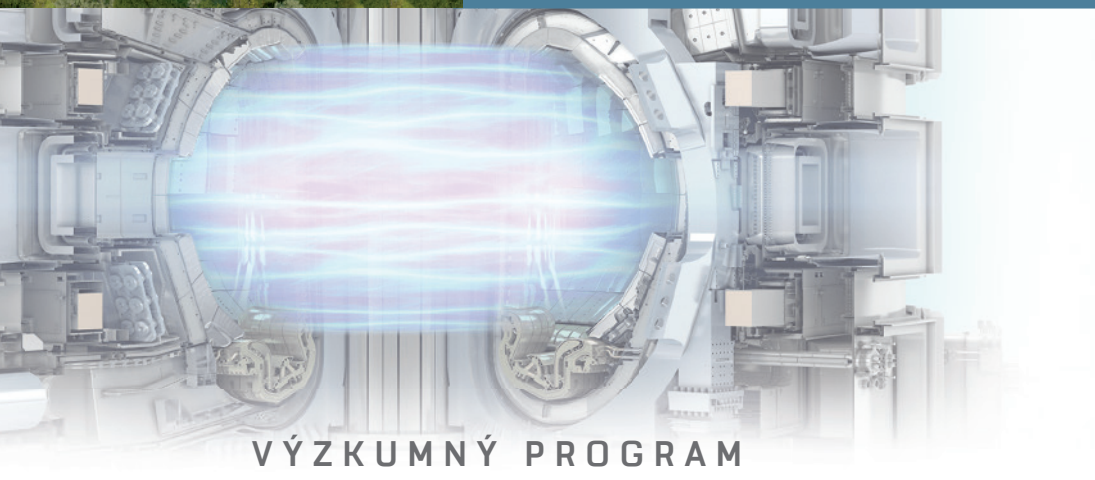




Martin Ďurďovič,
Slavomír Entler, Jan Horáček,
Jiří Málek, Jan Syblík,
Vladimír Wagner

Malé modulární reaktory



VÝZKUMNÝ PROGRAM

UDRŽITELNÁ ENERGETIKA

Obsah

Nové jaderné zdroje	2
Současný stav v oblasti malých modulárních reaktorů	10
Potenciál mikromodulárních reaktorů pro odlehlé doly v Kanadě	21
Seismické ohrožení jaderných elektráren - změny metodiky při zavedení SMR	30
Malé modulární reaktory pohledem veřejného mínění	34
Green Deal a role jaderné energetiky v ČR	40
Autoři	56

Nové jaderné zdroje

Slavomír Entler, Jan Horáček, Jiří Málek

Chceme-li skutečně snížit dopady klimatických změn a plnit závazky Pařížské klimatické dohody přijaté v roce 2015 s vědomím, že atmosféra je neoddělitelně společná komodita světa, pak podle zprávy Mezivládního panelu pro změnu klimatu při OSN z roku 2018 musí být součástí energetické základny jaderné zdroje a množství jaderných reaktorů je nutné do roku 2050 navýšit oproti dnešku 2krát až 5krát (dle různých scénářů). Bez jaderných zdrojů není možné klimatické změny zmírnit, protože jsou jediným nefosilním zdrojem nezávislým na počasí, na denní a roční době nebo geografické poloze.

Rozvoj jaderné energetiky

Jaderná energie představuje nejefektivnější a nejsilnější energetický zdroj, jaký lidstvo zná. Tato nezvratná skutečnost je silným motivem vedoucím k rozvoji jaderné energetiky. Přitom jde o nízkoemisní a nízkouhlíkový zdroj, který umožňuje účinně snižovat emise při výrobě elektřiny a který jako jeden z mála může účinně zpomalit globální oteplování způsobující klimatické změny. Jaderná energetika v řadě zemí prokázala, že její rozšíření úspěšně vede k nízkoemisní energetice (Francie, Švýcarsko, Švédsko a další), jak průběžně dobře dokumentuje například ElectricityMap.org.

