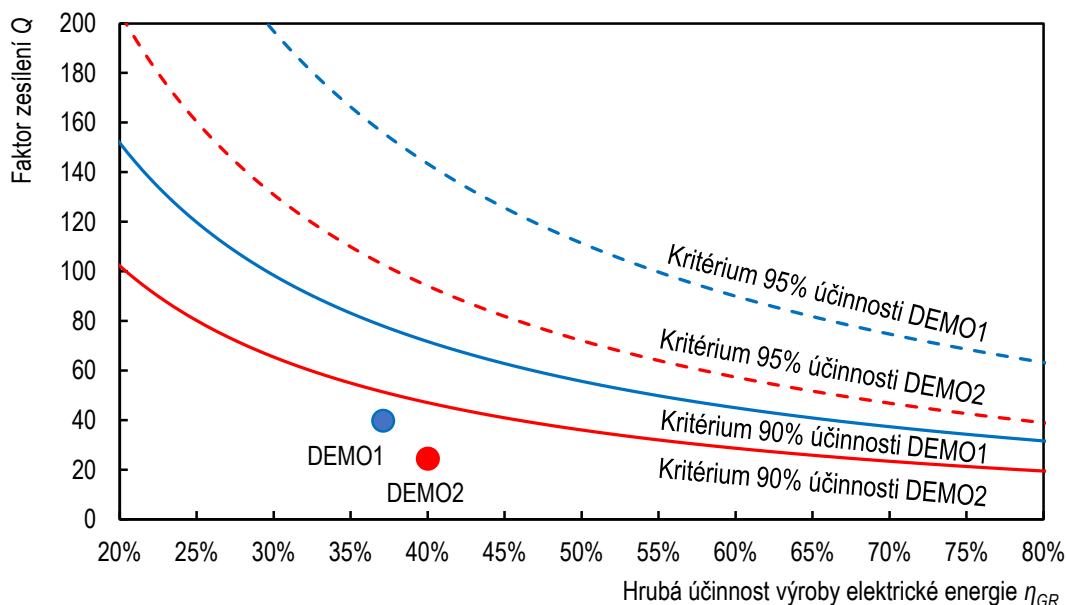
Obr. 4.8 Kriteriační faktor Q_{90} pro různé hodnoty faktoru multiplikace M_R .

kde Q_{95} je faktor zesílení při kterém dojde vlivem ztrát recirkulace výkonu právě k 5% snížení čisté účinnosti:

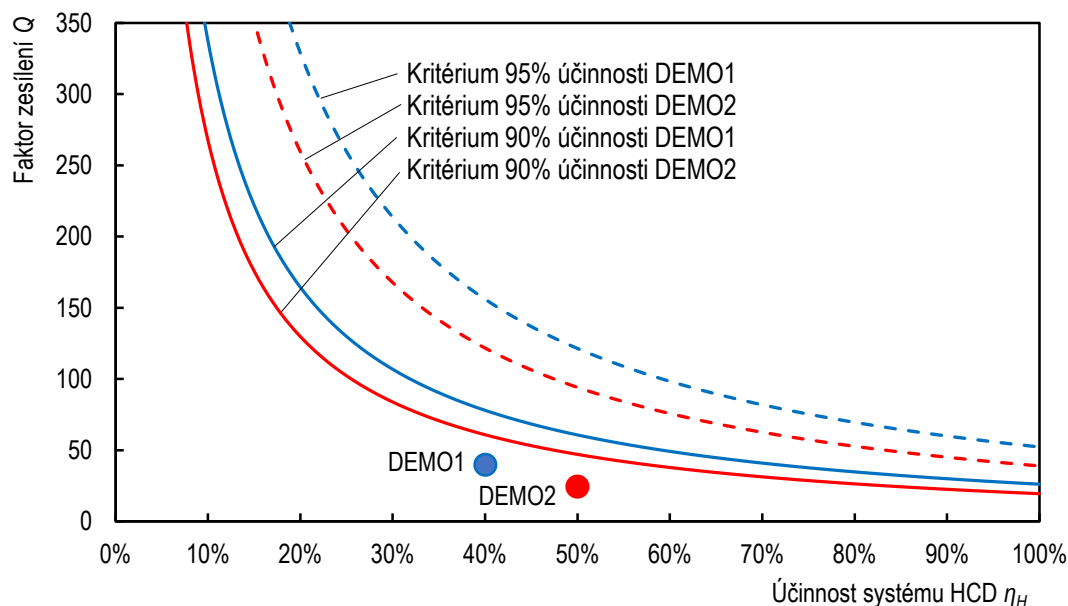
$$Q_{95} = 20 Q_B. \quad (4.52)$$

Vztah faktorů Q_{90} a Q_{95} a faktoru zesílení inženýrské rovnováhy Q_B (4.21) dokumentuje úzkou souvislost mezi inženýrskou rovnováhou a čistou účinností fúzní elektrárny [A48].

Graf na obr. 4.9 zobrazuje jednotlivá energetická kritéria modelů fúzní elektrárny DEMO1 a DEMO2 v závislosti na hrubé účinnosti výroby elektrické energie. Ani jeden z modelů nespĺňuje odvozená kritéria účinnosti. Ztráty recirkulace výkonu způsobují relativní snížení čisté účinnosti modelů o 18,7% v případě DEMO1 a 19,2% v případě DEMO2. Zvýšení hrubé účinnosti výroby elektřiny může být dosaženo optimalizací tepelného oběhu elektrárny, aby byly v maximální míře využity specifické vlastnosti fúzního energetického reaktoru, například použitím tepelného oběhu s nadkritickým CO_2 [A8]. Možnosti zvýšení hrubé účinnosti jsou však velmi omezené a tato cesta problém nevyřeší. Graf závislosti energetických kritérií modelů fúzní elektrárny DEMO1 a DEMO2 na účinnosti systému HCD na obr. 4.10 naznačuje dva základní způsoby, jak kritéria účinnosti splnit: zvýšení účinnosti systému HCD a použití fúzních reaktorů s vyšším zesílením Q .

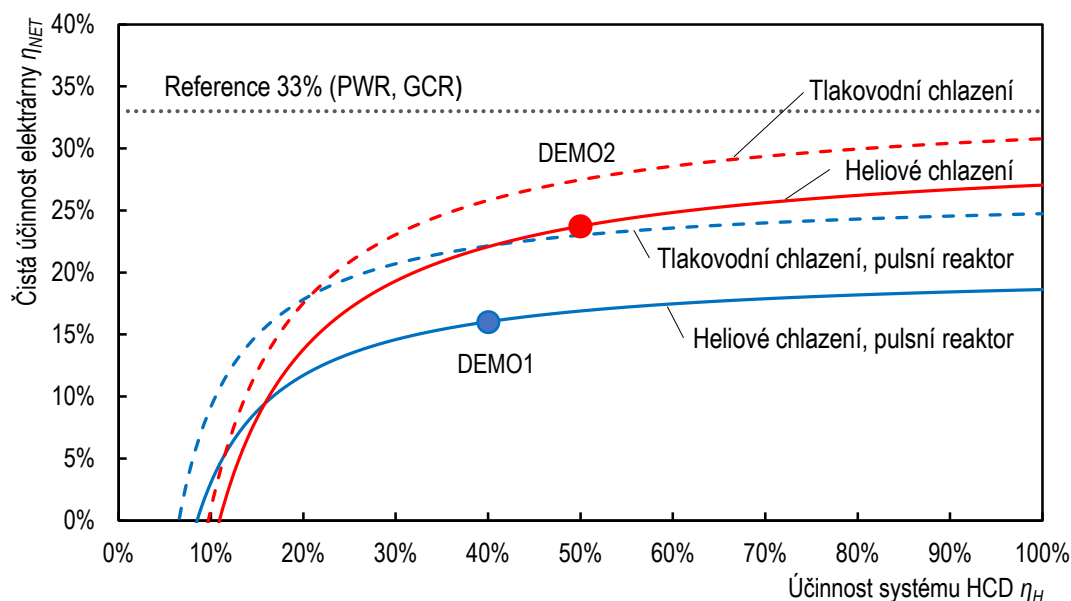


Obr. 4.9 Kritéria a pracovní body modelů DEMO1 a DEMO2 z tab. 1.1 v závislosti na hrubé účinnosti výroby elektřiny.



Obr. 4.10 Kritéria a pracovní body modelů DEMO v závislosti na účinnosti systému ohřevu HCD.

Současná účinnost systémů HCD je 20 - 30%, avšak probíhající výzkum naznačuje dosažitelnou účinnost na úrovni až 60% [29]. Zvýšení faktoru zesílení Q souvisí s pokrokem fyziky termojaderného plazmatu. Při dosažení režimu zapálení plazmatu bude systém HCD zajišťovat pouze neinduktivní generování elektrického proudu, a proto bude možné reaktor provozovat s velmi vysokým zesílením. Závislost čisté účinnosti elektrárny na účinnosti systému HCD je zobrazena na obr. 4.11.



Obr. 4.11 Čistá účinnost elektrárny a pracovní body modelů DEMO v závislosti na účinnosti systému ohřevu HCD.



Kritériální hodnoty faktoru zesílení Q pro oba referenční modely DEMO jsou uvedeny v tabulce 4.2. Z tabulky vyplývá, že je pro minimalizaci ztrát souvisejících s ohřevem plazmatu nezbytné, aby fúzní reaktory dosahovaly faktoru zesílení ~ 100 .

Tab. 4.2 Pracovní a kritériální hodnoty zesílení Q modelů DEMO.

Model	Q	Q_B	Q_{90}	Q_{95}
DEMO 1	39,9	7,8	78,0	156,0
DEMO 2	24,5	4,7	47,1	94,1

4.12 Závěr

Fúzní elektrárny budou charakteristické vysokou spotřebou vyrobené elektřiny na ohřev plazmatu doprovázenou recirkulací výkonu ohřevu zařízením elektrárny. Pokud by recirkulace výkonu probíhala bez ztrát, ohřev paliva by neměl žádný dopad na výrobu elektrické energie, protože výkon vložený do plazmatu by se vracel zpět a znovu by ohříval plazma. Ztráty související s recirkulací výkonu v zařízení elektrárny ale neumožní, aby recirkulace výkonu plně pokryla spotřebu systému ohřevu. Kompenzací ztrát dojde k poklesu čisté účinnosti výroby elektřiny. Nalezené vztahy kvantifikují tyto ztráty i jejich vliv na čistou účinnost elektrárny. Přínos recirkulace bude úměrný reciproké hodnotě faktoru zesílení reaktoru.

Snížení čisté účinnosti ohřevem plazmatu úzce souvisí s Lawsonovým kritériem inženýrské rovnováhy a je fundamentálním rysem energetického využití jaderné fúze. Odvozené kritériální rovnice sumarizuje tab. 4.3.

Čistou účinnost fúzních elektráren je nutné díky recirkulaci výkonu ohřevu vztahovat k výkonu uvolněnému v reaktoru. Čistá účinnost vztahovaná k tepelnému výkonu reaktoru není konzistentní, protože zahrnuje recirkulující výkon ohřevu, který se nepodílí na výstupním výkonu.

Vliv ztrát při ohřevu plazmatu lze významně snížit jednak provozem reaktorů s vysokým faktorem zesílení reaktoru Q a jednak zvýšením účinnosti jednotlivých zařízení podílejících se na recirkulaci výkonu.

Výsledky práce byly prezentovány v řadě tuzemských a zahraničních publikací. Lawsonova kritéria byla popsána v článku *Lawsonovo kritérium – kritérium fúzní energetiky* [A48]. Podrobnosti k fyzikální problematice inženýrské rovnováhy lze nalézt v článku *Engineering Breakeven* [A49]. Recirkulace výkonu byla popsána v článku *Recirkulace*



výkonu ve fúzních elektrárnách [A50]. Problematika snížení čisté účinnosti fúzních elektráren oproti jiným typům elektráren vlivem recirkulace výkonu byla analyzována ve zprávě *Estimation of the DEMO Net Efficiency* [A51].

Tab. 4.3 Sumarizace odvozených kritériálních rovnic.

Kritérium	Výkonová formulace	Fyzikální formulace	Bezrozměrná formulace
Vědecká rovnováha	$P_F \geq P_H$	$n\bar{T}\tau_E \geq \frac{20\bar{T}^2}{\langle\sigma v\rangle E_F}$	$Q \geq 1$
Inženýrská rovnováha	$\eta_{REC}P_R \geq P_H$ $P_\alpha \geq \Omega_i P_L$	$n\bar{T}\tau_E \geq \Omega_i \frac{120\bar{T}^2}{\langle\sigma v\rangle E_F}$ $\Omega_i = \frac{1 - \eta_{REC}}{1 - (1 - 5 M_R)\eta_{REC}}$	$Q \geq Q_B$ $Q_B = \frac{1 - \eta_{REC}}{M_R \eta_{REC}}$
Kritérium 90% účinnosti	$\eta_{NET} \geq 0.9 \eta_{NET}^{NOH}$ $P_\alpha \geq \Omega_{90} P_L$	$n\bar{T}\tau_E \geq \Omega_{90} \frac{120\bar{T}^2}{\langle\sigma v\rangle E_F}$ $\Omega_{90} = \frac{1 - \eta_{REC}}{1 - (1 - 0.5 M_R)\eta_{REC}}$	$Q \geq Q_{90}$ $Q_{90} = 10 Q_B$
Kritérium 95% účinnosti	$\eta_{NET} \geq 0.95 \eta_{NET}^{NOH}$ $P_\alpha \geq \Omega_{95} P_L$	$n\bar{T}\tau_E \geq \Omega_{95} \frac{120\bar{T}^2}{\langle\sigma v\rangle E_F}$ $\Omega_{95} = \frac{1 - \eta_{REC}}{1 - (1 - 0.25 M_R)\eta_{REC}}$	$Q \geq Q_{95}$ $Q_{95} = 20 Q_B$
Zapálení	$P_\alpha \geq P_L$	$n\bar{T}\tau_E \geq \frac{120\bar{T}^2}{\langle\sigma v\rangle E_F}$	-



Kapitola 5

Vývoj bismutových Hallových senzorů pro fúzní reaktor ITER

Vývoj radiačně a teplotně odolných Hallových senzorů je součástí přípravy technologií pro fúzní energetické reaktory. V rámci práce byly úspěšně vyvinuty kovové Hallovy senzory na bázi bismutu pro měření magnetického pole mezinárodního fúzního reaktoru ITER.



5.1 Úvod

Zatímco ve stávající energetice nehraje magnetické pole významnou roli, ve fúzních elektrárnách bude magnetický systém udržující plazma jednou z hlavních reaktorových technologií. Protože magnetické pole reaktoru neustále interaguje s plazmatem, měřením magnetického pole lze zjistit řadu důležitých informací, např. celkový proud v plazmatu, lokální proudové hustoty, energii obsaženou v plazmatu nebo identifikovat magnetohydrodynamické nestability. Lokální proudová hustota v plazmatu odráží lokální hustotu a teplotu plazmatu a ze změřeného lokálního magnetického pole je možné odvodit polohu plazmatu.

Hlavním nástrojem magnetické diagnostiky experimentálních fúzních reaktorů jsou magnetické cívky. Magnetické cívky ale umožňují měřit pouze změny magnetického pole a jsou vhodné pouze pro experimentální zařízení s délkou výboje v jednotkách až desítkách sekund, zatímco v energetických fúzních reaktorech bude při provozu ustálené magnetické pole. Diagnostika energetických reaktorů proto vyžaduje senzory ustáleného magnetického pole, jakými jsou například Hallovy senzory.

Hallovy senzory jsou v současnosti dobře zvládnutou průmyslovou technologií a jsou široce využívány v řadě oblastí automatizace, robotizace, automobilového průmyslu a elektrotechniky. Jejich pomocí je kontaktní měření nahrazeno bezkontaktním prostřednictvím měření magnetického pole, například při snímání polohy, otáček nebo elektrického proudu. Hallovo napětí je měřeno na tenké polovodičové vrstvě nebo na tenkém plátku polovodičového materiálu se čtyřmi kontakty pro napájení a pro snímání napětí. Nejčastěji používanými polovodiči v senzorech jsou InSb, InAs nebo GaAs. Polovodiče nabízejí vysokou citlivost na magnetické pole, avšak v prostředí s intenzivním neutronovým zářením a vysokými teplotami dochází k jejich degradaci [A52].

Hallův jev se projevuje kromě polovodičů také u kovů. Kovy jsou radiačně i teplotně významně odolnější než polovodiče, avšak jejich citlivost na magnetické pole je oproti polovodičům o 6 a více řádů nižší. Jedinou výjimkou je bismut, jehož citlivost je pouze o 2 řády nižší ve srovnání s používanými polovodiči, jak ukazuje tab. 5.1.

Teplota tání bismutu je však pouze 271,5 °C. Zlato nebo měď nabízejí nesrovnatelně vyšší pracovní teploty než bismut. Vysoký rozdíl v citlivosti bismutu oproti těmto kovům ale znamená kvalitativní rozdíl ve výstupním napětí senzorů. Bismutové senzory mají na výstupu signál na úrovni milivoltů, který lze měřit s přesností na mikrovolty a dosáhnout tak



vysoké přesnosti měření magnetického pole. Sensory s podobnou detekční vrstvou z jiného kovu by pro dosažení stejné přesnosti vyžadovaly měření na úrovni nanovoltů a pikovoltů, které je v průmyslovém prostředí obtížné. Aplikovatelnost bismutových senzorů je proto výrazně jednodušší a použití jiných kovů je podmíněno dalším výzkumem [A52].

Tab. 5.1 Hallův koeficient vybraných polovodičů a kovů při pokojové teplotě [cm^3/C] [30].

InSb	300
InAS	100
GaAs	60
Bi	-0.5
Cu	-0.0005
Au	-0.0007

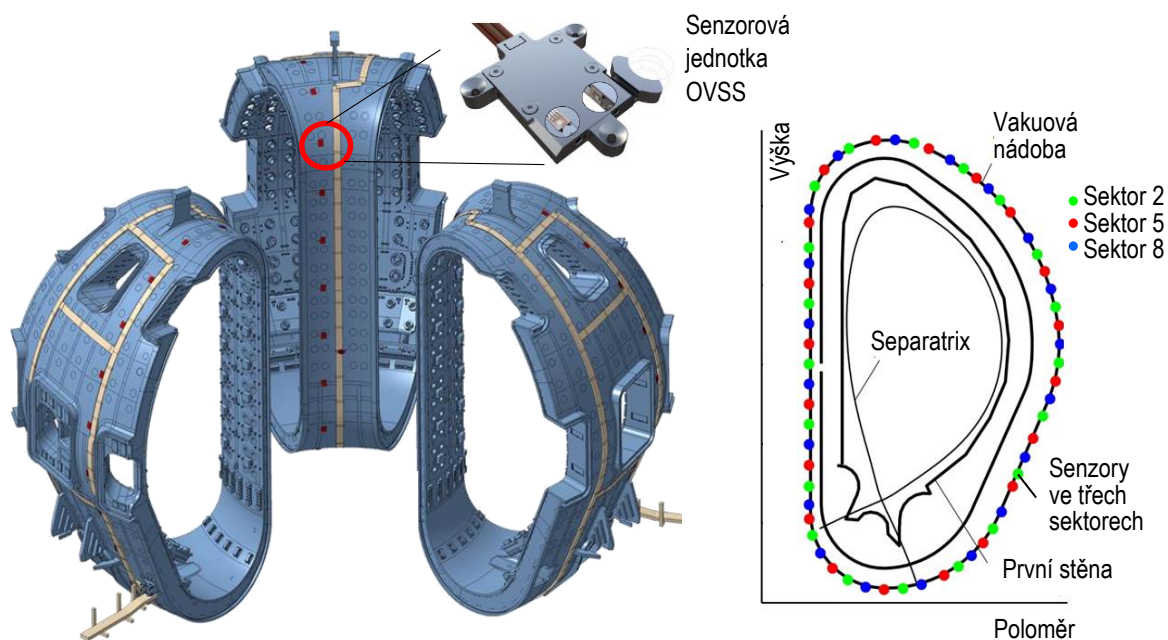
Tuzemský výzkum radiačně a teplotně odolných Hallovyých senzorů byl zahájen v roce 2000 postupným nasazováním polovodičových Hallovyých senzorů v evropských fúzních reaktorech TEXTOR (Německo), CASTOR (ČR), TJ-II (Španělsko), TORE SUPRA (Francie) a JET (Velká Británie) [31]-[33]. Paralelně také probíhaly ozařovací testy polovodičových senzorů v jaderném reaktoru LVR-15 Ústavu jaderného výzkumu a na cyklotronu U-120M Ústavu jaderné fyziky v Řeži u Prahy [33]-[35]. Nejlepší výsledky pro středně náročné radiační prostředí dosáhly senzory vyvinuté na Lvovské polytechnické národní univerzitě na bázi dopovaných heterogenních polovodičů [34]-[35]. V dalším kroku byl v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR zahájen vývoj kovových Hallovyých senzorů umožňujících stabilní měření magnetického pole i při vysokých radiačních dávkách [A52].

V roce 2010 bylo zahájeno testování Hallovyých senzorů s měděnou detekční vrstvou. Měděné senzory prokázaly očekávanou radiační a tepelnou stabilitu. Projevila se ale nízká citlivost měděné vrstvy na magnetické pole způsobující velmi nízký výstupní signál. Nízký výstupní signál v kombinaci s vysokým napájecím proudem způsoboval vysoký poměr šumu vůči užitečnému signálu a komplikoval měření i v laboratorních podmínkách [36],[37]. Na základě tohoto zjištění bylo přistoupeno k vývoji senzorů s bismutovou detekční vrstvou a v roce 2014 byla vyrobena první série bismutových senzorů o rozměrech 9,6 x 9,6 mm a tloušťce detekční vrstvy $\sim 4,5 \mu\text{m}$. Citlivost bismutových senzorů byla v souladu s očekáváním o několik řádů vyšší než citlivost měděných senzorů. Sensory také úspěšně prošly prvotními teplotními a ozařovacími testy, na jejichž základě byla v roce 2015 uzavřena smlouva s ITER International Fusion Energy Organization (ITER Organization) o společném vývoji kovových Hallovyých senzorů pro fúzní reaktor ITER.

5.2 Hallové senzory pro ITER

Hallové senzory budou v reaktoru ITER instalovány na vnějším plášti vakuové nádoby reaktoru ve třech sektorech 2, 5 a 8 rozmístěných po 120° v toroidálním směru vakuové nádoby (obr. 5.1). Senzory budou uloženy do sensorových jednotek označovaných jako OVSS (Outer Vessel Steady-state Sensor). Každá z jednotek bude obsahovat dvojici Hallových senzorů umístěných kolmo k sobě tak, aby měřily tangenciální a normálovou složku magnetického pole. Celkově bude instalováno 60 sensorových jednotek,

Rozsah měřeného magnetického pole bude $\pm 2,5$ T, chyba měření by neměla přesáhnout 4 mT. Pracovní teplota senzorů bude 90 - 100 °C, v průběhu vypékání vakuové nádoby ale může teplota senzorů dosáhnout až 220 °C. Celková neutronová fluence, kterou budou exponovány senzory za dobu provozu reaktoru, dosáhne přibližně $1,3 \times 10^{22}$ n/m² [A53].

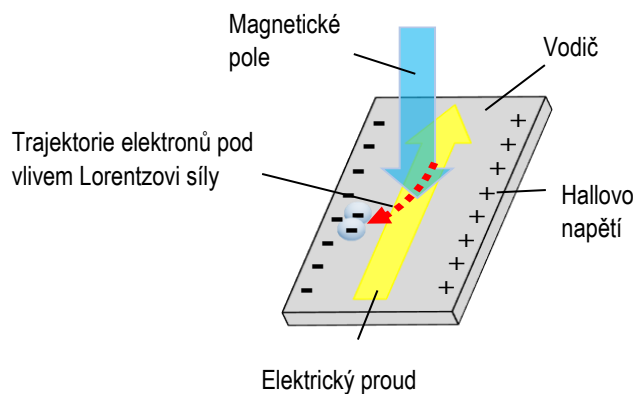


Obr. 5.1 Tři sektory vakuové nádoby reaktoru ITER budou osazeny Hallovými senzory. Barevné body označují umístění sensorových jednotek.

5.3 Hallův jev

Hallův jev byl poprvé popsán Edwinem Herbertem Hallem v roce 1879 v článku *On a New Action of the Magnet on Electric Currents* [38]. Při současném působení elektrického a magnetického pole dochází ve vodičích a polovodičích k oddělení kladného a záporného náboje a ke vzniku nového elektrického pole označovaného na památku E. H. Halla jako

Hallovo pole. Příčinou jevu je Lorentzova magnetická síla působící na volné nosiče náboje tvořící elektrický proud. Tyto nosiče jsou vychylovány ze svého původního směru k jedné straně vodiče, jak ukazuje obr. 5.2 [A52].



Obr. 5.2 Schematický nákres Hallova jevu.

Nerovnoměrné rozdělení elektrického náboje vytváří elektrické pole, které silově působí proti silovému působení magnetického pole a generuje elektrické napětí orientované kolmo ke směru elektrického proudu. Velikost napětí odpovídá jednoduchému vztahu:

$$U_H = R_H \frac{IB}{t}, \quad (5.1)$$

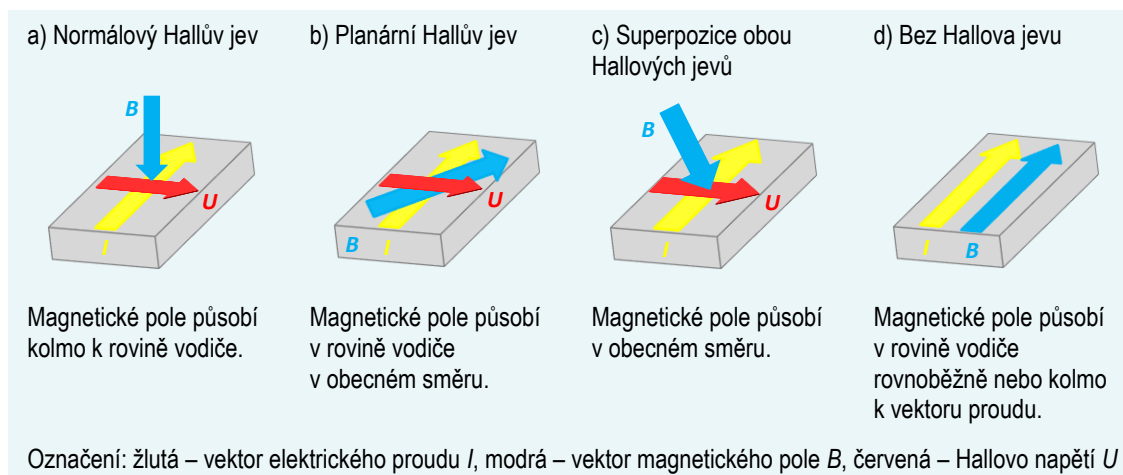
kde U_H označuje Hallovo napětí, R_H Hallův koeficient, I elektrický proud, B magnetické pole kolmé k rovině vodiče a t tloušťku vodiče. Hallův koeficient závisí na množství a mobilitě volných nosičů náboje v materiálu a je obecně nelineárně závislý na teplotě materiálu a na velikosti působícího magnetického pole [39].

Rovnice (5.1) popisuje normálový Hallův jev vyvolaný složkou magnetického pole kolmou k rovině vodiče. V roce 1954 byl C. Goldbergem a R. E. Davisem popsán jiný podobný jev, planární Hallův jev [40]. Planární Hallův jev vzniká, na rozdíl od normálového Hallova jevu, při působení planárního magnetického pole v rovině vodiče. Působením Lorentzovy síly na volné nosiče náboje v planárním magnetickém poli také vzniká elektrické napětí kolmo k toku elektrického proudu. Toto napětí, označované jako planární Hallovo napětí, je však na rozdíl od normálového Hallova napětí úměrné druhé mocnině velikosti magnetického pole:

$$U_P = P_H \frac{IB^2}{2t}, \quad (5.2)$$



kde U_P je planární Hallůvo napětí, P_H je planární Hallův koeficient a B je magnetické pole působící v rovině vodiče pod úhlem 45° ke směru toku elektrického proudu. Podobně jako v případě normálového Hallova jevu je planární Hallův koeficient obecně nelineárně závislý na teplotě vodiče a na velikosti magnetického pole [39].



Obr. 5.3 Superpozice normálového a planárního Hallůva napětí.

Na obr. 5.3 jsou zobrazeny čtyři konfigurace vektorů magnetického pole (modrá barva) a elektrického proudu (žlutá barva) [A52]. Pokud magnetické pole působí kolmo k rovině vodiče, pak je normálový Hallův jev nejsilnější a planární Hallův jev nenastává (obr. 5.3a). Pokud magnetické pole působí v rovině vodiče, normálový Hallův jev nenastává, avšak lze detekovat planární Hallův jev, který je nejsilnější, pokud vektor magnetického pole svírá úhel 45° s vektorem elektrického proudu (obr. 5.3b). V obecném případě dochází k superpozici obou jevů (obr. 5.3c). Žádný Hallův jev nenastává pouze v konfiguraci, kdy je vektor magnetického pole v rovině vodiče a je rovnoběžný nebo kolmý k vektoru elektrického proudu (obr. 5.3d).

Výstupní napětí Hallových senzorů je superpozicí normálového Hallůva napětí, planárního Hallůva napětí a offsetového napětí souvisejícího s reálným provedením senzoru. Offsetové napětí vzniká při geometrické asymetrii výstupních kontaktů senzoru vzhledem k toku elektrického proudu a jeho velikost souvisí s velikostí geometrického offsetu těchto kontaktů.

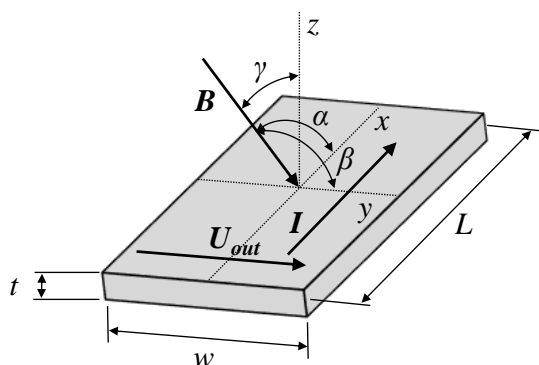
Elektrické pole Hallůva senzoru je popsáno vektorovou rovnicí:

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{j} + R_H [\mathbf{j} \times \mathbf{B}] + P_H (\mathbf{j} \cdot \mathbf{B}) \cdot \mathbf{B}, \quad (5.3)$$

kde ρ je měrný odpor, j je proudová hustota, R_H je Hallův koeficient, B je magnetické pole a P_H je planární Hallův koeficient. Vektorovou rovnici lze přepsat do skalárního tvaru:

$$U_{out} = R_{off}I + \frac{R_H}{t}IB \cos \gamma + \frac{P_H}{t}IB^2 \cos \alpha \cos \beta, \quad (5.4)$$

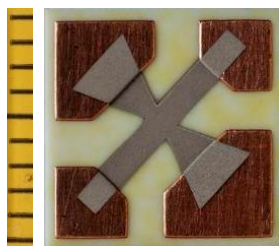
kde U_{out} je výstupní napětí senzoru, R_{off} je offsetový odpor senzoru, I je napájecí elektrický proud, t je tloušťka citlivé vrstvy, α je úhel mezi vektorem B a osou x , β je úhel mezi vektorem B a osou y a γ je úhel mezi vektorem B a osou z podle obr. 5.4. První člen v rovnici (5.4) představuje offsetové napětí senzoru, druhý člen představuje normálové Hallovo napětí úměrné B a třetí člen planární Hallovo napětí úměrné B^2 [A52].



Obr. 5.4 Schematický náčrt citlivé vrstvy Hallova senzoru.

5.4 Vývoj senzorů

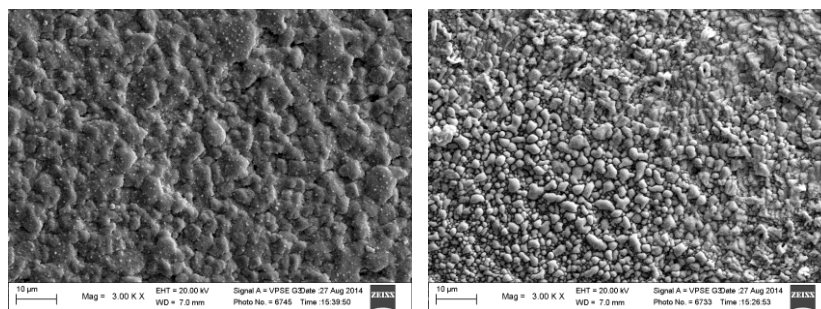
Prvním krokem ve vývoji Halloových senzorů pro reaktor ITER bylo nalezení vhodného výrobního postupu a jeho optimalizace. Celkem bylo vyrobeno 14 testovacích sérií senzoru v designu 9,6 x 9,6 mm (obr. 5.5) s různými podkladovými substráty, různou tloušťkou detekční vrstvy nebo odlišným technologickým postupem (Příloha A).



Obr. 5.5 Bismutový Hallův senzor 9,6 x 9,6 mm.

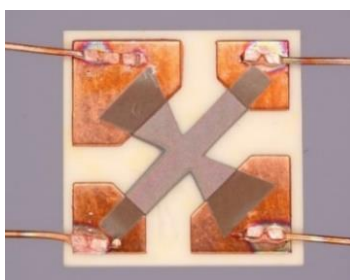
Na základě relativně vysoké tepelné vodivosti ($\sim 170 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ @ 20°C) ve srovnání s jinými keramickými materiály byl za podkladový substrát senzorů zvolen keramický nitrid hliníku AlN. Substrát o tloušťce $630 \mu\text{m}$ byl technologií Direct Bonded Copper DBC pokryt z obou stran měděnou vrstvou o tloušťce $127 \mu\text{m}$. Na jedné straně byly v mědi vyleptány plošné kontakty senzoru [A54].

Bismutová detekční vrstva byla na substrát deponována magnetronovým naprašováním. Pro nalezení parametrů vrstvy poskytující maximální Hallovo napětí byly naprašovány detekční vrstvy o tloušťce v rozmezí od $0,45$ do $4,5 \mu\text{m}$ při různých teplotách deponování (obr. 5.6). Testy ukázaly, že bismut vytváří při deponování složitou strukturu s optimální tloušťkou vrstvy $\sim 1 \mu\text{m}$ a s optimální teplotou deponace 200°C [A54].



Obr. 5.6 Zvětšenina povrchu deponovaného bismutu elektronovým mikroskopem. Vlevo – deponování při teplotě 20°C , vpravo – deponování při teplotě 200°C . Zvrásněný povrch na snímku vpravo poskytuje výrazně vyšší citlivost vrstvy na magnetické pole.

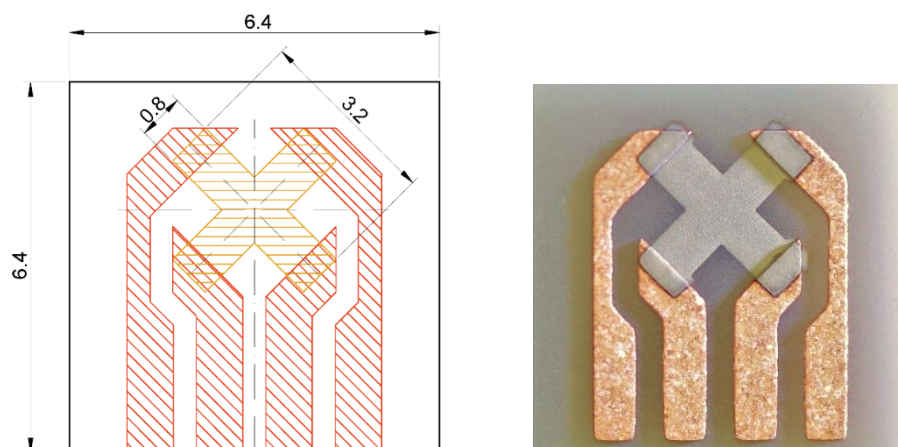
Současně s optimalizací detekční vrstvy probíhal výběr vhodného způsobu připojení přívodních drátů. Vzhledem k tepelné a radiační zátěži senzorů bylo zvoleno bondování, přímé přivaření měděných drátků na měděnou kontaktní plochu pomocí termokomprese (obr. 5.7).



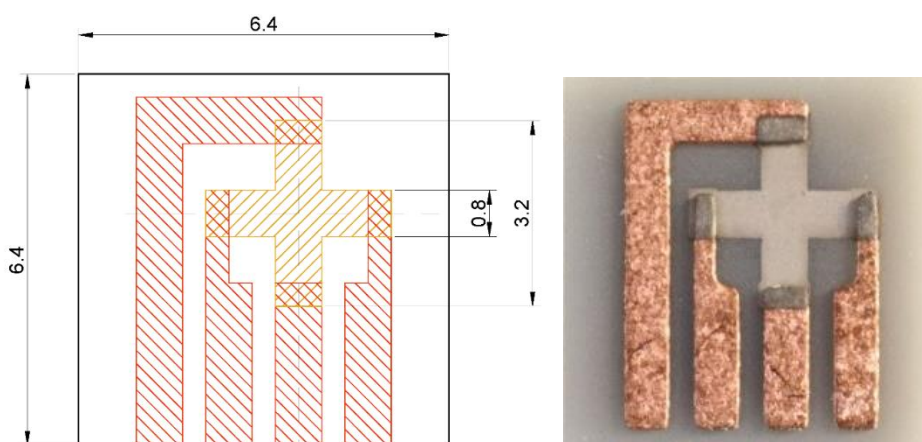
Obr. 5.7 Senzor $9,6 \times 9,6 \text{ mm}$ s kontaktními drátky přivařenými bondováním.

V reaktoru ITER budou sensorové jednotky umístěny na vnějším plášti vakuové nádoby ve štěrbině mezi nádobou a tepelným štítem a výška sensorové jednotky by neměla překročit 1 cm. Proto bylo po finalizaci výrobních technologií přistoupeno k miniaturizaci senzoru. Substrát byl zmenšen na velikost 6,4 x 6,4 mm a po stranách byly vytvořeny volné okraje pro zasunutí čidla do ochranného pouzdra sensorové jednotky. Kontaktní plochy pro přívodní drátky byly seskupeny na jedné straně senzoru (obr. 5.8).

Při následujících testech senzorů ve vysokém magnetickém poli byl ověřen významný vliv geometrie senzoru na vznik interferujících rušivých napětí. V případě detekčního kříže orientovaného pod úhlem 45° k osám senzoru vyvolávalo planární magnetické pole rovnoběžné s osami senzoru maximální planární Hallův jev. Pro aplikaci senzorů v geometrii reaktoru ITER byl proto zvolen design senzoru zobrazený na obr. 5.9 s detekčním křížem orientovaným rovnoběžně s osami senzoru [A54]. Reálná velikost senzorů je ukázána na obr. 5.10 (Příloha B).



Obr. 5.8 Miniaturizované série bismutových senzorů M1 až M4.

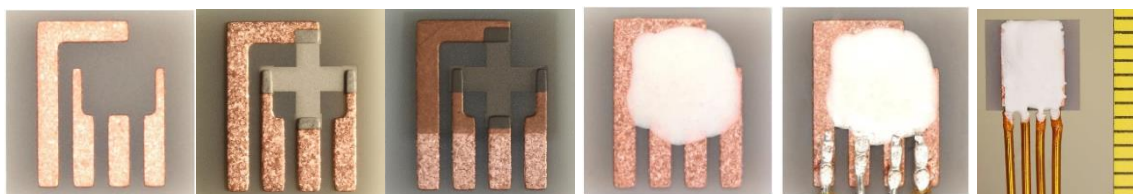


Obr. 5.9 Finální design bismutových senzorů pro ITER.

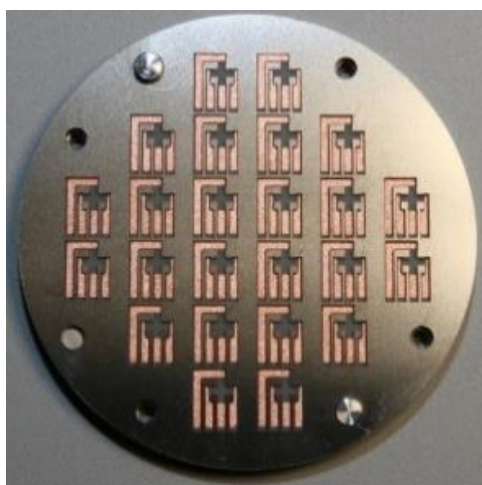


Obr. 5.10 Reálná velikost senzorů.

Podobně jako jiné kovy podléhá bismut oxidaci. V případě tenké detekční vrstvy má oxidace fatální následky, protože vzniklý oxid bismutitý prakticky nevede elektrický proud. V reaktoru ITER budou senzory pracovat v hlubokém vakuu, avšak pro testování a kalibraci senzorů při vysokých teplotách na vzduchu musí být detekční vrstva pasivována. Pasivace je prováděna deponováním vrstvy oxidu hlinitého Al_2O_3 o tloušťce několika μm a následným překrytím detekční vrstvy keramickou pastou Al_2O_3 . Keramická pasta je také využita pro finální fixaci bondovaných přívodních drátků (Příloha A). Jednotlivé výrobní fáze jsou ukázány na obr. 5.11 [A54]. Hlavním krokem výrobního procesu je magnetronové naprašování bismutu. Naprašovací masky umožňují deponovat současně až 24 senzorů (obr. 5.12).



Obr. 5.11 Výrobní fáze senzorů. Zleva – keramický DBC substrát s měděnými spoji o tloušťce 127 μm , deponace bismutové vrstvy $\sim 1 \mu\text{m}$, pasivace bismutu vrstvou $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 5 \mu\text{m}$, ochrana keramickou pastou Al_2O_3 , bondování kontaktů a kompletní zakrytí senzoru ochranou keramickou vrstvou.