Vážnou překážkou rozvoje jaderné energetiky je riziko jaderných havárií. Již jen označení „jaderná“ vzbuzuje u části populace strach, který způsobuje a priori odmítání všeho „jaderného“. Tento strach se zrodil za studené války v době výbuchů atomových bomb a jaderného zastrašování. Hnutí bojující proti atomovým bombám oslovilo ve druhé polovině minulého století velkou část mladé populace. Odpor se pak obrátil i proti jaderné energetice, protože některé energetické reaktory vyráběly vedle elektřiny i plutonium pro atomové bomby. Po havárii Černobylské jaderné elektrárny došlo k eskalaci odporu a odmítavý postoj zaujala významná část veřejnosti. V delším časovém horizontu vedla černobylská havárie k postupnému útlumu rozvoje jaderné energetiky. Od počátku století se počet aktivních reaktorů navzdory celosvětovému růstu spotřeby prakticky nezměnil. Havárie jaderné elektrárny ve Fukušimě tento trend ještě posílila.

Počet celosvětových úmrtí způsobených fosilními palivy a spalováním biomasy (až 5 milionů předčasných úmrtí ročně v důsledku dýchání vzduchu znečištěného zplodinami hoření) je přitom o několik řádů vyšší nežli úmrtnost způsobená jadernou energetikou včetně uvedených havárií. Kvůli strachu z jádra zbytečně umíráme na exhalace ze spalování uhlí, plynu, ropy nebo dřeva.

S omezením výstavby jaderných elektráren byl současně utlumen také vývoj nových konceptů jaderných reaktorů. Západní programy vývoje reaktorů IV. generace přešly až na výjimky do soukromých rukou, avšak vysoká komerční i technologická rizika společně s protijaderným odporem veřejnosti způsobila, že málokdo skutečně věří, že reaktory IV. generace mohou energetiku významně ovlivnit. Odpovědí na tento stav je vývoj nových malých pasivně bezpečných modulárních reaktorů, umožňujících snížit zmíněná komerční i technologická rizika, a intenzifikace vývoje nových reaktorů na bázi jaderné fúze.