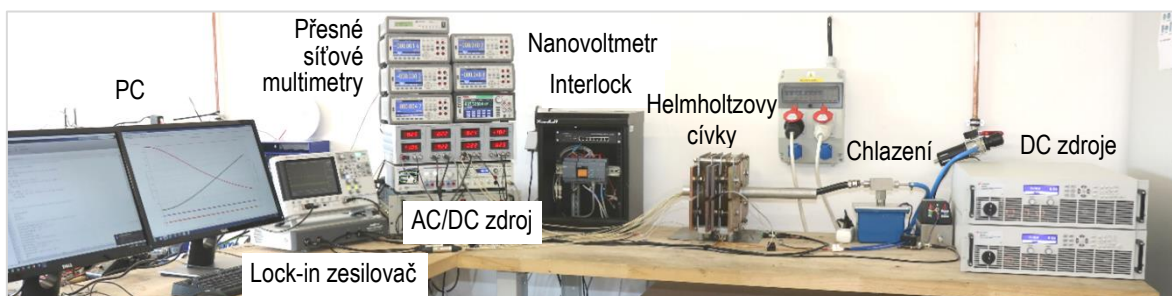


Obr. 5.12 Distanční maska pro magnetronové naprašování 24 senzorů.

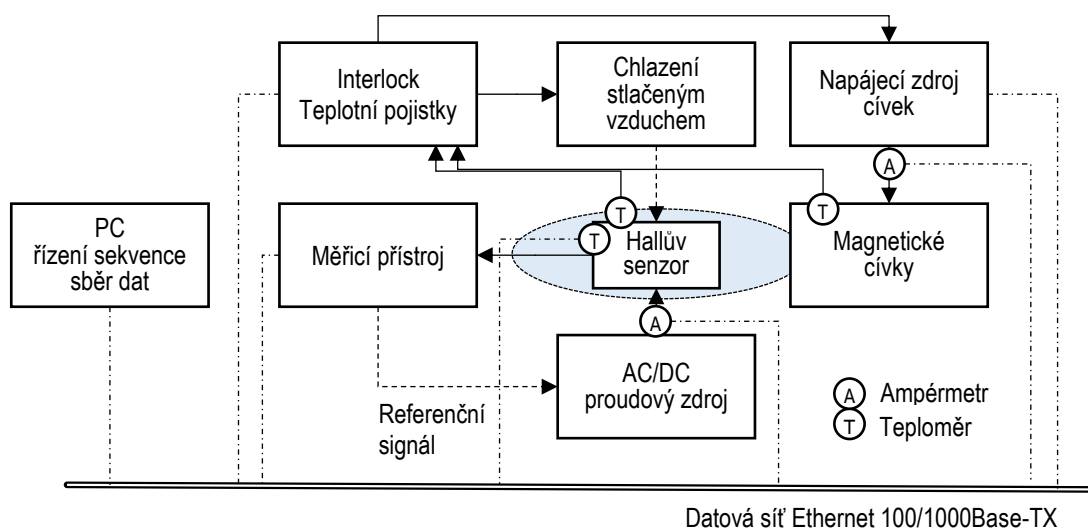
5.5 Testovací sestavy

Pro měření vlastností senzorů bylo použito několik testovacích sestav. Základní laboratorní sestava s Helmholtzovými cívkami byla zprovozněna v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR v Praze. Měření ve vysokém magnetickém poli probíhalo v supravodivém magnetu firmy Scientific Magnetic v britském Abingdonu pomocí mobilní měřicí sestavy [A55] a ve Společné laboratoři pro magnetická studia UK v Praze a FZÚ AV ČR v Praze v supravodivém zařízení PPMS 14 firmy Quantum Design. Pro testování časové stability měření sensorovou sestavou byla použita měřicí sestava s permanentním magnetem.

Laboratorní sestava je zobrazena na obr. 5.13, schéma na obr. 5.14. Srdcem sestavy jsou Helmholtzovy cívky generující magnetické pole do výše 0,7 T. Provedení cívek z měděného drátu izolovaného kaptonem umožňuje pracovat v teplotách do 300 °C a testovat tak také závislost citlivosti senzorů na teplotě.



Obr. 5.13 Laboratorní měřicí sestava.

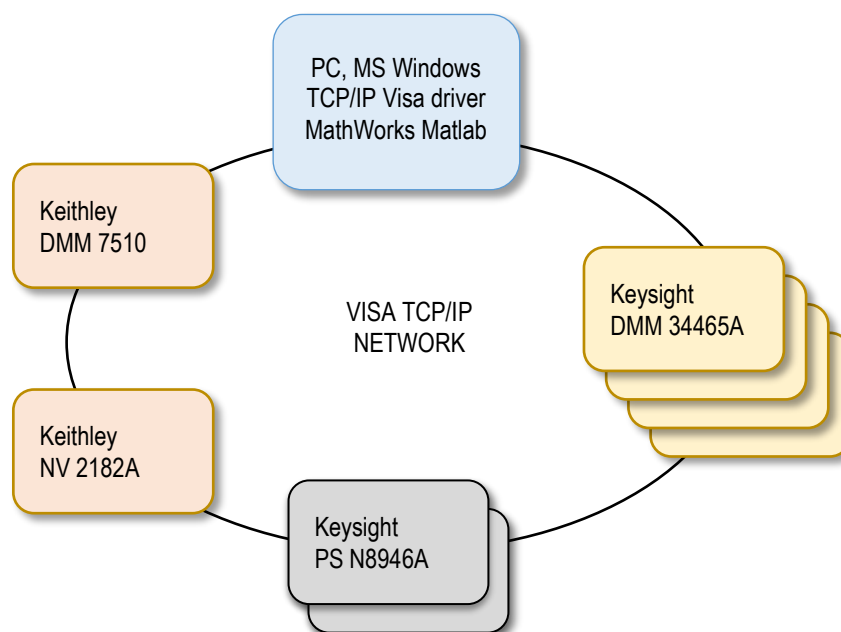


Obr. 5.14 Schéma laboratorní měřicí sestavy.

Helmholtzovy cívky byly napájeny dvojicí programovatelných síťových DC zdrojů KEYSIGHT o celkovém výkonu 20 kW. Napájecí zdroje byly prostřednictvím blokovacího vstupu napojeny na jednotku Interlock, která v případě překročení maximální teploty vinutí cívek zdroje odpojila.

Pro napájení senzoru byl použit přesný AC/DC proudový zdroj SRS CS 580, který při měření DC metodou poskytoval přesný DC proud a při měření komerčním lock-in zesilovačem zdroj sledoval referenční signál. V případě měření s prototypy vyhodnocovacích jednotek nebyl zdroj využit a napájení senzoru zajišťovaly přímo vyhodnocovací jednotky.

Měření probíhala decentralizovaně prostřednictvím sítě nanovoltmetru KEITHLEY 2182A, přesného multimetru KEITHLEY DMM 7510 a digitálních multimetrů KEYSIGHT 34465A. Řízení experimentální sekvence a sběr naměřených dat probíhaly v jazyce SCPI v síti VISA TCP/IP (obr. 5.15). Díky použití síťových multimetrů bylo schéma měření pružné a přizpůsobitelné širokému spektru experimentů. Výstupní signál testovaných senzorů byl variantně měřen nanovoltmetrem, digitálním lock-in zesilovačem AMETEK SIGNAL RECOVERY 7230 nebo prototypy vyhodnocovací jednotky senzorů. Sběr dat z měřicí sítě zajišťovala aplikace MATLAB. Parametry přístrojů jsou uvedeny v tabulce 5.2.



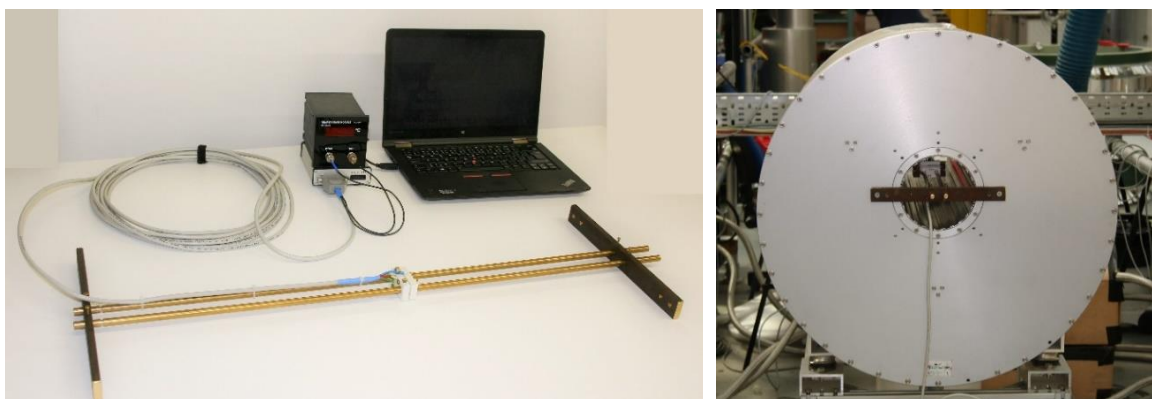
Obr. 5.15 Schéma sítě VISA TCP/IP.



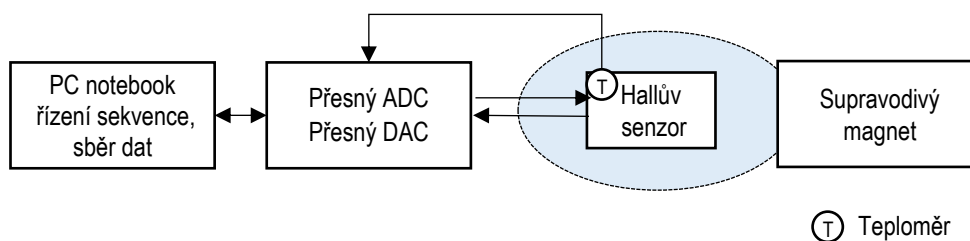
Tab. 5.2 Přístroje laboratorní měřící sestavy,

Měřicí systém		distribuovaný se síťovým sběrem dat
Vyhodnocovací software	MATHWORKS MATLAB	VISA Instrument network driver, TCP/IP
Elektromagnetické cívky	Vysokoteplotní Helmholtzovy cívky s chladičem, výrobce ÚFP	$T_{max} \approx 280$ °C, $B_{max} \approx 700$ mT, 1232 závitů, Cu drát 1,5x3,3 mm s kaptonovou izolací
Napájecí zdroj cívek	KEYSIGHT N8946A	v sériovém zapojení 400 V, 150 A, 20 kW, programovatelný, TCP/IP, šum RMS 40 mV, přesnost 200 mV
Nanovoltmetr 7½ místný multimetr	KEITHLEY 2182A KEITHLEY DMM 7510	DC 10 mV přesnost 0,002%+40 nV DC 100 mV přesnost 0,0006 % měření+0.9 μ V DC 10 mA přesnost 0,0004 % měření+50 nA AC 100 mV přesnost 0,06 % měření+30 μ V (10 Hz-20 kHz) AC 10 mA přesnost 0.09 % měření+3 μ A (10 Hz-10 kHz) R 100 Ω přesnost 0,0012 % měření+0.4 m Ω RTD přesnost 0.06 °C TC přesnost 0.2 °C
6½ místný multimetr	KEYSIGHT DMM 34465A	DC 100 mV přesnost 0,003 % měření+30 μ V DC 10 mA přesnost 0,007 % měření+2 μ A AC 100 mV přesnost 0,02 % měření+20 μ V (10 Hz-20 kHz) AC 10 mA přesnost 0,07 % měření+4 μ A (3 Hz-10 kHz) R 100 Ω přesnost 0,003 % měření+3 m Ω RTD přesnost 0,05 °C TC přesnost 0,3 °C
Lock-in zesilovač	AMETEK SIGNAL RECOVERY 7230	digitální lock-in zesilovač, duální vstupní napětí 10 nV – 1 V, referenční signál 1 mHz – 120 kHz, šum 2 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz, přesnost ± 1 % měřicího rozsahu
Napájecí zdroj senzoru	SRS CS 580	Proudový zdroj AC/DC 100fA-100 mA/5W DC-150 kHz, DC 10 mA přesnost 0.05 % + 1 pA, AC 10 mA přesnost 0.5 % + 300 nA,
Interlock Chlazení stlačeným vzduchem Měření teploty	SIEMENS LOGO 8 OMEGA ECV PV14-B OMEGA RTD RTDCAP-100A-2- P098-050-K-40 KEYSIGHT DMM 34465A	Programovatelný mikrokontroler Proporcionálně ovládaný ventil vzduch 8 barů/20 °C PT100 třída A, 350°C přesnost 0,05 °C

Mobilní sestava pro měření magnetického pole supravodivého magnetu Scientific Magnetic byla založena na přesném osmikanálovém USB AD/DA převodníku AREPOC USB2AD doplněném o převodník RTD pro měření teploty, jednoúčelové kabeláži a notebooku (obr. 5.16). Obr. 5.17 ukazuje schéma sestavy. Sestava umožnila testovat 6 senzorů po dvojicích v různých polohách vůči vektoru magnetického pole v rozsahu od -7 T do +7 T jednak přesným DC měřením a jednak prototypem vyhodnocovací jednotky [A56]. Parametry přístrojů jsou uvedeny v tabulce 5.3.



Obr. 5.16 Mobilní měřicí sestava. Vpravo je supravodivý magnet s instalovaným držákem senzorů.



Obr. 5.17 Schéma mobilní měřicí sestavy.

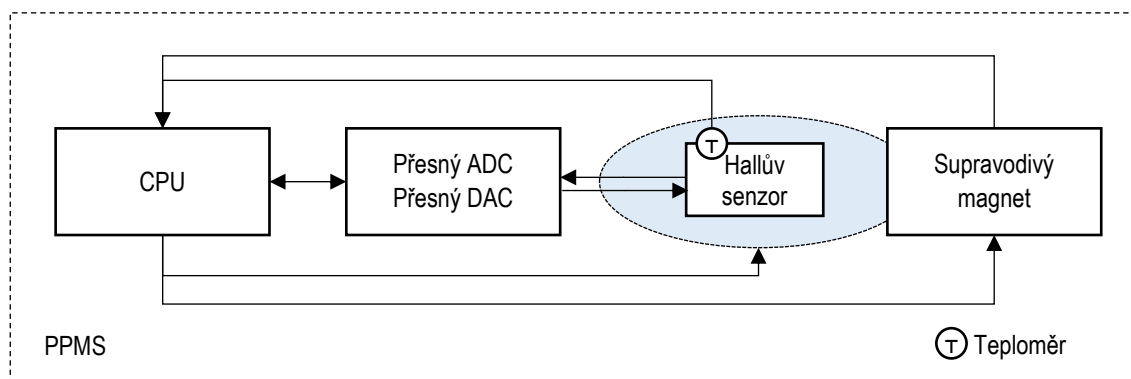
Tab. 5.3 Přístroje mobilní měřicí sestavy.

Měřicí systém	centralizovaný	
Vyhodnocovací software	AREPOC USBDAQ	
Sběr dat 8 kanálovým AD/DA převodníkem	AREPOC USB2AD	DC 10 mV, přesnost 0,005 % měření+1 μ V DC zdroj 1-100 mA, přesnost 1 μ A
Měření teploty	OMEGA RTD 1PT100KN815 FOTON PT100-20	PT100, -200 - +600 $^{\circ}$ C, přesnost 0,5%

Měření vysokého magnetického pole při teplotách relevantních ITER bylo provedeno na supravodivém magnetickém zařízení Physical Property Measurement System PPMS 14 firmy Quantum Design ve Společné laboratoři pro magnetická studia UK v Praze a FZÚ AV ČR v Praze (obr. 5.18). Zařízení umožnilo provést měření magnetického pole v rozsahu od -12 T do +12 T při teplotách do 400 K. Orientační schéma experimentu ukazuje obr. 5.19. Parametry přístroje jsou uvedeny v tabulce 5.4.



Obr. 5.18 Měřicí supravodivý systém PPMS 14.

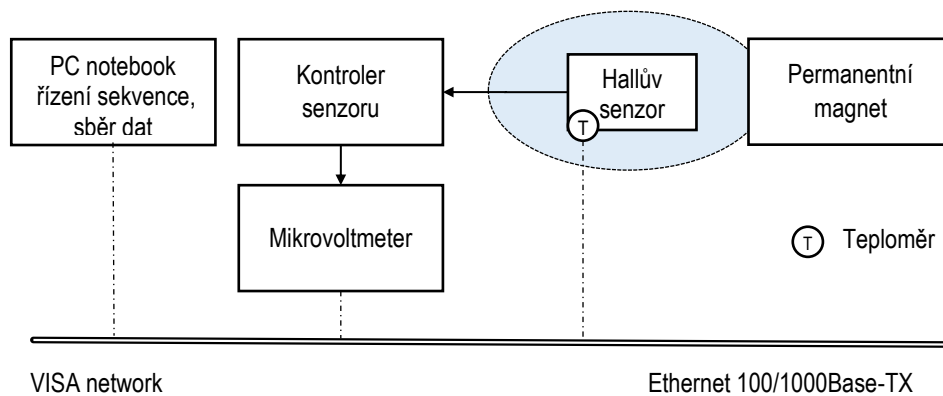


Obr. 5.19 Schéma systému PPMS.

Tab. 5.4 Vybrané parametry systému PPMS 14.

PPMS 14	Quantum Design	kompaktní měřicí systém rozsah magnetického pole ± 14 T přesnost ± 12 mT rozlišení 0,3 mT uniformita $\pm 0,1$ % rychlost změny 0,8 - 13 mT/s rozsah teplot 1,9 - 400 K přesnost nastavení teploty ± 1 % rychlost změny 0,01 - 6 K / min maximální rozměr 25 mm 4-drátové měření rezistivity napájecí proud 0,005 – 5 mA, 12 bit DAC měření napětí 1 - 95 mV, 20 bit ADC rozlišení 4 nV / 2 mV - 191 nV / 100 mV přesnost 20 nV / 4 $\mu\Omega$
	vzorek	

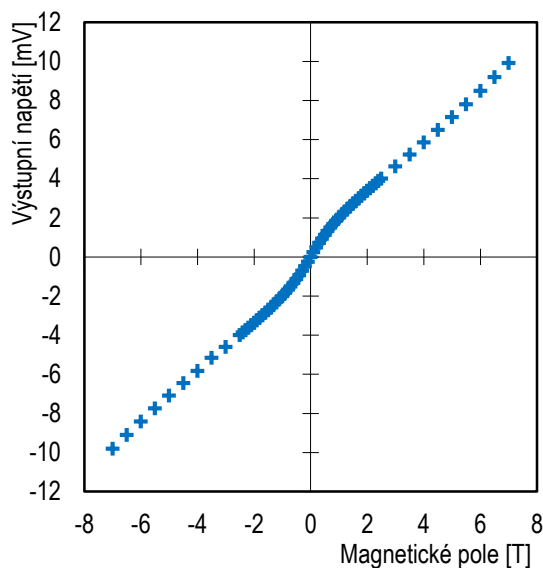
Testy časové stability měření celého sensorového kompletu probíhaly na laboratorní sestavě s permanentním magnetem v ÚFP. Test probíhal při pokojové teplotě, permanentní magnet byl spolu se senzorem umístěn v tepelně izolujícím obalu pro omezení změn teploty magnetu i senzoru. Signál senzoru byl vyhodnocován prototypem vyhodnocovací jednotky. Schéma měřicí sestavy ukazuje obr. 5.20.



Obr. 5.20 Schéma měřicí sestavy s permanentním magnetem.

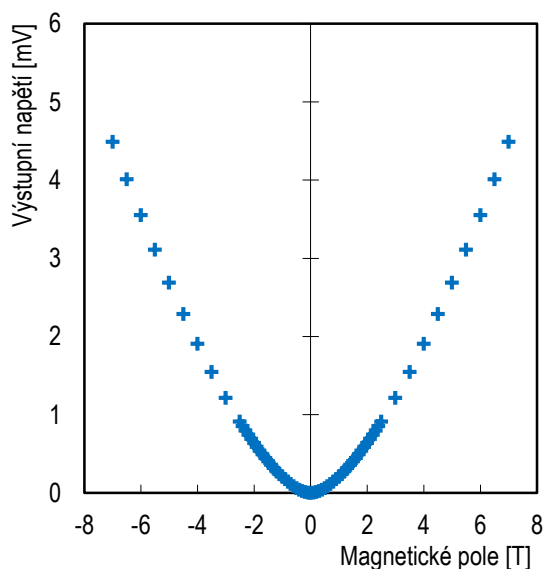
5.6 Vlastnosti senzorů

Výstupní signál senzorů je při měření normálového magnetického pole charakteristický nelineární závislostí na magnetickém poli zobrazenou na obr. 5.21 [A55]. Měření probíhalo za pokojové teploty a senzor byl umístěn kolmo k vektoru magnetického pole. Závislost je podobná anomálnímu Hallovu jevu, ke kterému ale dochází u feromagnetických materiálů, zatímco bismut je diamagnetický [A52]. Křivka je způsobena nelineární závislostí Hallova koeficientu bismutu na magnetickém poli popsané v následující kapitole.

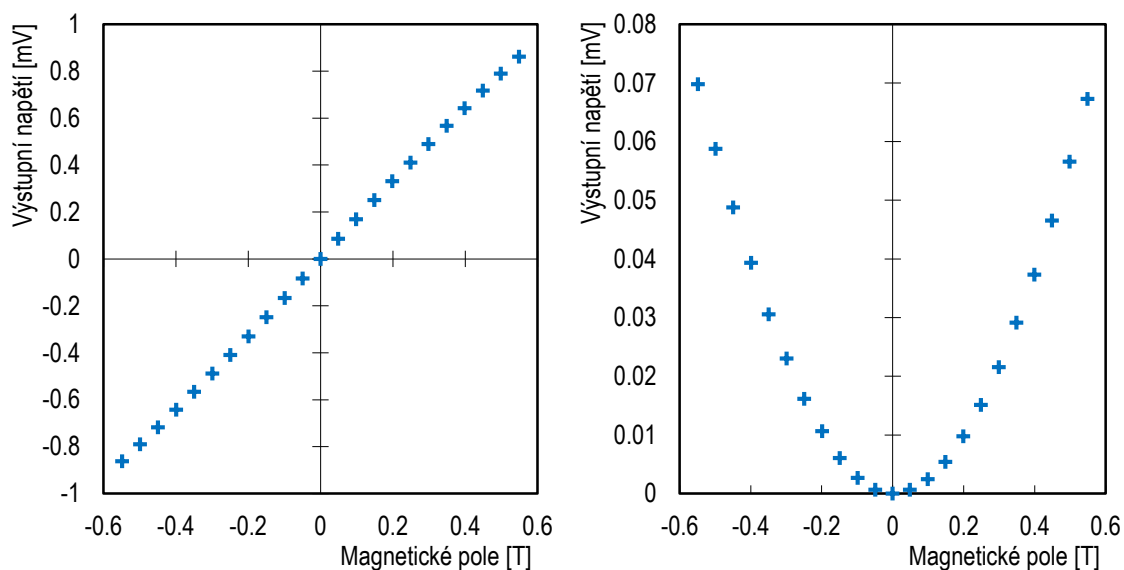


Obr. 5.21 Výstupní napětí senzoru v případě magnetického pole kolmého k ploše senzoru při pokojové teplotě.

Pokud není vektor magnetického pole orientován dokonale kolmo k ploše senzoru, dochází k ovlivnění výstupního signálu senzoru planárním Halloovým jevem. Obr. 5.22 ukazuje výstupní napětí senzoru v případě maximálního planárního Hallova jevu, kdy je vektor magnetického pole orientován v rovině senzoru pod úhlem 45° ke směru napájecího proudu. Jak je z grafu zřejmé, v případě bismutu může planární Hallovo napětí při vyšších magnetických polích dosahovat hodnot srovnatelných s normálovým Halloovým napětím [A52].



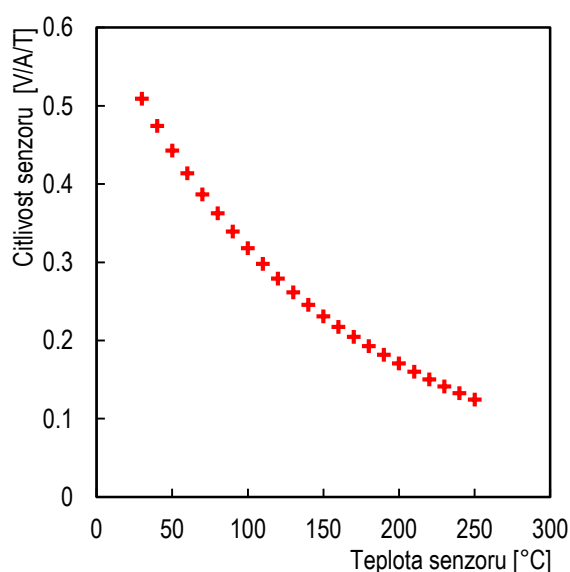
Obr. 5.22 Výstupní napětí senzoru v případě maximálního planárního Hallova jevu.



Obr. 5.23 Výstupní napětí senzoru při nízkém magnetickém poli. Vlevo při normálovém magnetickém poli, vpravo v případě maximálního planárního Hallova jevu.

V nízkém magnetickém poli, které je používáno v průmyslových aplikacích, se nelinearita normálového Hallova napětí projevuje slabě, avšak rozeznatelně (obr. 5.23 vlevo). Planární Hallovo napětí je řádově menší než normálové Hallovo napětí a projevuje se pouze v konfiguracích s převažující složkou magnetického pole v rovině senzoru (obr. 5.23 vpravo) [A52].

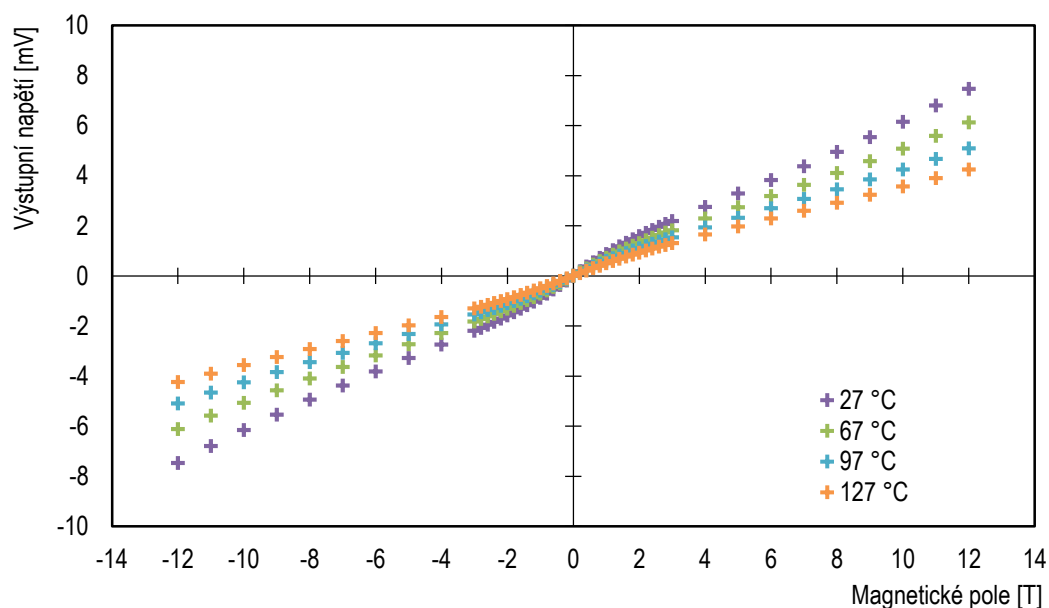
Teplotní charakteristika bismutových Hallových senzorů byla testována v rozsahu od pokojové teploty do 250 °C [A54].



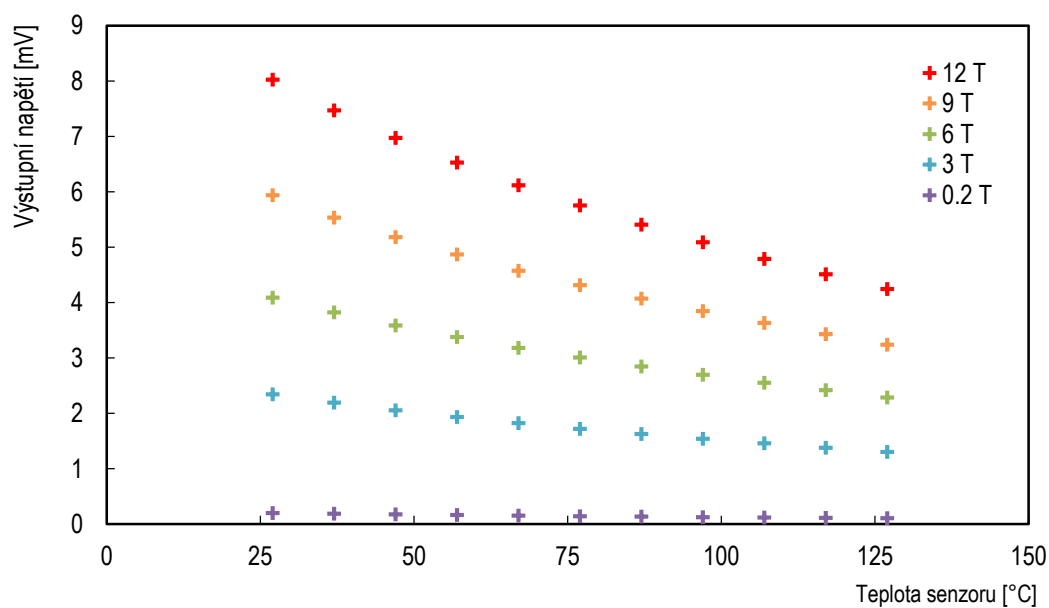
Obr. 5.24 Závislost citlivosti bismutových Hallových senzorů na teplotě senzoru.



Citlivost senzorů v tomto rozsahu klesá exponenciálně (obr. 5.24) v důsledku poklesu hodnoty Hallova koeficientu. Závislost citlivosti senzorů na teplotě způsobuje, že výstupní napětí senzoru nelineárně závisí jak na měřeném magnetickém poli, tak na teplotě senzoru. Obr. 5.25 ukazuje výstupní signál senzoru při měření normálového magnetického pole při různých teplotách. Závislost výstupního signálu na teplotě při konstantním magnetickém poli je zobrazena na obr. 5.26.



Obr. 5.25 Výstupní napětí senzoru v normálovém magnetickém poli při různých teplotách.



Obr. 5.26 Závislost výstupního napětí senzoru na teplotě senzoru při měření konstantního normálového magnetického pole.

5.7 Hallův koeficient

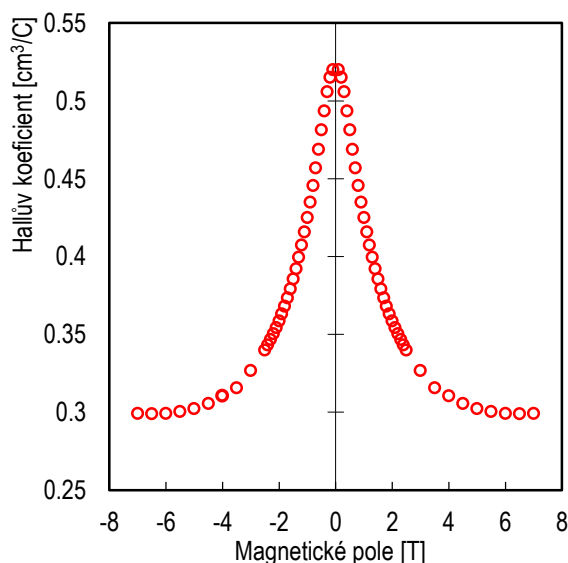
Při potlačení offsetového napětí a planárního Hallova napětí (viz. kapitoly 5.10 - 5.11) přechází rovnice (5.4) na zjednodušený tvar normálového Hallova napětí:

$$U_{out} = R_H(T, B) \frac{IB_N}{t}. \quad (5.5)$$

V rovnici (5.5) je zdůrazněno, že Hallův koeficient R_H není konstantní a je funkcí teploty a magnetického pole. Nelinearity popsané v předchozí kapitole jsou způsobeny závislostí Hallova koeficientu na teplotě a magnetickém poli [A57]. Hallův koeficient patří mezi fyzikální charakteristiky materiálu a je nepřímo úměrný koncentraci volných nosičů náboje n a jejich náboji q [39]:

$$R_H \approx \frac{1}{qn}. \quad (5.6)$$

Měření Hallova napětí popsaná v [A55] a [A57] umožnila najít funkční závislost Hallova koeficientu bismutu na magnetickém poli.



Obr. 5.27 Závislost Hallova koeficientu na magnetickém poli při pokojové teplotě.

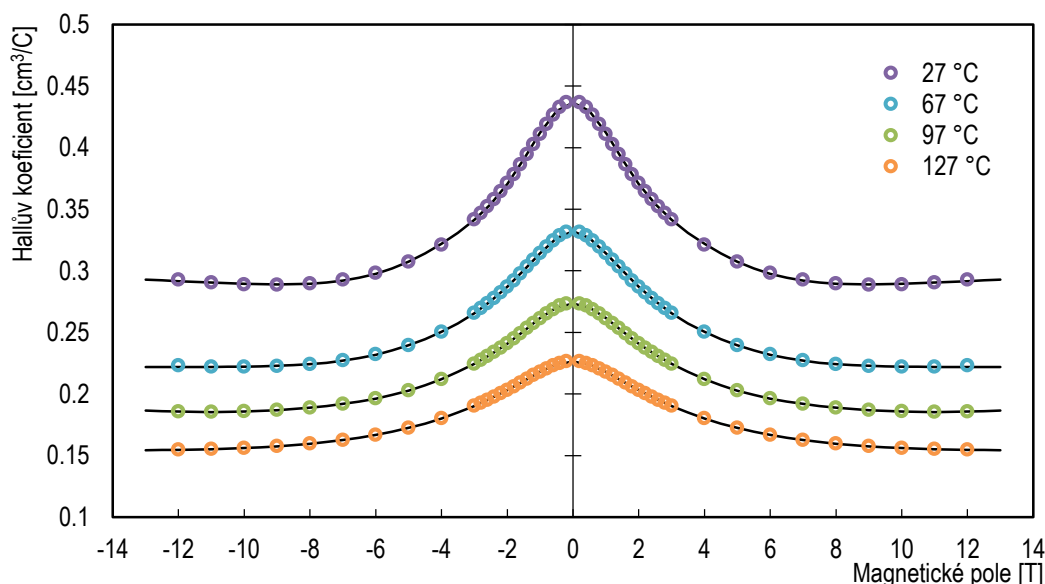
Zjištěná závislost je zobrazena na obr. 5.27. Fitovací funkce závislosti byla nalezena ve tvaru Gaussovi funkce:

$$R_H(B) = \sum_{i=1}^3 k_i \exp(-(l_i B)^2) + m, \quad (5.7)$$

kde $R_H(B)$ označuje funkční závislost Hallova koeficientu na magnetickém poli B při konstantní teplotě a k_i , l_i a m jsou fitovací koeficienty.

Závislost Hallova koeficientu na magnetickém poli vychází z průměrné mobility a vodivosti dvou dominantních komponent elektronového plynu, elektronů a děr, v polykrystalické struktuře bismutové vrstvy. Důsledkem je nižší citlivost senzorů při vyšších hodnotách magnetického pole (obr. 5.27) a nelinearita výstupního napětí senzorů zobrazená na obr. 5.21.

Teplotní závislost Hallova koeficientu způsobuje při vyšších teplotách senzoru zploštění křivky a její posun k nižším hodnotám. Obr. 5.28 ukazuje experimentálně zjištěné hodnoty Hallova koeficientu při různých teplotách a fitovací funkce (5.7). V nízkých magnetických polích s růstem magnetického pole Hallův koeficient klesá, ve vysokých magnetických polích Hallův koeficient s rostoucím magnetickým polem roste. K minimu dochází v nízkých teplotách při nižším poli, ve vysokých teplotách při vyšším poli.



Obr. 5.28 Závislost Hallova koeficientu na magnetickém poli při různých teplotách. Černé křivky odpovídají fitovací funkci (5.7).

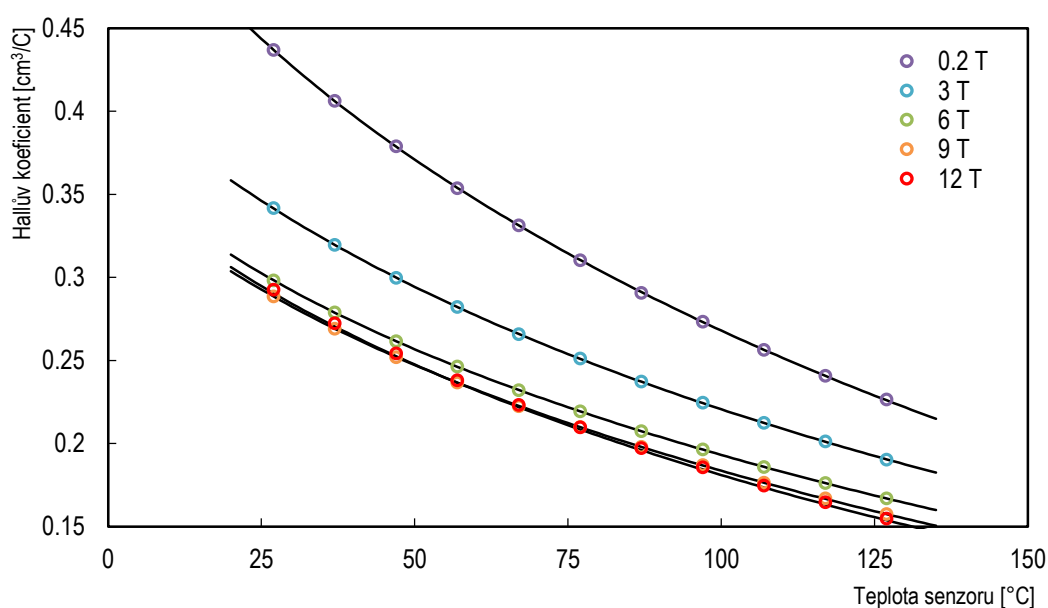
Závislost Hallova koeficientu na teplotě při různých magnetických polích je zobrazená na obr. 5.29. Závislost je charakteristická exponenciálním poklesem se vzrůstající teplotou a lze ji fitovat exponenciální funkcí ve tvaru:

$$R_H(T) = a \exp(b/(T + c)), \quad (5.8)$$

kde $R_H(T)$ označuje funkční závislost Hallova koeficientu na teplotě T při konstantním magnetickém poli B a a , b , c jsou fitovací koeficienty.

Exponenciální pokles Hallova koeficientu souvisí se zvyšováním kinetické energie vázaných nosičů náboje, které se stoupající teplotou získávají dostatek energie k překonání zakázaného pásu a způsobují zvýšení koncentrace volných nosičů náboje. Zvýšení koncentrace volných nosičů náboje vede v souladu s rovnicí (5.6) ke snížení Hallova koeficientu a tím k poklesu citlivosti senzoru.

Obr. 5.29 ukazuje, že nelineární závislost koeficientu na teplotě a magnetickém poli způsobuje různý tvar křivek, které se v důsledku mohou protínat. Normalizované křivky [A57] se shodují pouze pro nízká pole.



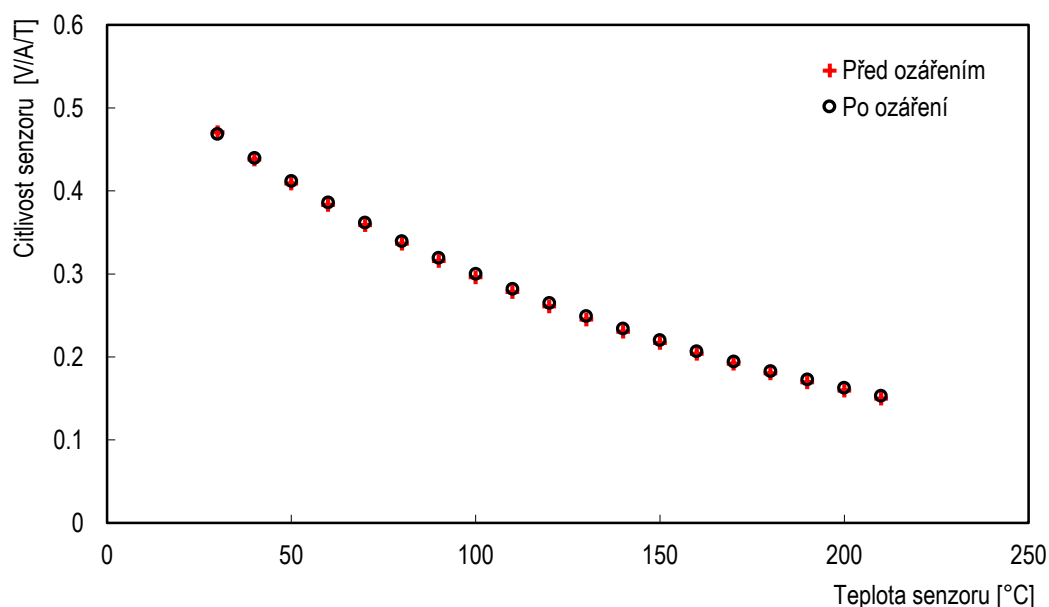
Obr. 5.29 Závislost Hallova koeficientu na teplotě při různých magnetických polích. Černé křivky odpovídají fitovací funkci (5.8).