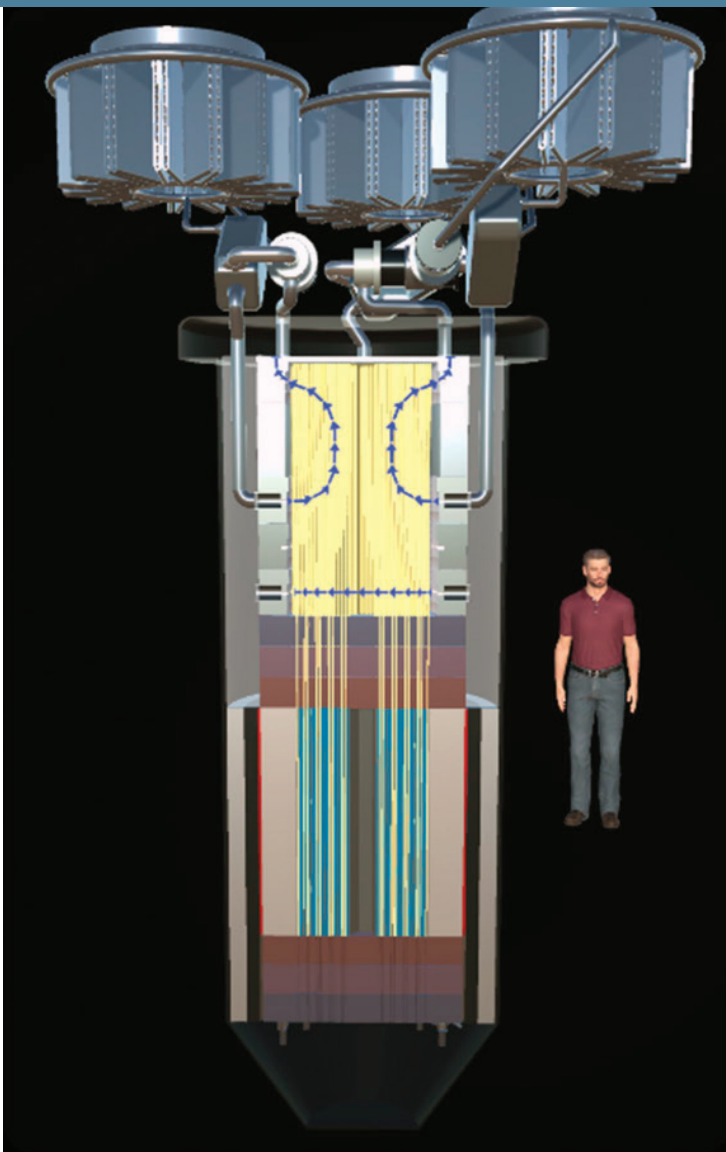
Malé a mikromodulární reaktory

Malé modulární reaktory (*Small Modular Reactor*, SMR) jsou definovány jako jaderné reaktory o výkonu 10 až 300 MW_e, které jsou konstruovány pomocí modulární technologie s cílem využít sériové výroby jednotlivých modulů. Mikromodulární reaktory (*Micro Modular Reactor*, MMR) jsou pak omezeny výkonem 10 MW_e. Koncept modulárních reaktorů vyšel ze snahy razantního snížení investičních nákladů na základě zmenšení velikosti reaktorů, přenesení podstatné části výroby reaktorů do výrobních závodů a sériové výroby reaktorových jednotek. Tovární výroba také poskytne záruky vysoké kvality a spolehlivosti zařízení, a tím i nižších provozních nákladů.

V případě mikromodulárních reaktorů lze v ideálním případě dosáhnout kontejnerového řešení, kdy se na stavenišťe doveze již otestovaný reaktor umístěný v kontejneru spolu se zařízením chladicích okruhů a výroby elektřiny, jednoduše se připojí na připravené přívody a v továrně vložené palivo umožní nepřetržitý provoz reaktoru po dobu několika let. Po vyčerpání paliva se kontejner odveze zpět do výrobního závodu, kde se provede výměna paliva a reaktor bude repasován.

Důležitým rysem SMR/MMR bude vysoká pasivní bezpečnost, prakticky vylučující jaderné havárie. Malé modulární reaktory jsou často založeny na nových pasivně bezpečných konceptech reaktorů IV. generace a SMR, které vycházejí z prostého zmenšení stávajících velkých reaktorů, mají přepracované a zdokonalené systémy pasivní ochrany. Design reaktorů by měl také zajistit co nejdélejší provoz reaktorů bez nutnosti výměny paliva s tím, že je ale limitováno obohacení paliva na maximálně 20 procent ²³⁵U, aby ho nebylo možné zneužít k výrobě jaderných bomb.

Slabým místem aplikace SMR/MMR je postoj veřejnosti. Nelze očekávat, že občané přivítají hodně malých jaderných reaktorů, pokud odmítají jeden velký. Dohoda o umístění jaderného zařízení v konkrétní lokalitě stojí velké úsilí a její dosažení trvá mnoho let. Konvenční velká jaderná elektrárna potřebuje získat souhlas s výstavbou v jedné lokalitě, zatímco rozptýlené malé reaktory o srovnatelném celkovém výkonu by musely získat stejný souhlas v několika lokalitách. Na základě tuzemských zkušeností s projednáváním umístění hlubinného úložiště jaderného odpadu lze takový záměr označit přinejmenším za velmi obtížný.



Obr. 1 Mikroreaktor LANL včetně technologie na výrobu elektřiny na bázi tepelného cyklu superkritického CO₂ (zdroj: Los Alamos National Laboratory)

Odpor veřejnosti také pravděpodobně výrazně omezí možnost použít SMR pro výrobu tepla, které se v souvislosti se SMR často zmiňuje. Teplárny jsou umísťovány v blízkosti sídel, aby se omezily ztráty tepla ve vedení. Náhrada uhelných nebo plynových tepláren malými jadernými reaktory na okraji měst by vyvolala silný odpor obyvatel, a bude velmi obtížné přesvědčit městská zastupitelstva, aby stavbu povolila.