5.8 Testy radiační odolnosti senzorů

Testy radiační odolnosti senzorů byly provedeny v jaderném experimentálním reaktoru LVR-15 Centra výzkumu Řež v Řeži u Prahy. Sensory byly uloženy do hliníkového pouzdra a umístěny společně se vzorky drátů do evakuované skleněné ampule, která byla po dobu jedné kampaně umístěna v aktivní zóně reaktoru (obr. 5.30). Ampule byla ozářena celkovou neutronovou fluencí $2,5 \times 10^{22}$ n/m², z toho 6×10^{21} n/m² činila fluence rychlých neutronů (0.1 MeV – 20 MeV). Vlivem ozáření nedošlo k významné změně citlivosti senzorů a potvrdily se tak výsledky dřívějších radiačních testů (obr. 5.31) [A54].



Obr. 5.30 Ozařovací ampule s Hallovými senzory v hliníkovém pouzdru.



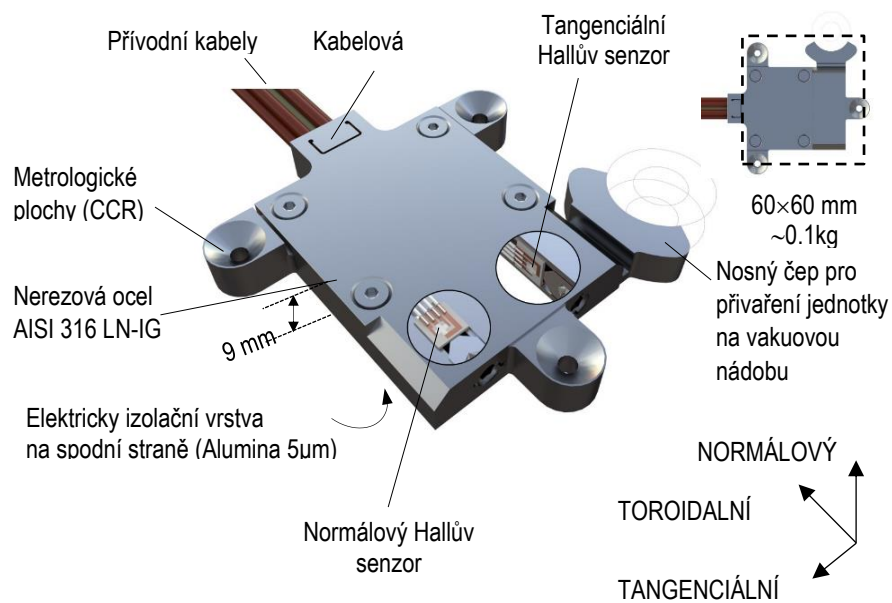
Obr. 5.31 Porovnání citlivosti bismutových Hallových senzorů před a po ozářením.

5.9 Sensorové jednotky OVSS

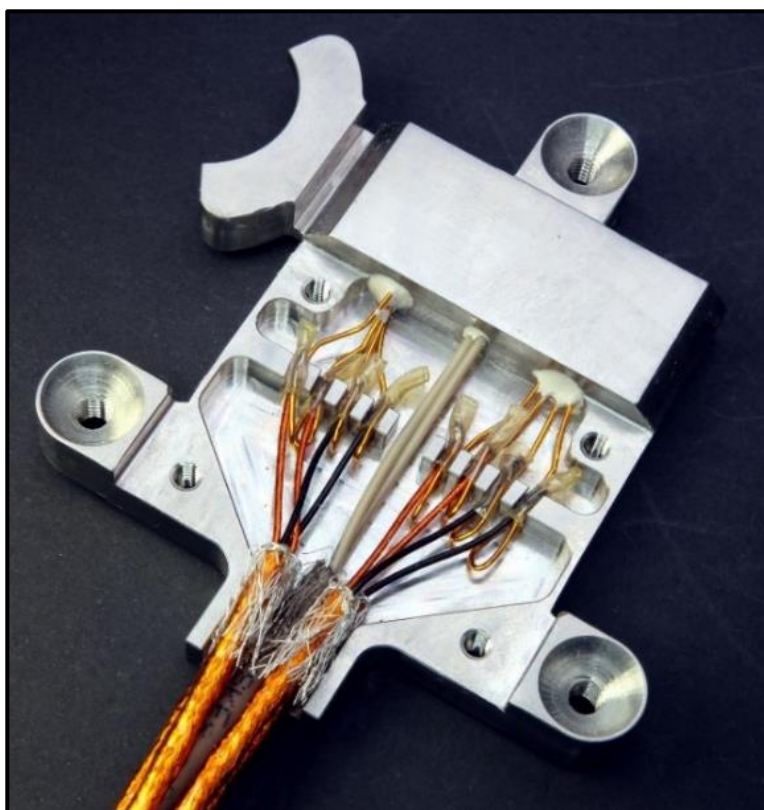
Při instalaci v reaktoru ITER budou Hallové senzory umístěny po dvojicích do sensorových jednotek OVSS z nerezové oceli AISI 316 LN-IG (obr. 5.32). Jednotky budou přivařeny k vakuové nádobě reaktoru prostřednictvím nosného čepu. Po navaření bude pomocí metrologických ploch přesně zaměřena poloha jednotky vůči osám vakuové nádoby [A53].

Spolu s Hallovými senzory bude v sensorové jednotce umístěn termočlánek zaznamenávající teplotu senzorů. Hallové senzory i termočlánek budou zality keramickou pastou (obr. 5.33). Přívodní drátky senzoru budou mikrosvářečkou navařeny na stíněné twistované kabely. Sváry budou zaizolovány smršťovacími trubičkami z termoplastického polymeru PEEK. Drátky i kabely mají kaptonovou izolaci. Smršťovací trubičky PEEK i

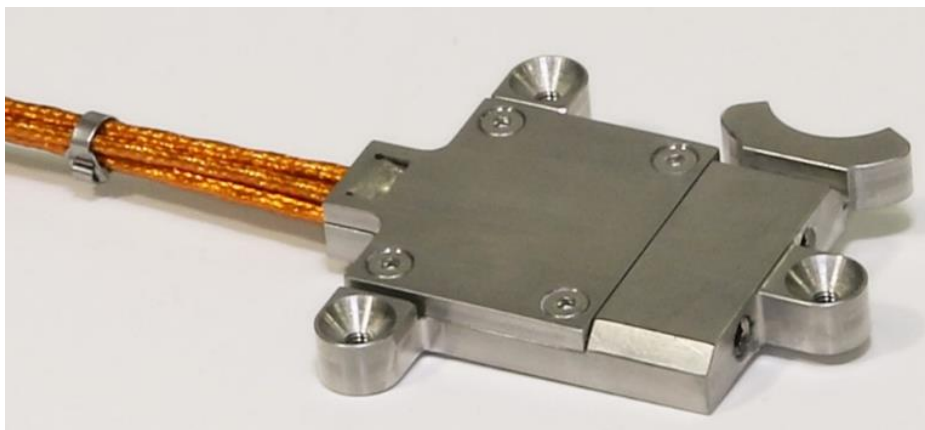
kaptonová izolace prokázaly v ozařovacích testech dostatečnou radiační odolnost, aby mohly být použity v reaktoru ITER.



Obr. 5.32 Senzorová jednotka OVSS [A30].

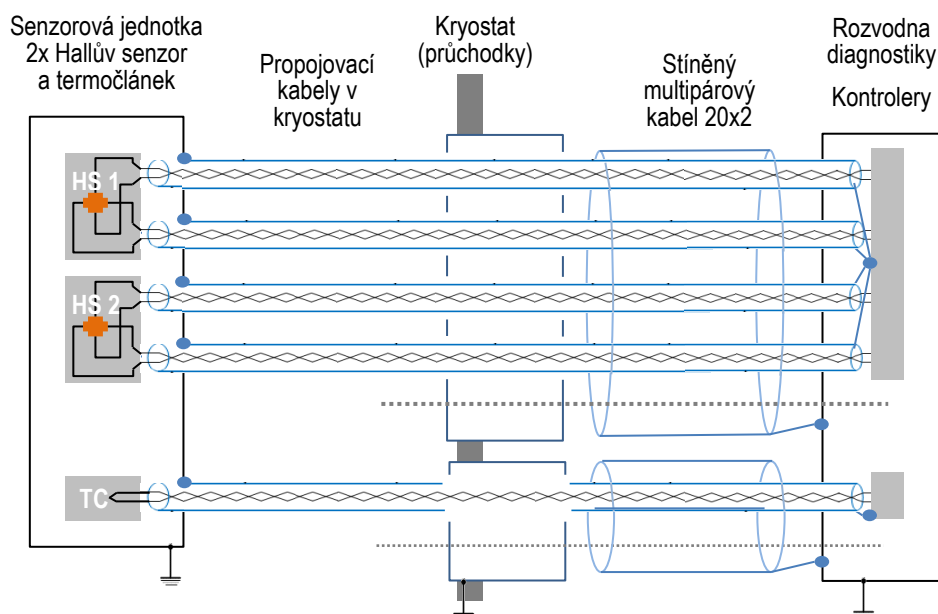


Obr. 5.33 Vnitřek zkompletovaného prototypu senzorové jednotky.



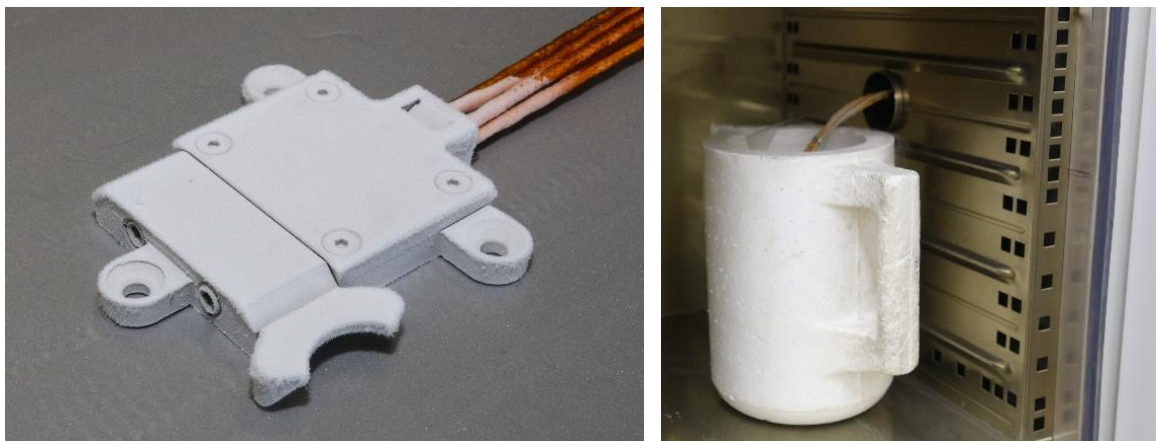
Obr. 5.34 Zkompletovaný prototyp sensorové jednotky.

Zemním bodem stínění kabelového vedení bude sensorová jednotka (obr. 5.33), která bude přes nosný čep elektricky propojena na uzemněnou vakuovou nádobu reaktoru. Zkompletovaná sensorová jednotka je zobrazena na obr. 5.34. Schéma propojení sensorové jednotky a kontroleru je na obr. 5.35.



Obr. 5.35 Schéma propojení sensorové jednotky a kontrolerů. Kontrolery nejsou připojeny na zem rozvaděče.

Konstrukce sensorové jednotky byla testována opakovaným rychlým ohřátím a ochlazením v rozsahu -200 až $+200$ °C (obr. 5.36), 350 N zátěží odchozích kabelů (obr. 5.37) a pádem jednotky z výšky 1,5 m na betonovou podlahu. Testy prokázaly vyhovující mechanickou odolnost jednotky.



Obr. 5.36 Test cyklickým ohříváním a ochlazováním v rozsahu -200 až $+200$ °C.

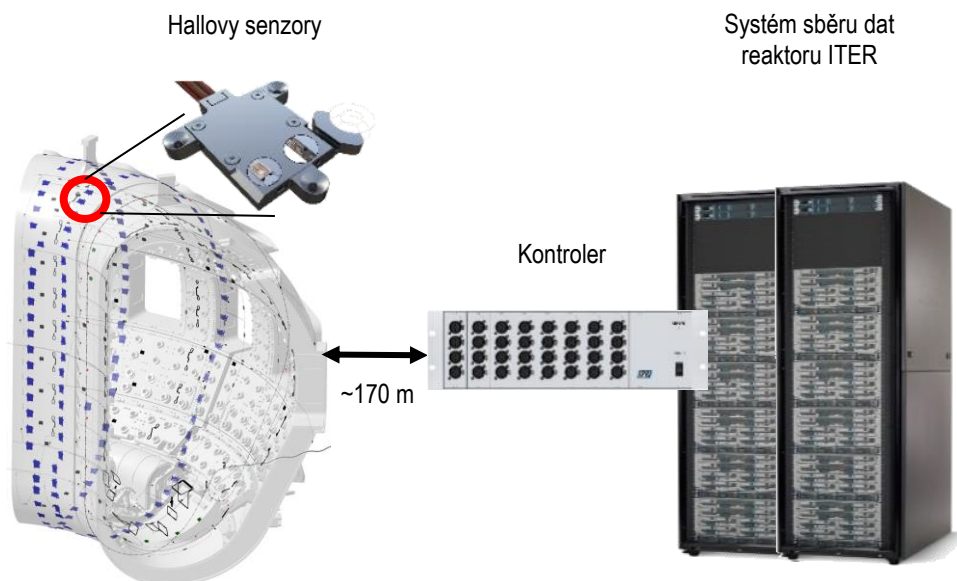


Obr. 5.37 Test kabelové svorky zatížením do 350 N.

5.10 Zpracování signálu

Výstupní signál senzorů bude zpracován ve vyhodnocovacích jednotkách - kontrolerech [A56]. Kontrolery převedou výstupní signál senzorů na signál ± 10 VDC snímaný systémem sběru dat reaktoru (obr. 5.38).

Významnou komplikací zpracování výstupních signálů senzorů je dlouhé kabelové vedení mezi senzory a kontrolery bez možnosti předzesílení signálu. Délka kabelového vedení k senzorům může dosáhnout až 170 m, avšak radiální a tepelná zátěž nedovolují po trase umístit předzesilovače ani žádná jiná elektronická zařízení [A56].



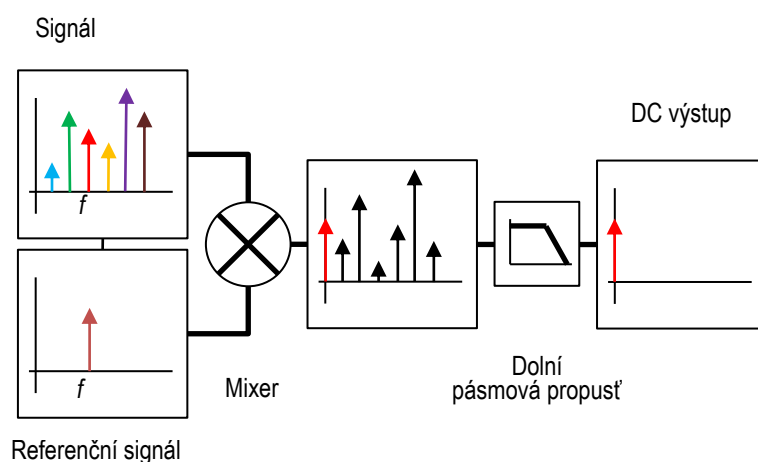
Obr. 5.38 Schéma propojení senzorů do systému sběru dat reaktoru ITER.

Nejjednodušší metodou měření Hallova napětí je DC měření, při kterém je senzor napájen stejnosměrným proudem a Hallovo napětí je měřeno přesným DC voltmetrem. Tento přístup ale není vhodný pro měření slabých signálů v prostředí jaderného zařízení, kde vzniká řada rušivých napětí včetně DC napětí vyvolaných radiačním efektem RIEMF (Radiation Induced Electro-Motive Force) a teplotním efektem TIEMF (Temperature Induced Electro-Motive Force). Způsob měření a zpracování signálu musí odpovídat specifickým rysům instalace senzorů v reaktoru ITER:

- měření na mikrovoltové úrovni,
- dlouhé kabelové připojení (~170 m),
- rušivá DC napětí a radiofrekvenční rušení,
- offsetové napětí senzoru závislé na teplotě senzoru,
- interferující planární Hallovo napětí.

Pro měření za uvedených podmínek byla zvolena kombinace metod synchronní detekce a proudové rotace (current spinning).

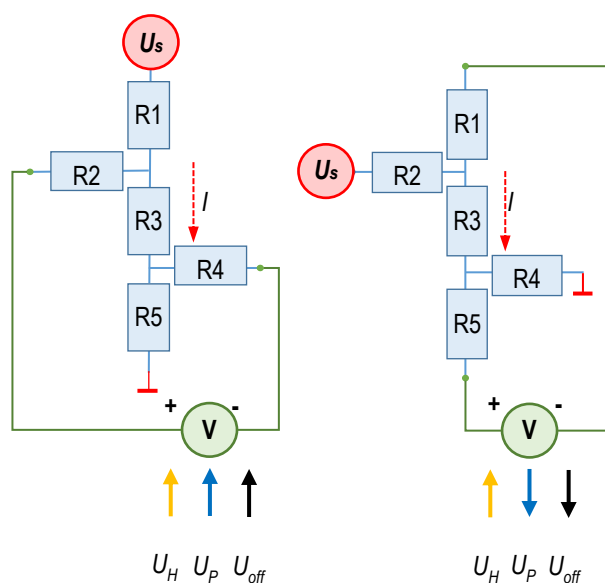
Synchronní detekce umožňuje měřit amplitudu velmi malých signálů i pod úrovní šumu. Při synchronní detekci se měří rozdíl mezi referenčním signálem a výstupním signálem o stejné frekvenci. Kontroler napájí Hallovy senzory referenčním sinusoidálním signálem o frekvenci 5 kHz a následně porovnává výstupní signál senzoru s referenčním signálem. Rušivé signály na jiných frekvencích jsou přitom odstraněny (obr. 5.39) [A56].



Obr. 5.39 Princip synchronní detekce.

Metoda proudové rotace automaticky potlačuje offsetové napětí senzoru střídáním funkce ramen senzoru. Při střídání napájeného a měřeného ramene dochází ke změně polarity měřeného offsetového napětí, zatímco měřené Hallovo napětí zůstává bez změny (obr. 5.40). Střídavé offsetové napětí je pak odstraněno integrací signálu [A56].

Proudová rotace potlačuje také planární Hallovo napětí. Planární Hallovo napětí je charakteristické opačnou polaritou v kolmých směrech, a pokud jsou větve senzoru identické a kolmé, dochází při proudové rotaci ke střídání polarity měřeného planárního Hallova napětí a k jeho vyrušení při integraci signálu podobně jako offsetového napětí [A56].

Obr. 5.40 Schéma proudové rotace v náhradním schématu Hallova senzoru. U_s -napájecí napětí, I -napájecí proud, U_H -normálové Hallovo napětí, U_P -planární Hallovo napětí, U_{off} -offsetové napětí.



Jádrem synchronní detekce je mixer (multiplikátor), který je napájen referenčním signálem U_r a signálem přicházejícím z Hallova senzoru přes jednotku proudové rotace. Referenčním signálem je harmonický sinusoidální signál:

$$U_r = A \sin \omega t \quad (5.10)$$

Signál na výstupu z mixeru závisí na stavu proudové rotace a obecně jej lze popsat dvěma alternujícími stavy m_p and m_n :

$$m_p = \left((U_H + U_P + U_{off}) + o_{in} \right) (+U_r + o_r) + o_m \quad (5.11)$$

$$m_n = \left((U_H - U_P - U_{off}) + o_{in} \right) (-U_r + o_r) + o_m \quad (5.12)$$

kde U_H označuje normálové Hallovo napětí, U_P planární Hallovo napětí, U_{off} offsetové napětí senzoru, U_r napětí referenčního signálu, o_{in} a o_r offsety signálových cest a o_m je offset mixeru. Po odstranění harmonických složek dolní pásmovou propustí a vzájemném odečtení obou signálů získáme DC výstupní napětí o velikosti průměrného násobku referenčního a normálového Hallova napětí:

$$m = \overline{U_H U_r} \quad (5.13)$$

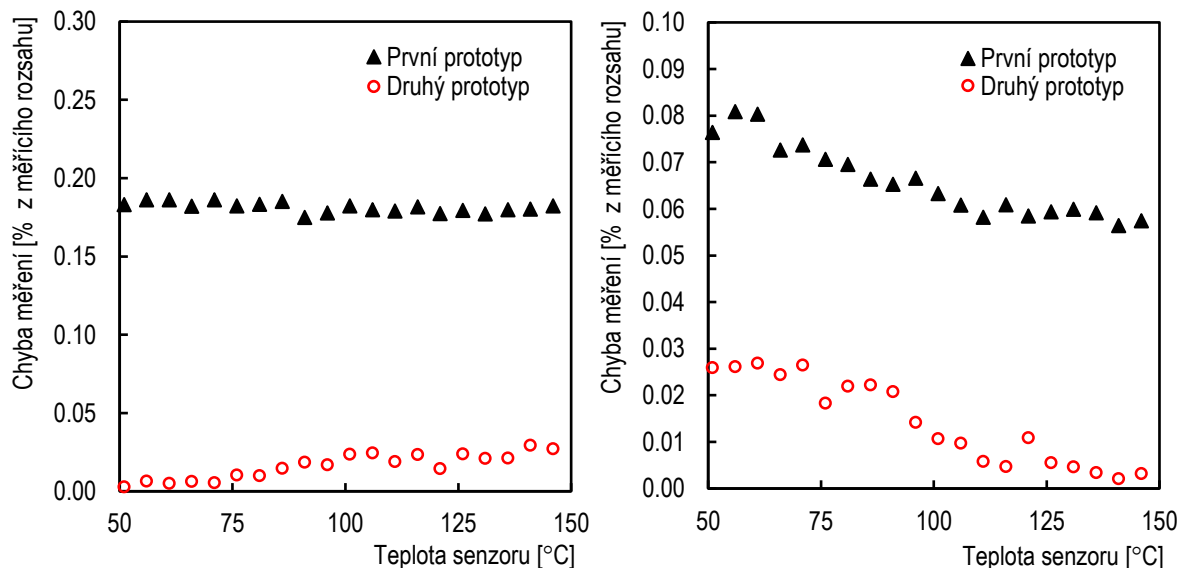
Uvedený model popisuje ideální případ, v praxi nebudou offsetová ani planární napětí dokonale odstraněna [A56].

5.11 Kontroler

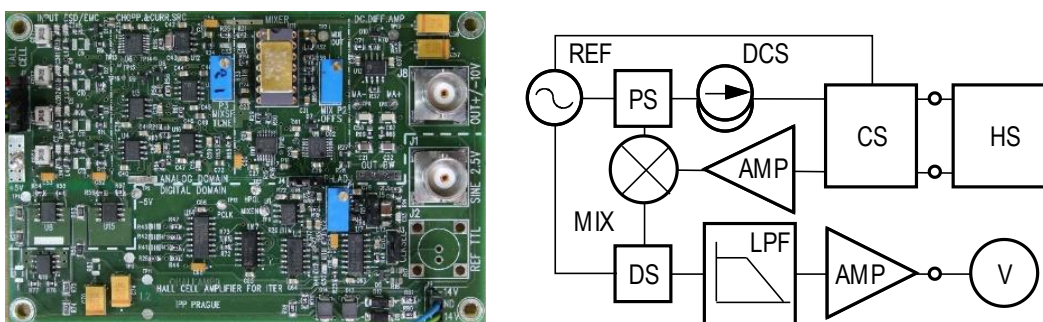
Popsané metody mohou být realizovány na bázi analogového nebo digitálního zpracování signálu. S cílem zjednodušit integraci senzorů do systému sběru dat fúzního reaktoru bylo zvoleno analogové řešení. Pro ověření funkčnosti zvolených metod bylo nejprve sestaveno základní elektronické schéma synchronní detekce a proudové rotace. Následně byly navrženy a sestaveny dva prototypy kontroleru s různou hloubkou implementace synchronní detekce. První prototyp implementoval násobení signálu senzoru pravoúhlým signálem odvozeným od referenčního signálu. Tento způsob implementace ale kontroleru nezajistil dostatečnou imunitu vůči elektromagnetickému rušení signálu. Na obr. 5.41 jsou zobrazeny výsledky srovnávacích testů, ve kterých tento prototyp vykazoval výrazně vyšší chyby měření než druhý prototyp a byl proto vyloučen z dalšího testování [A56].

Druhý prototyp plně implementoval synchronní detekci společně s řadou pokročilých

funkcí, jako jsou diferenciální napájení senzoru, eliminace přechodových jevů vložení deadtime intervalu, automatická kompenzace offsetu elektroniky nebo přímá digitální syntéza (DDS) sinusoidálního referenčního signálu. Schéma prototypu je zobrazeno na obr. 5.42.

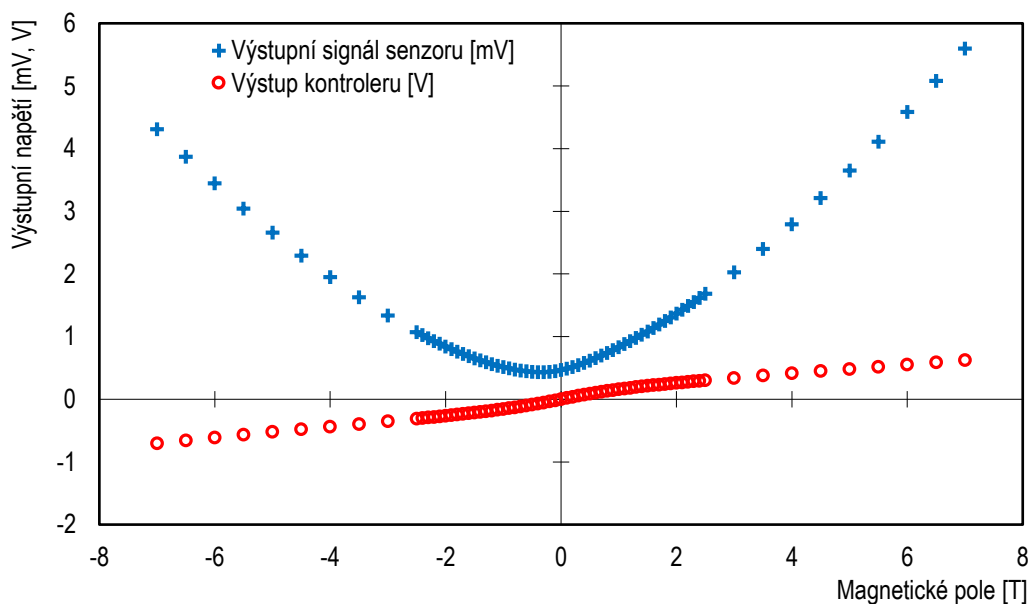


Obr. 5.41 Srovnávací testy prototypů kontroleru. Vlevo je graf chyby měření vyvolané vnějším elektromagnetickým rušením signálu mezi senzorem a kontrolerem v závislosti na teplotě senzoru. Vpravo je graf chyby měření vzniklé připojením senzoru ke kontroleru prostřednictvím 170 m dlouhého kabelového vedení v závislosti na teplotě senzoru [A56].



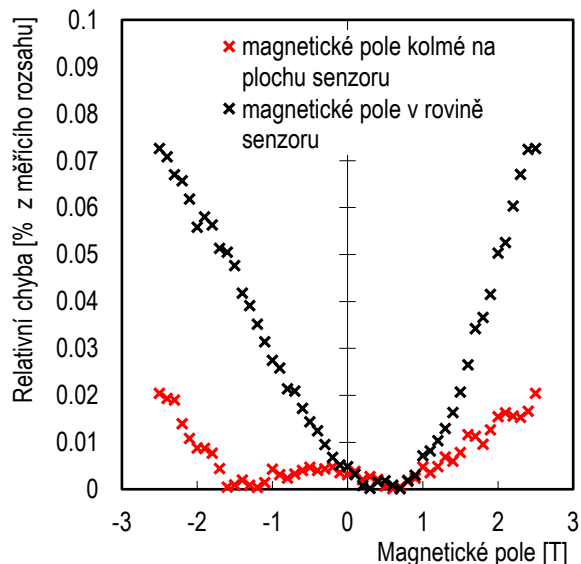
Obr. 5.42 Druhý prototyp kontroleru. REF-zdroj referenčního signálu, PS-přepínač polarity, DCS-diferenciální proudový zdroj, CS-proudová rotace, HS-Hallův senzor, AMP- diferenciální zesilovač, MIX-mixer, DS-deadtime spínač, LPF-dolní pásmová propust', V-výstupní signál [A56].

Prototyp kontroleru úspěšně prošel rozsáhlým testováním. Byly provedeny srovnávací testy funkčnosti s přesnou DC technikou a komerčním lock-in zesilovačem (parametry viz tab. 5.2). Obr. 5.43 ukazuje schopnost kontroleru potlačit interferující planární Hallovo napětí a offsetové napětí.



Obr. 5.43 Potlačení offsetu a planárního Hallova napětí kontrolerem.

Modré křížky označují výstupní signál senzoru vzniklý superpozicí normálového Hallova napětí (obr. 5.21), planárního Hallova napětí (obr. 5.22) a offsetového napětí. Proudová rotace kontroleru úspěšně potlačila planární Hallovo napětí i offsetové napětí, takže na výstupu kontroleru (červená křivka) je signál odpovídající normálovému Hallovo napětí [A56].

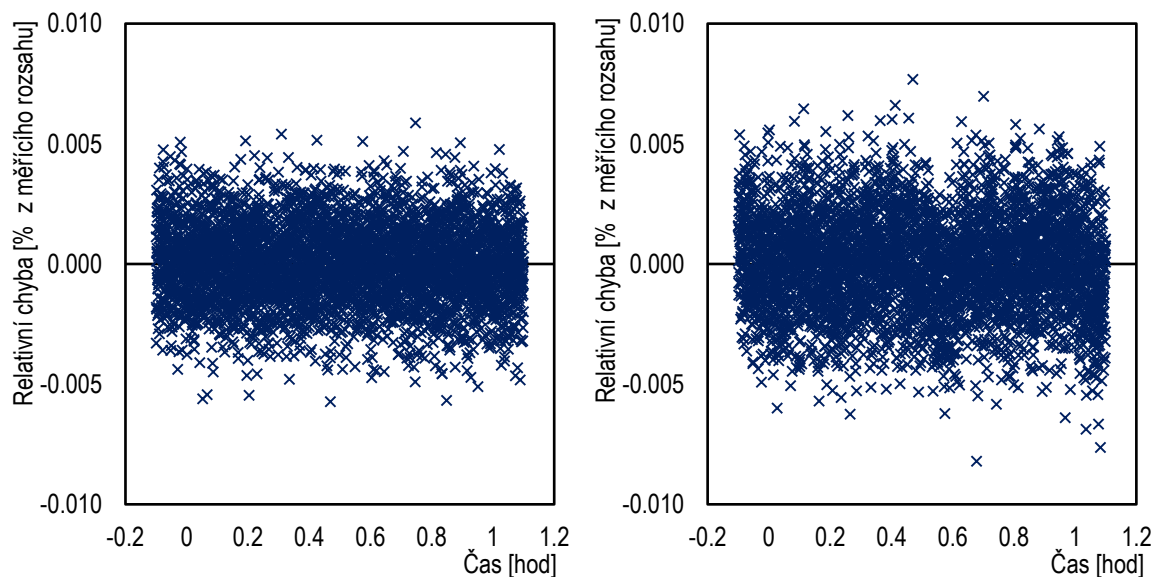


Obr. 5.44 Chyba měření normálového magnetického pole vztažená k měřicímu rozsahu.

Obr. 5.44 ukazuje zjištěnou relativní chybu měření sensorovou sestavou vztaženou k měřicímu rozsahu pro dvě odlišné polohy senzoru, při magnetickém poli působícím

přibližně kolmo k rovině senzoru a v rovině senzoru. V grafu je zřejmá dominantní systematická chyba vyvolaná pozůstatkem planárního Hallova napětí souvisejícím s nedokonalou kolmostí větví detekčního kříže senzoru [A56].

Obr. 5.45 ukazuje relativní chybu měření konstantního magnetického pole o velikosti $\sim 0,07$ T a $\sim 0,7$ T vztaženou k měřicímu rozsahu. V naměřených hodnotách převládá systematická chyba přesnosti měřicího přístroje.



Obr. 5.45 Relativní chyba měření magnetického pole permanentního magnetu o velikosti $\sim 0,07$ T (vlevo) a $\sim 0,7$ T (vpravo) v % měřicího rozsahu.

5.12 Třída přesnosti sensorové sestavy

Pro charakterizaci chyb měření vyvinutou sensorovou sestavou byla stanovena mezní absolutní chyba měření a třída přesnosti. Náhodné chyby měření byly vhodnou volbou parametrů vyhodnocovací jednotky potlačeny pod úroveň systematických chyb, jak dokumentují dříve zobrazené grafy měření.

Pro určení mezní absolutní chyby měření a třídy přesnosti sensorové sestavy byly identifikovány tři mezní chyby – mezní chyba sensorové jednotky [A58], mezní chyba kontroleru [A56] a mezní chyba kalibrace [41]. Každá z mezních chyb zahrnuje související systematické chyby uvedené v tab. 5.5. Mezní chyba sensorové jednotky neobsahuje chybu nuly a chybu přeslechu sensorů, protože je sestava posuzována jako celek a tyto chyby měření jsou ve formě chyby korekce zahrnuty do mezní chyby kontroleru.



Tab. 5.5 Mezní chyby měření [A58].

Mezní chyba sensorové jednotky	Chyba měření teploty sensorů	2,40 mT
Mezní chyba kontroleru	Chyba způsobená nepřesností měření	2,50 mT
	Chyba odstranění offsetu sensorů	
	Chyba odstranění přeslechu sensorů	
	Chyba nuly (offset)	
	Chyba zesílení	
Mezní chyba kalibrace	Chyba magnetického pole	0,01 mT
	Chyba polohy senzoru	
	Chyba nastavení teploty	
	Chyba měření výstupu sestavy	

Celková mezní chyba byla nalezena jako odmocnina součtu kvadrátů dílčích mezních chyb podle tab. 5.5:

$$\Delta_{max} = 3,46 \text{ mT} \quad (5.14)$$

Třída přesnosti sensorové sestavy v měřicím rozsahu -2,5 až 2,5 T je tak rovna:

$$T = 0.1 \quad (5.15)$$

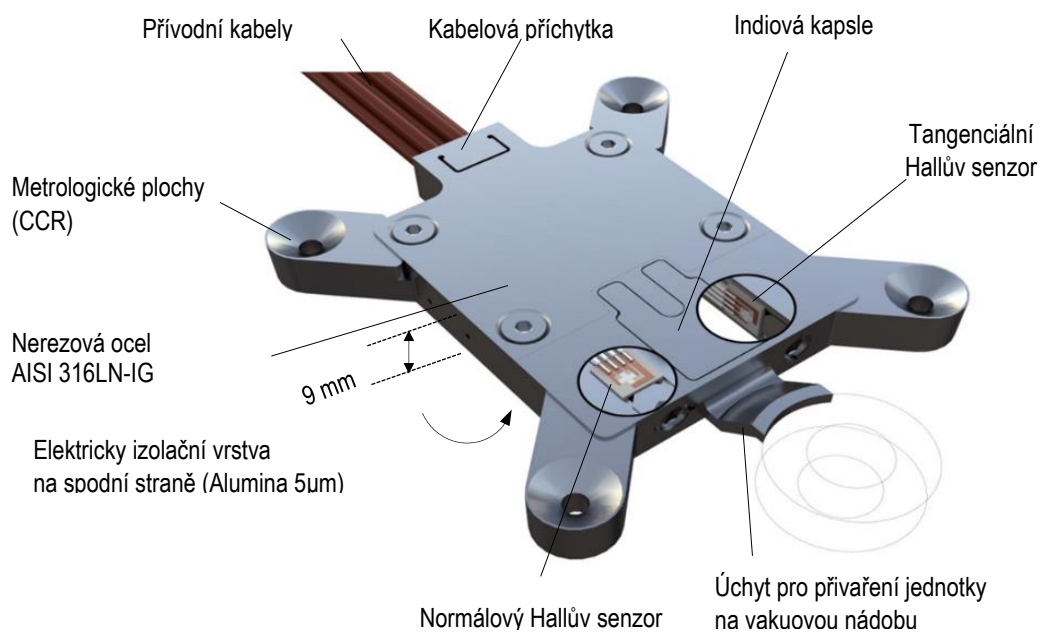
5.13 Další úkoly

V budoucím období budou probíhat aktivity související se zdokonalením vyvinutých Hallových sensorů. Cílem těchto aktivit bude především:

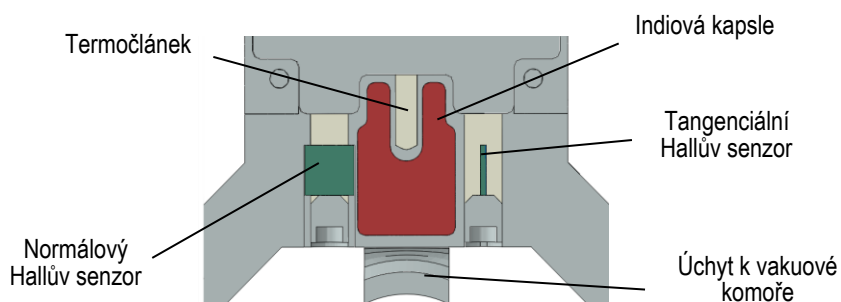
- Optimalizace sensorů s cílem dosažení vyšší přesnosti při výrobě, kalibraci a vlastním nasazení sensorů.
- Testování sensorů v podmínkách fúzních reaktorů - proběhne dlouhodobý test sensorů ve francouzském fúzním reaktoru WEST.
- Vývoj kovových Hallových sensorů použitelných v teplotách do ~ 400 °C.

Příkladem optimalizace sensorů je nový design sensorové jednotky OVSS zobrazený na obr. 5.46 [A58]. Symetrický design jednotky vůči nosnému čepu zajistí rovnoměrnější distribuci tepla v jednotce, minimalizuje teplotní rozdíl mezi Hallovými senzory a měřicím termočlánkem a tím nepřímo zvýší přesnost měření magnetického pole.

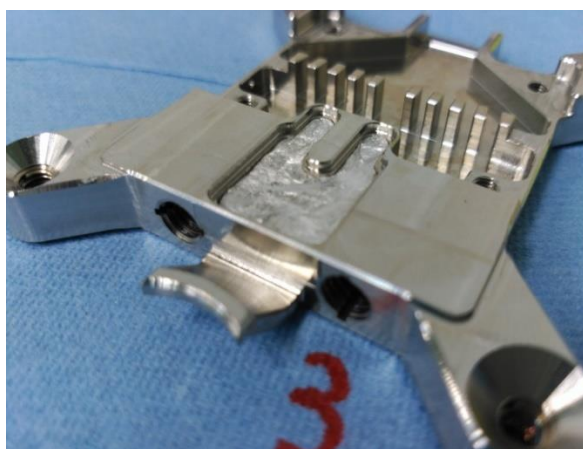
Nový design také integruje kapsli s vysoce čistým indiem o objemu $\sim 0,5 \text{ cm}^3$, která umožní pravidelnou jednobodovou rekalibraci měřicího termočlánku při vypékání reaktoru (obr. 5.47, 5.48).



Obr. 5.46 Nový optimalizovaný design sensorové jednotky.

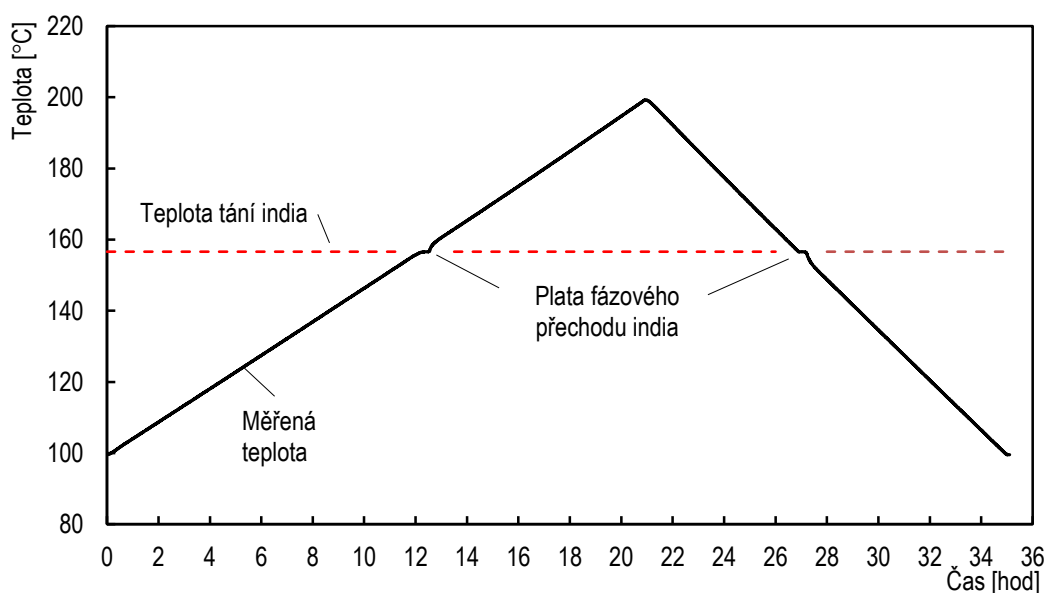


Obr. 5.47 Řez sensorovou jednotkou v oblasti indiové kapsle.



Obr. 5.48 Otevřená sensorová jednotka před uzavřením indiové kapsle.

Vypékání reaktoru spočívá v krátkodobém zvýšení teploty vakuové nádoby reaktoru z pracovní teploty 100 °C na odplyňovací teplotu 200 °C. Rychlost ohřevu reaktoru je přibližně 5 °C/hod, rychlost chladnutí je přibližně 7 °C/hod. Tepelný tok vyvolaný změnou teploty vakuové nádoby prochází přes indiovou kapsli, která obklopuje termočlánek (obr. 5.47). Při fázovém přechodu india kapsle pozastaví tepelný tok k termočlátku a v zaznamenaném signálu termočlátku budou dobře patrná plata o délce několika minut. Inflexní body v těchto platech je možné použít pro jednobodovou recalibraci termočlátku. Záznam experimentální simulace fázových přechodů je na obr. 5.49. Podrobnosti o novém designu lze nalézt v [A58].



Obr. 5.49 Plata fázového přechodu india při experimentální simulaci vypékacího cyklu reaktoru.

5.14 Závěr

Nový typ energetického reaktoru vyžaduje vývoj nových technologií včetně diagnostických metod vhodných pro prostředí jaderných elektráren. Cílem experimentální části práce bylo vyvinout prototyp radiačně a teplotně odolných Hallových senzorů pro měření ustáleného magnetického pole fúzního reaktoru ITER a tento cíl se podařilo naplnit. V rámci vývoje byly testovány různé návrhy senzorů, různé materiály a optimalizovány výrobní technologie senzorů. Kromě vlastních senzorů byly vyvinuty další související komponenty nutné pro aplikaci senzorů, především sensorová jednotka pro instalaci senzorů na reaktor a vyhodnocovací jednotka (kontroler) pro zpracování signálu senzorů. Prototyp



úspěšně prošel náročným testováním a vyvinuté senzory byly následně schváleny pro použití v mezinárodním fúzním reaktoru ITER.

Bismutové senzory představují první důležitý krok ve vývoji kovových Hallových senzorů pro fúzní energetické reaktory. Pracovní teploty ve vakuové nádobě energetického fúzního reaktoru vyžadují teplotní odolnost senzorů do ~ 400 °C, kterou bismutové senzory nenabízejí a mohou být použity pouze vně vakuové nádoby. Souběžně s průběhem instalace senzorů na reaktoru ITER proto bude probíhat vývoj Hallových senzorů s vyššími pracovními teplotami pro fúzní elektrárnu DEMO [A59].

Vývoj bismutových Hallových senzorů byl publikován v článku *Kovové Hallovy senzory* [A52] a v odborných člancích [A53]-[A58].



Kapitola 6

Souhrn hlavních výsledků

Hlavním motivem integrace jaderné fúze do energetiky jsou nevyčerpatelné zásoby paliva a minimální vliv na životní prostředí. Provedená analýza tyto vlastnosti potvrdila a současně neodhalila žádný fundamentální problém, který by bránil integraci jaderné fúze do energetiky. Klíčovým výsledkem experimentální části práce je schválený prototyp radiačně a teplotně odolných Hallovyých senzorů pro měření ustáleného magnetického pole reaktoru ITER a zahájení jeho výroby.



Teoretická analýza identifikovala charakteristické rysy budoucích fúzních zdrojů energie a popsala jejich vzájemné souvislosti. Z fyzikální podstaty jaderné fúze vyplývají tři klíčové rysy, které budou determinovat vlastnosti fúzní energetiky:

1. Palivo z lehkých chemických prvků.
2. Vysoká pracovní teplota paliva.
3. Vysoký energetický tok v reaktoru.

Bylo ukázáno, že tyto klíčové rysy implikují:

- prakticky nevyčerpatelné a dostupné zásoby paliva,
- bezemisní výrobu,
- inherentní jadernou bezpečnost,
- minimální vliv na životní prostředí,
- recirkulaci výkonu ohřevu paliva,
- nízkou životnost jaderných komponent,
- vznik sekundárně aktivovaných radioaktivních odpadů,
- specifickou strukturu výrobní ceny elektrické energie.

Na základě rozboru jednotlivých faktorů byla sestavena environmentální charakteristika fúzních zdrojů. Bylo zjištěno, že vliv fúzní energetiky na životní prostředí bude plně srovnatelný s vlivem obnovitelných zdrojů energie.

Za hlavní současnou překážku konkurenceschopného energetického využití jaderné fúze byla identifikována nedostupnost materiálů a konstrukcí komponent jaderné zóny schopných dlouhodobě odolávat neutronové a tepelné zátěži. Vysoká technologická náročnost a krátká životnost jaderných komponent se negativně promítou do výrobních nákladů a do objemu sekundárně aktivovaného radioaktivního odpadu. Nová materiálová a konstrukční řešení musí být testována, zda splňují požadavky na neutronovou a tepelnou odolnost. Zatímco testování vysokým tepelným tokem je dostupné, relevantní testování neutronovým tokem není a ani v blízké budoucnosti nebude možné.

Technicko-ekonomická ex-ante analýza modelu fúzní elektrárny ukázala ekonomická specifika budoucí fúzní energetiky, kterými jsou:

- vysoké investiční náklady,
- nízké palivové náklady,
- vysoké provozní náklady na průběžnou výměnu komponent jaderné zóny,
- minimální externí náklady.



Analyzovaný model fúzní elektrárny byl shledán při současných cenách elektřiny jako nerentabilní a jeho realizace by si vyžádala dotaci výkupní ceny elektřiny, která by ale byla nižší, než je poskytovaná podpora fotovoltaických elektráren. V případě internalizace externích nákladů výroby elektřiny by fúzní elektrárny byly jedním z ekonomicky nejvýhodnějších energetických zdrojů.

Analýza dopadu ohřevu paliva na vysoké teploty se soustředila na Lawsonovo kritérium inženýrské rovnováhy. Bylo ukázáno, že toto kritérium úzce souvisí s čistou účinností výroby elektrické energie a s recirkulací výkonu ohřevu paliva. Energie ohřevu vložená do plazmatu bude vyzařována zpět spolu s uvolněnou fúzní energií a opakovaně použita k výrobě elektřiny. Ztráty v zařízení elektrárny ale neumožní, aby recirkulující výkon plně pokryl spotřebu systému ohřevu. Kompenzace ztrát způsobí pokles čisté účinnosti elektrárny, který bude v prvních fúzních elektrárnách velmi výrazný. Analýza recirkulace výkonu ohřevu ukázala, že přínos recirkulace výkonu ke kompenzaci spotřeby systému ohřevu bude přímo úměrný reciproké hodnotě faktoru zesílení reaktoru Q . Ztráty i pokles čisté účinnosti byly analyticky popsány a odvozené rovnice byly úspěšně verifikovány podle evropských referenčních modelů fúzní elektrárny DEMO.

Bylo ukázáno, že vedlejším důsledkem recirkulace výkonu ohřevu je narušení konzistence čisté účinnosti fúzních elektráren vztažené k tepelnému výkonu reaktoru. Čistá účinnost fúzních elektráren musí být vztahována k výkonu uvolňovanému v reaktoru tvořícímu pouze část celkového tepelného výkonu reaktoru.

Hlavním motivem integrace jaderné fúze do energetiky jsou nevyčerpatelné zásoby paliva a minimální vliv na životní prostředí. Provedená analýza tyto vlastnosti potvrdila a současně neodhalila žádný fundamentální problém, který by integraci bránil. K dosažení konkurenceschopnosti fúzních elektráren je ale nutný další rozsáhlý fyzikální a technologický výzkum.

Klíčovým výsledkem experimentální části práce je funkční prototyp radiačně a teplotně odolných Hallovyých senzorů pro měření ustáleného magnetického pole reaktoru ITER. Vyvinutý prototyp úspěšně prošel testováním a byl následně schválen mezinárodní odbornou komisí ITER pro použití v reaktoru ITER.

Mezi dílčí výsledky práce patří:

- Bismutové Hallovy senzory a technologie jejich výroby.
- Charakterizace senzorů.



- Kompletace sensorové jednotky.
- Metody zpracování signálu sensorů.
- Kontroler sensorů.
- Charakterizace prototypu sensorové sestavy.

Vývoj prototypu byl zahájen na základě smlouvy ÚFP AV ČR a ITER Organization v roce 2015 a ukončen v roce 2018. Jeho cílem byl prototyp sensorové sestavy pro měření ustáleného magnetického pole aplikovatelné v prostředí reaktoru ITER. Autor se na vývoji podílel jako člen dvoučlenné tuzemské vývojové skupiny v rámci čtyřčlenného mezinárodního týmu a soustředil se především na laboratorní a elektrotechnické aktivity. Mezi jeho hlavní přínosy patří v souladu s prezentovanými dílčími výsledky geometrický návrh miniaturizovaných Hallových sensorů, charakterizace a testování sensorů, testování metod zpracování signálu sensorů, testování kontroleru, kompletace sensorové jednotky a charakterizace celé sensorové sestavy. Za finální výsledek práce lze považovat zahájení výroby sensorů na základě vyvinutého prototypu. Pod vedením vývojového týmu se na výrobě podílí řada českých a zahraničních firem.



Kapitola 7

Přínos disertační práce

Disertační práce popsala a analyzovala hlavní rysy energetického využití jaderné fúze. Detailně se věnovala jednomu z těchto rysů - recirkulaci výkonu ohřevu paliva. V rámci experimentální práce byl úspěšně vyvinut prototyp radiačně a teplotně odolných magnetických senzorů pro fúzní reaktor ITER.



Jedním z hlavních cílů vývoje jaderné energetiky jsou vysoce bezpečné jaderné reaktory. Dalšími cíli jsou zvýšení energetického potenciálu omezených zásob paliva a snížení množství produkovaného radioaktivního odpadu. Fúzní reaktory budou využívat stejný zdroj energie jako štěpné reaktory – vazebnou energii atomových jader. Přitom ale nabídnou plnou vnitřní jadernou bezpečnost bránící nekontrolované jaderné reakci. Nabídnou také prakticky nevyčerpatelné zásoby paliva a omezí jaderný odpad pouze na sekundárně aktivovanou konstrukci reaktoru z nízkoaktivovatelných materiálů. Z porovnání uvedených cílů vývoje jaderné energetiky a vlastností fúzních reaktorů je patrné, že se shodují. Fúzní reaktory v tomto smyslu představují další vývojový stupeň jaderných reaktorů, generaci V. Jejich odlišná technická konstrukce umožňuje vyřešit fundamentální omezení štěpných reaktorů a dosáhnout stanovených cílů vývoje jaderné energetiky.

Začlenění fúzních reaktorů do jaderné energetiky bude všeobecně prospěšné. Jaderná energetika vychovala za dobu své existence velké množství odborníků, kteří jsou potřeba pro současný vývoj fúzních reaktorů. V Německu po politickém omezení jaderné energetiky velká část jaderných odborníků přešla do výzkumu fúzních technologií a Německo se poté dostalo na špičku světového fúzního výzkumu. Mladé a tajuplné odvětví jaderné fúze má také vysoký potenciál přilákat k jaderné energetice mladé lidi a úspěšné vyřešení otázek jaderné bezpečnosti a vysokoaktivního odpadu využitím fúzních reaktorů výrazně zlepšit obraz jaderné energetiky před veřejností. Výhody, které s sebou jaderná fúze přinese, jsou zásadní a představují budoucnost jaderné energetiky.

Hlavní přínosy této práce k problematice energetického využití jaderné fúze jsou:

1. Zhodnocení klíčových rysů budoucí fúzní energetiky ve vzájemných souvislostech a její ex-ante porovnání s ostatními energetickými zdroji z hlediska vlivu na životní prostředí a z ekonomického hlediska. Podobná práce nebyla doposud publikována. Autor se v minulosti podílel na práci evropské projektové skupiny pro vývoj divertoru reaktoru DEMO, řídil zpracování souborného řešení testovacího komplexu HELCZA a reprezentoval Českou republiku v radě evropských fúzních laboratoří EFLO evropské agentury Fusion for Energy.
2. Odvození analytických vztahů popisujících snížení čisté účinnosti výroby elektrické energie ve fúzních elektrárnách vlivem ztrát recirkulace výkonu ohřevu paliva a přínos



recirkulace výkonu ohřevu jako reciproké hodnoty faktoru zesílení Q . Podobná práce nebyla doposud publikována.

3. Odhalení ztráty konzistence čisté účinnosti fúzních elektráren založené na tepelném výkonu reaktoru a nalezení konzistentní definice čisté účinnosti fúzních elektráren. Podobná práce nebyla doposud publikována.
4. Vyvinutí prototypu radiačně a teplotně odolných kovových Hallových senzorů pro měření magnetického pole mezinárodního fúzního reaktoru ITER. Vyvinuté senzory byly schváleny odbornou komisí ITER Organization pro použití v reaktoru ITER a již byla zahájena jejich výroba.

Autor pracuje v dvoučlenné tuzemské vývojové skupině v rámci čtyřčlenného mezinárodního týmu. Doménou autora jsou laboratorní a elektrotechnické práce. Autor se také podílí na vývoji senzorů magnetického pole pro reaktor DEMO v rámci pracovní skupiny pro vývoj diagnostiky evropského konsorcia EUROfusion.

Souhrn související publikační činnosti:

- 7 impaktovaných článků jako první nebo korespondenční autor.
- 11 impaktovaných článků jako spoluautor.
- 18 recenzovaných článků jako první autor.
- 10 popularizačních článků.
- 9 vědeckých zpráv.
- 2 monografie.
- 14 ústních prezentací na konferencích.
- 21 posterů na konferencích.
- 9 odborných recenzí.
- WOS – 32 citací, 25 bez autocitací.

Souhrn související přednáškové činnosti:

- 3 semestrální kurzy.
- 25 samostatných přednášek pro vysokoškolské studenty.
- 9 přednášek pro veřejnost.



Kapitola 8

Reference



8.1 Literatura

- [1] F. Romanelli, Fusion Electricity, A roadmap to the realization of fusion energy, EFDA, EU, 2012.
- [2] G. McCracken, P. Stott: Fúze – energie vesmíru, Mladá Fronta, Praha, 2006
- [3] M. Řípa, a kol., Řízená termojaderná syntéza pro každého – 4U, ÚFP AV ČR, Praha 2013.
- [4] G. Federici, W. Biel, M.R. Gilbert, R. Kemp, N. Taylor, R. Wenninger, European DEMO design strategy and consequences for materials, Nucl. Fusion 57 (2017) 092002 (26pp).
- [5] J. How et al., PD-Plant Description, IO IDM 2X6K67, ITER Organization, 2009.
- [6] R. Kemp, DEMO1 Reference Design April 2015, interní dokument EUROfusion IDM EU_2LBJRY, EUROfusion, 2015.
- [7] R. Kemp, DEMO2 Reference Design May 2015, interní dokument EUROfusion IDM EU_D_2LCBVU, EUROfusion, 2015.
- [8] 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.
- [9] D. Maisonnier, et al., Power plant conceptual studies in Europe, Nucl. Fusion 47 (2007) 1524–1532.
- [10] Fusion Energy – Cleaner Energy for the Future, EFDA, 2006, © Copyright 2005 FOM-Rijnhuizen/ Verdult – Kennis in Beeld, the Netherlands.
- [11] G. Federici et al., Overview of EU DEMO design and R&D activities, Fusion Engineering and Design 89 (2014) 882–889.
- [12] T. Garrison, Oceanography: An Invitation to Marine Science. Thompson Brooks/Cole, Cengage Learning, 2013.
- [13] R. E. Masterson Nuclear Engineering Fundamentals: A Practical Perspective, CRC Press 2017.
- [14] UN, The World at Six Billion, UN DESA, Population Division (1999).
- [15] Detlef P. van Vuuren, et al, The representative concentration pathways: an overview, Climatic Change 109 (2011) 5–31.
- [16] U. Bardi, Extracting Minerals from Seawater An Energy Analysis, Sustainability 2, (2010) 980-992.
- [17] C. Reux, et al, Runaway beam studies during disruptions at JET-ILW, Journal of Nuclear Materials 463 (2015) 143–149.
- [18] R. Mitteau, et al, Lifetime analysis of the ITER first wall under steady state and off normal load, Physica Scripta T145 (2011) 014081 (7pp).
- [19] R. Wenninger et al., The DEMO wall load challenge, Nuclear Fusion 57 (2017) 046002 (11pp).
- [20] J. Knaster et al., Overview of the IFMIF/EVEDA project, Nuclear Fusion 57 (2017)



- 102016 (25pp).
- [21] A. Ibarra et al., A stepped approach from IFMIF/EVEDA toward IFMIF, *Fusion Sci. Technol.* 66 (2014) 252-259.
 - [22] B. Bechnik, *Jaderná fúze není obnovitelný zdroj energie*, TZB-info 23 (2013), <<http://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/10012-jaderna-fuze-neni-obnovitelny-zdroj-energie>>
 - [23] L. Argote et al, *Learning Curves in Manufacturing*, *Science* Vol 247 (1990) 920-924.
 - [24] S. Alberici, et al, *Subsidies and costs of EU energy*, Annex 3, EC 2015.
 - [25] *Projected Costs of Generating Electricity 2015 Edition*, Executive Summary, OECD IEA NEA, 2015.
 - [26] T. A. Helmetes, G. A. Moses, J. F. Santarius, *Thermonuclear Reaction Rates*, Fusion Technology Institute, University of Wisconsin, Madison, 2005.
 - [27] J. D. Lawson, Some criteria for a power producing thermonuclear reactor, *Proc. Phys. Soc. B* 70, 6 (1957); původně výzkumná zpráva: A.E.R.E. Report GP/R 1807, Harwell, Berks 1955, A.E.R.E. Amplified version, Harwell, Berks 1956.
 - [28] S. Zheng et al., Preliminary evaluation of decay heat in a HCPB DEMO fusion reactor, *Progress in Nuclear Science and Technology* 4 (2014) 126-129.
 - [29] R. McAdams, Beyond ITER: Neutral beams for a demonstration fusion reactor (DEMO), *Review Of Scientific Instruments* 85 (2014) 02B319 (4pp)
 - [30] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc: New York, 1971.
 - [31] I. Duran, J. Stockel, G. Mank, K.H. Finken, G. Fuchs, G. Van Oost, Measurements of magnetic field fluctuations using an array of Hall detectors on the TEXTOR tokamak, *Review of Scientific Instruments*, 73 (2002) 3482-3489.
 - [32] I. Duran, O. Hronova, J. Stockel, J. Sentkerestiova, J. Havlicek, Magnetic measurements using array of integrated Hall sensors on the CASTOR tokamak, *Review of Scientific Instruments*, 79 (2008) 10F123 (3pp).
 - [33] I. Duran, M. Hron, J. Stockel, L. Viererbl, R. Vsolak, V. Cerva, I. Bolshakova, R. Holyaka, G. Vayakis, Stability of the Hall sensors performance under neutron irradiation, 12th International Congress on Plasma Physics, 25-29 October 2004, Nice, France 2004 <hal-00001781>.
 - [34] I. Bolshakova, I. Duran, R. Holyaka, E. Hristoforou, A. Marusenkov, Performance of Hall Sensor-Based Devices for Magnetic Field Diagnosis at Fusion Reactors, *Sensor Letters* 5 (2007) 283-288.
 - [35] I. Duran, I. Bolshakova, L. Viererbl, J. Sentkerestiova, R. Holyaka, Z. Lahodova, P. Bem, Irradiation tests of ITER candidate Hall sensors using two types of neutron spectra, *Review of Scientific Instruments*, 81 (2010) 10E122 (4pp).
 - [36] I. Duran, J. Sentkerestiova, K. Kovarik, L. Viererbl, Prospects of steady state magnetic diagnostic of fusion reactors based on metallic Hall sensors, *AIP Conference Proceedings* 1442:1 (2012) ,317-324.
 - [37] I. Duran, J. Sentkerestiova, M. Kohout, R. Musalek, L. Viererbl, K. Kovarik, Recent



- Results and Challenges in Development of Metallic Hall Sensors for Fusion Reactors, AIP Conference Proceedings, 1612 (2014) 31-34.
- [38] E. H. Hall, On a New Action of the Magnet on Electric Currents, American Journal of Mathematics 2 (1879) 287–292.
- [39] R. S. Popovic, Hall Effect Devices, Second edition, Institute of Physics Publishing, Bristol, 2004.
- [40] C. Goldberg, R. E. Davis, New Galvanomagnetic Effect, Phys.Rev. 5 (1954) 1121-1125.
- [41] M. Kocan, Calibration Plan OVSS PBS 55.A5/A6, ITER Organization internal document, ITER IDM U2Z3PR, ITER, 2016.

8.2 Publikace a vědecké zprávy

- [A1] S. Entler, J. Mlynář, V. Dostál, Základy fúzní energetiky I. – Historie, TZB-info 30 (2016) <<http://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14482-zaklady-fuzni-energetiky-i-historie>>.
- [A2] S. Entler, J. Mlynář, V. Dostál, Základy fúzní energetiky II. – Základní fyzika fúzních reaktorů, TZB-info 32 (2016) <<http://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14538-zaklady-fuzni-energetiky-ii-zakladni-fyzika-fuznich-reaktoru>>.
- [A3] S. Entler, J. Mlynář, V. Dostál, Základy fúzní energetiky III. – Reaktorové technologie, TZB-info 34 (2016) <<http://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14587-zaklady-fuzni-energetiky-iii-reaktorove-technologie>>.
- [A4] S. Entler, J. Mlynář, V. Dostál, Základy fúzní energetiky IV. – Jaderné komponenty, TZB-info 37 (2016), <<http://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14669-zaklady-fuzni-energetiky-iv-jaderne-komponenty>>.
- [A5] S. Entler, J. Mlynář, V. Dostál, Základy fúzní energetiky V. – Výroba elektřiny, TZB-info 38 (2016), <<https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14704-zaklady-fuzni-energetiky-v-vyroba-elektriny>>
- [A6] J.H. You, G. Mazzone, E. Visca, Ch. Bachmann, T. Barrett, G. Brolatti, V. Cocilovo, F. Crescenzi, P. K. Domalapally, D. Dongiovanni, S. Entler, G. Federici, P. Frosi, M. Fursdon, H. Greuner, D. Hancock, S. McIntosh, A. v. Müller, M. T. Porfiri, G. Ramogida, J. Reiser, M. Richou, M. Rieth, S. Roccella, A. Rydzy, R. Villari, V. Widak, Conceptual design studies for the European DEMO divertor: Rationale and first results, Fusion Eng. Des. 109–111 (2016) 1598–1603.
- [A7] L. Veselý, V. Dostál, S. Entler, Comparison of S-CO₂ power cycles for nuclear energy, Acta Polytechnica CTU Proceedings 4 (2016) 107–112.
- [A8] L. Veselý, V. Dostál, S. Entler, Study of the cooling systems with S-CO₂ for the DEMO fusion power reactor, Fusion Eng. Des., 124 (2017) 244-247.
- [A9] P. K. Domalapally, S. Entler, Comparison of cooling schemes for high heat flux components cooling in fusion reactors, Acta Polytechnica 55 (2015) 86–95.



- [A10] J. Štěpánek, V. Dostál, S. Entler, Effective water cooling of very hot surfaces during the LOCA accident, *Fusion Eng. Des.*, 124 (2017) 1211-1214.
- [A11] S. Entler, J. Mlynář, Spoutání slunce, *Středisko společných činností AV ČR, Věda kolem nás* 50, 2016.
- [A12] S. Entler, TBM- Cesta k fúzní elektřině, *MAT21 Materiály pro nové tisíciletí* 7 (2014) 7-8
- [A13] S. Entler, Elektřina z fúze (I), *TZB-info* 24 (2013), < <https://energetika.tzb-info.cz/10011-elektrina-z-fuze-i> >.
- [A14] S. Entler, Elektřina z fúze (II) - fyzikální základy, *TZB-info* 25 (2013), < <https://energetika.tzb-info.cz/10045-elektrina-z-fuze-ii-fyzikalni-zaklady> >.
- [A15] S. Entler, Elektřina z fúze (III) - reaktory ITER, HiPER a DEMO, *TZB-info* 26 (2013) <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/10069-elektrina-z-fuze-iii-reaktory-iter-hiper-a-demo> >.
- [A16] S. Entler, Fúzní palivo a obnovitelné zdroje, *Energetika* 5 (2015) 249-252.
- [A17] S. Entler, Jaderná fúze – budoucnost energetiky, *Energetika* 3 (2015) 136-142.
- [A18] S. Entler, Je jaderná fúze obnovitelný zdroj?, *TZB-info* 5 (2014), < <https://energetika.tzb-info.cz/10877-je-jaderna-fuze-obnovitelný-zdroj-energie> >.
- [A19] S. Entler, Výzkum technologie jaderné fúze, *Vesmír* 11 (2013) 622-625.
- [A20] S. Entler, Materiály pro jadernou fúzi, *MAT21 Materiály pro nové tisíciletí* 6 (2013) 5-7.
- [A21] S. Entler, EUROfusion pro výzkum jaderné fúze, *Atominfo.cz*, 20.4.2014, < <http://atominfo.cz/2014/04/eurofusion-pro-vyzkum-jaderne-fuze/> >.
- [A22] S. Entler, České fúzní čtvrtstoletí. Co děláme pro projekt „umělého slunce“, *iDnes.cz*, http://technet.idnes.cz/jaderna-fuze-cesko-039-/veda.aspx?c=A150129_152739_veda_mla, 3.2.2015
- [A23] S. Entler, M. Řípa, Je to tady! Blíží se fúzní elektrárna!, *3pol.cz*, <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/1664-je-to-tady-blizi-se-fuzni-elektrarna>, 24.3.2015
- [A24] J. Mlynář, S. Entler, Energie hvězd pro lidstvo, *Pro-Energy* 1 (2015) 40-42
- [A25] S. Entler, Komentář k článku „Uspěje jaderná fúze v menších zařízeních?“, *Energetika* 6 (2015) 353
- [A26] K. Červenka, J. Mlynář, S. Entler, Evropský fúzní reaktor JET, *osel.cz*, <http://www.osel.cz/9200-evropsk-f-zn-reaktor-jet.html>, 17.1.2017
- [A27] K. Červenka, J. Mlynář, S. Entler, Současnost a budoucnost evropského fúzního reaktoru JET, *3pol.cz*, <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/1973-soucasnost-a-budoucnost-evropskeho-fuzniho-reaktoru-jet>, 31.1.2017
- [A28] S. Entler, Historie aplikovaného výzkumu jaderné fúze v Řeži, *Centrum výzkumu Řež s.r.o., Řež*, 2014.
- [A29] S. Entler, J. Kysela, Overview on Fusion Nuclear Technology Experimental Testing,



- J of Nuclear Rad Sci 2 (2016) 021018-021025.
- [A30] S. Entler, V. Dostál, Jaderná bezpečnost fúzních elektráren a jejich vliv na životní prostředí, *Bezpečnost jaderné energie* 9/10 (2017) 262-268.
- [A31] S. Entler, J. Málek, J. Brokešová, Moderní trendy seismického zabezpečení jaderných elektráren, *Energetika* 3 (2017) 179-184.
- [A32] S. Entler, J. Málek, J. Brokešová, Moderní trendy seismického zabezpečení jaderných elektráren, *Bezpečnost jadrovej energie* 7/8 (2017) 218-224.
- [A33] J. Horacek, P. Dobias, G. Cunningham, R. Duban, M. Imrisek, T. Markovic, J. Havlicek, J. Vlcek, S. Entler, Feasibility study of fast swept divertor strike point suppressing transient heat fluxes in tokamaks DEMO and COMPASS-Upgrade, *Fusion Eng. Des.*, 123 (2017) 646-649.
- [A34] J. Horacek, S. Entler, K. Kovarik, P. Vondracek, J. Adamek, M. Hron, R. Panek, V. Weinzettl, Plans for liquid metal divertor in tokamaks COMPASS (Upgrade), vystoupení na konferenci 5th International symposium on liquid metals applications for fusion (ISLA-5), Moskva, Rusko, 2017
- [A35] J. Kysela, S. Entler, R. Všolák, T. Klabík, O. Zlámal, B. Bellin, F. Zacchia, In-pile testing of ITER first wall mock-ups at relevant thermal loading conditions in the LVR-15 nuclear research reactor, *Fusion Eng. Des.*, 98-99 (2015) 1271-1275.
- [A36] M. Jirsa, M. Rames, I. Duran, S. Entler, T. Melisek, P. Kovac, L. Viererbl, Electromagnetic properties of REBaCuO superconducting tapes considered for magnets of fusion reactor, *Fusion Eng. Des.*, 124 (2017) 73-76.
- [A37] S. Entler, M. Reungoat, B. Wolf, Experimental Device HELCZA Technical description, F4E OPE-319 Proposal, Centrum výzkumu Řež, květen, 2013.
- [A38] S. Entler, Všolák R., Reungoat M., PFW User Requirements for Technology, CVR 044R8, Řež 2013.
- [A39] S. Entler a kol., Experimentální zařízení HELCZA Conceptual Design, CVR 153, Řež 2013.
- [A40] S. Entler, B. Wolf, Experimental Device HELCZA Technical Description, CVR 154, Řež 2013.
- [A41] S. Entler a kol., Experimentální zařízení HELCZA Enhanced design, CVR 168, Řež 2013.
- [A42] S. Entler, B. Wolf, Electron Beam Collimation, CVR 192, Řež 2013.
- [A43] S. Entler a kol., Experimental Complex HELCZA Preliminary Design, CVR 271, Řež, 2014.
- [A44] S. Entler et al., Experimental Complex HELCZA Initial Report, Fusion For Energy IDM 3A2FHF/3.0, Fusion For Energy, 2015.
- [A45] J. Prokůpek, K. Samec, R. Jílek, P. Gavila, S. Neufuss, S. Entler, HELCZA High Heat Flux Test Facility for Testing ITER EU First Wall Components, *Fusion Eng. Des.*, 124 (2017) 187-190.
- [A46] S. Entler, T. Dlouhý, V. Dostál, J. Horáček, Ekonomika fúzní energetiky, *Energetika* 5 (2017) 318-323.



- [A47] S. Entler, J. Horáček, T. Dlouhý, V. Dostál, Approximation of the Economy of Fusion Energy, *Energy* 152 (2018) 489-497.
- [A48] S. Entler, Lawsonovo kritérium – kritérium fúzní energetiky, *Čes. časopis pro fyziku* 64 (2014) 161-167.
- [A49] S. Entler, Engineering Breakeven, *Journal of Fusion Energy*, 34 (2015) 513-518.
- [A50] S. Entler, M. Kolovratník, V. Dostál, Recirkulace výkonu ve fúzních elektrárnách, *Energetika* 4 (2017) 247-250.
- [A51] S. Entler, V. Dostál, Estimation of the DEMO Net Efficiency, EUROFUSION IDM WPPMI-PR(15)07, EUROFUSION Preprint, 2015.
- [A52] S. Entler, I. Ďuran, Kovové Hallové sensory, *Čes. časopis pro fyziku* 67 (2017) 91-101.
- [A53] M. Kocan, I. Duran, S. Entler, G. Vayakis, J.M. Carmona, P. Gitton, J. Guirao, M. Gonzalez, S. Iglesias, Q. Pascual, G. Sandford, S. Tyllinski, C. Vacas, M. Walsh, R. Walton, Final design of the ITER outer vessel steady-state magnetic sensors, *Fusion Eng. Des.*, 123 (2017) 936-939.
- [A54] I. Duran, S. Entler, M. Kocan, M. Kohout, L. Viererbl, R. Musalek, T. Chraska, G. Vayakis, Development of Bismuth Hall sensors for ITER steady state magnetic diagnostics, *Fusion Eng. Des.*, 123 (2017) 690-694.
- [A55] I. Duran, S. Entler, M. Kohout, M. Kocan, G. Vayakis, High magnetic field test of Bismuth Hall sensors for ITER steady state magnetic diagnostic, *Review of Scientific Instruments* 87 (2016) 11D446 (4pp).
- [A56] S. Entler, I. Duran, P. Sladek, G. Vayakis, M. Kocan, Signal conditioning and processing for metallic Hall sensors, *Fusion Eng. Des.* 123 (2017) 783-786.
- [A57] S. Entler, I. Duran, M. Kocan, G. Vayakis, Investigation of linearity of the ITER outer vessel steady-state magnetic field sensors at high temperature, *Journal of Instrumentation* 12 (2017) C07007 (7pp).
- [A58] S. Entler, M. Kocan, I. Duran, G. Vayakis, F. Lucca, F. Vigano, R. Cantu, Recent improvement of the design of the ITER steady-state magnetic sensors, *IEEE Transactions on Plasma Science*, v tisku.
- [A59] W Biel, R. Albanese, R. Ambrosino, M. Ariola, M. v. Berkel, T. Bolzonella, M. Cecconello, S. Cimerman, S. Conroy, A. Dinklage, I. Duran, R. Dux, S. Entler, E. Fable, D. Farina, C. Finotti, Th. Franke, L. Giacomelli, L. Giannone, W. Gonzalez, A. Hjalmarsson, M. Hron, F. Janky, A. Kallenbach, B. Koncar, R. König, R. Luis, A. Malaquias, O. Marchuk, G. Marchiori, G. De Masi, D. Mazon, H. Meister, K. Meyer, R. Moutinho, A. Mlynek, S. Nowak, Ch. Piron, A. Pironti, H. Policarpo, P. B. Quental, N. Rispoli, V. Rohde, G. Sergienko, S. El Shawish, A. Silva, F. da Silva, A. Smole, C. Sozzi, M. Tardocchi, M. Tokar, W. Treutterer, A. Vale, R. Wenninger, K. Zagar, H. Zohm, Initial concept for the plasma control for the European DEMO tokamak reactor, vystoupení, Symposium on Fusion Engineering SOFE 2017, Shanghai, Čína, 2017.



Kapitola 9

Přílohy



A. Přehled vyrobených sérií Hallových senzorů

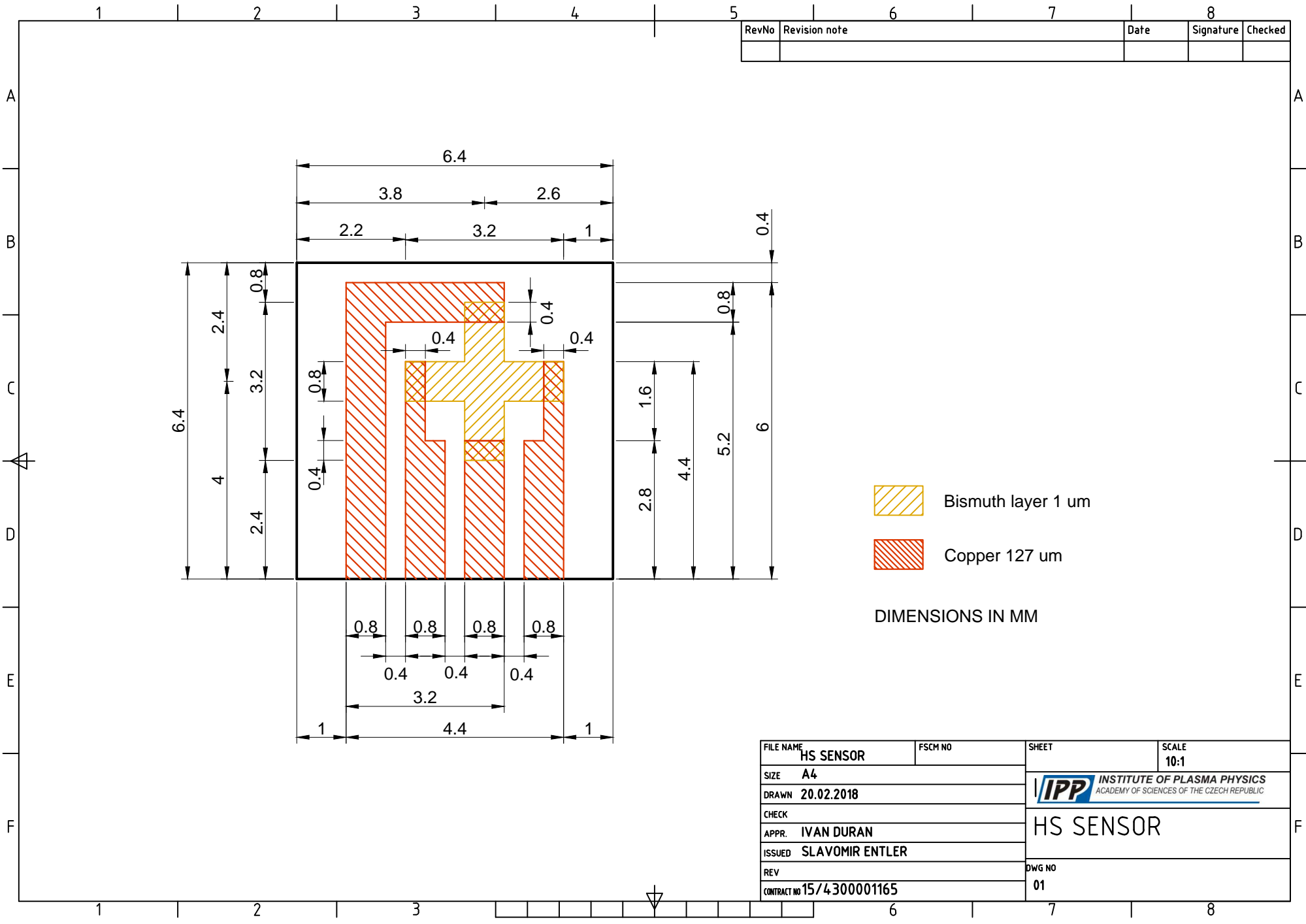
Vývojové série Halových senzorů 9,6 mm x 9,6 mm

Série	Design	Substrát	Citlivá vrstva	Tloušťka	Teplota depozice	Pasivační vrstva	Tloušťka	Ochranné pokrytí	Charakteristika
S1	Asym	AlN	Cu	0,9 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	nízká citlivost
S2	Asym	AlN	Bi	4,5 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	nízká citlivost
S3	Asym	AlN	Bi	4,5 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	nízká citlivost
S4	Asym	AlN	Bi	1,00 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	litografická výroba, nefunkční
S5	Asym	AlN	Bi	1,00 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	nevodivá vrstva
S6	Asym	AlN	Bi	2,15 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	nízká citlivost
S7	Asym	AlN	Bi	1,10 μm	20 °C, žihání 200 °C	-	-	ZrO ₂	nízká citlivost
S8	Asym	AlN	Bi	1,10 μm	20 °C, žihání 300 °C	-	-	ZrO ₂	nefunkční
S9	Asym	AlN	Bi	1,10 μm	20 °C, žihání 250 °C	-	-	ZrO ₂	nízká citlivost
S10	Asym	AlN	Bi	1,00 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	nestálost
S11	Asym	AlN	Bi	2,25 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	nízká citlivost
S12	Asym	AlN	Bi	1,00 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	nefunkční
S13	Asym	AlN	Bi	2,25 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	nízká citlivost
S14	Asym	AlN	Bi	2,25 μm	200 °C	SiO ₂	1 μm	ZrO ₂	špatná soudružnost

Vývojové série miniaturizovaných Halových senzorů 6,4 mm x 6,4 mm

Série	Design	Substrát	Citlivá vrstva	Tloušťka	Teplota depozice	Pasivační vrstva	Tloušťka	Ochranné pokrytí	Charakteristika
M1	x	AlN	Bi	1 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	chybná geometrie
M2	x	AlN	Bi	0,8 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	nestálost
M3	x	AlN	Bi	0,9 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	nestálost
M4	x	AlN	Bi	0,5 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	nestálost
M5	+	AlN	Bi	1,2 μm	200 °C	-	-	ZrO ₂	teplotní nestálost
M6	+	AlN	Bi	1,2 μm	200 °C	SiO ₂	1 μm	ZrO ₂	teplotní nestálost
M7	+	AlN	Bi	1,2 μm	200 °C	SiO ₂	3 μm	ZrO ₂	teplotní nestálost
M8	+	AlN	Bi	1,2 μm	200 °C	SiO ₂	5 μm	ZrO ₂	teplotní nestálost
M9	+	AlN	Bi	1,2 μm	200 °C	-	-	Al ₂ O ₃	vysoká citlivost
M10	+	AlN	Bi	1,2 μm	200 °C	Al ₂ O _x	5 μm	Al ₂ O ₃	funkční
M11	+	AlN	Bi	1,2 μm	200 °C	Al ₂ O ₃	5 μm	Al ₂ O ₃	funkční
M12	+	Al ₂ O ₃	Bi	1,2 μm	200 °C	Al ₂ O ₃	5 μm	Al ₂ O ₃	chybná geometrie
M13	+	AlN	Bi	3 μm	200 °C	AlN	1 μm	Al ₂ O ₃	teplotní nestálost
M14	+	½AlN, ½Al ₂ O ₃	Bi	1 μm	200 °C	Al ₂ O _x	5 μm	Al ₂ O ₃	teplotní nestálost
M15	+	AlN	Bi-Cu 1-2%	1,2 μm	200 °C	Al ₂ O ₃	-	Al ₂ O ₃	nestálost
M16	+	AlN	Bi-Sb 9%	1,2 μm	200 °C	Al ₂ O ₃	5 μm	AlN	nespojité citlivost
M17	+	AlN	Bi-Sb 30%	1,2 μm	200 °C	Al ₂ O ₃	5 μm	AlN	nespojité citlivost
M18	+	Al ₂ O ₃	Bi	1,2 μm	200 °C	½Al ₂ O ₃ , ½Al ₂ O _x	5 μm	Al ₂ O ₃	nestálost

B. Výkres finálních Halloových senzorů



RevNo	Revision note	Date	Signature	Checked

- Bismuth layer 1 μm
- Copper 127 μm

DIMENSIONS IN MM

FILE NAME HS SENSOR	FSCM NO	SHEET	SCALE 10:1
SIZE A4	INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS <small>ACADEMY OF SCIENCES OF THE CZECH REPUBLIC</small>		
DRAWN 20.02.2018			
CHECK	HS SENSOR		
APPR. IVAN DURAN			
ISSUED SLAVOMIR ENTLER	DWG NO		
REV	01		
CONTRACT NO 15/4300001165			