Mezi další zajímavé použití SMR/MMR patří integrace vysokoteplotních reaktorů do průmyslových podniků jako zdrojů vysokopotenciálového tepla nebo pro výrobu vodíku. Výrobní závody se ale obvykle nacházejí ve městech nebo v jejich těsné blízkosti, a proto bude takové použití stejně problematické jako výstavba jaderných tepláren. Například výroba vodíku může být však situována do odlehlých, řídko osídlených míst, protože jedna z výhod vodíku ve srovnání s elektřinou nebo teplem je jeho relativně snadný transport. Malé modulární reaktory by takto mohly zajistit efektivní velkovýrobu vodíku pro průmysl a dopravu po celém světě.

Podobně mohou být SMR/MMR využity jako kogenerační zdroje elektřiny a tepla ve špatně dostupných nebo málo obydlených částech světa. V nedávné době byla takto spuštěna jaderná elektrárna na lodi Akademik Lomonosov, která již slouží jako zdroj energie pro město Pevek na Čukotce.

Dalším efektivním využitím SMR je náhrada velkých dosluhujících jaderných bloků sestavou několika SMR, pokud v lokalitě převažuje zájem veřejnosti zachovat elektrárnu v provozu a tím i pracovní místa v regionu. To se částečně týká i ČR. Výstavba nových bloků jaderné elektrárny Temelín je vhodnou příležitostí pro aplikaci SMR. Společně s novými velkými výrobními bloky by bylo užitečné postavit také zkušební SMR a získat tak informace o jeho reálném provozu a efektivitě.

Značné zlepšení ekonomiky výstavby a provozu SMR nabízí jejich propojení s využíváním geotermální energie. Část výkonu SMR v době mimo energetické špičky lze využít k hloubení geotermálních vrtů tzv. horkou metodou, která využívá roztavení a opětovnou rekrystalizaci hornin, z nichž se pak vytváří pažení hlubokých vrtů. Po dosažení dostatečné hloubky začne vrt produkovat geotermální energii, kterou je možné čerpat i nepravidelně, a to v době energetických špiček. Soustava SMR a geotermálních vrtů vytvoří ideální zdroj energie, jenž je schopen poskytovat velký výkon v době špiček, několikanásobně převyšující výkon samotného SMR. Geotermální elektrárna může také pokrýt energetickou spotřebu při výměně SMR za nový modul. Takový systém by byl zcela nezávislý na vnějších povětrnostních faktorech a mohl by pracovat bez přerušování po mnoho let. Umožnil by například autonomní zásobování energií pro celé město a snížil by nároky na dálkovou přenosovou soustavu, která by sloužila jen pro nenadálé krizové situace. Spojení SMR s geotermální elektrárnou a teplárnou do jednoho celku nabízí možnost zahloubení celé technologie pod zem. Vzniklo by tak řešení autonomního dlouhodobého zásobování teplem a elektřinou, jež by se vyznačovalo vysokou bezpečností a minimálními vlivy na životní prostředí.

Malé a mikromodulární reaktory představují významný krok ve vývoji jaderných zdrojů energie. Nová technická řešení s vysokým stupněm pasivní bezpečnosti a nízkými celkovými investičními náklady přibližují výstavbu jaderných elektráren komerční sféře a rozšiřují možnosti využití jaderné energie. Veřejné mínění ale může výrazně omezit jejich použití.

Jaderná fúze

Fúzní reaktory se často označují za jaderné reaktory V. generace. Toto zařazení odpovídá tomu, že fúzní reaktory budou využívat stejnou jadernou energii jako štěpné reaktory – vazebnou energii atomového jádra. Hlavní problémy současné jaderné energetiky, kterými jsou nedůvěra v bezpečnost jaderných reaktorů a jaderný odpad, fúzní reaktory zcela odstraňují – jsou inherentně bezpečné a vlastní jaderná reakce produkuje jen užitečné helium.

Jaderná fúze umožní nízkoemisní, nízkouhlíkovou a nízkoodpadovou výrobu elektrické energie o vysokém výkonu, nezávislém na počasí, denní době nebo geografických podmínkách. Vysoký energetický tok fúzních zdrojů umožní koncentrovat výrobu elektrické energie do jednoho místa a fúzní elektrárny mohou vytvořit průmyslovou protiváhu distribuovaných obnovitelných zdrojů.

Z pohledu ochrany přírody a životního prostředí budou fúzní elektrárny více ekologické než současné obnovitelné zdroje, protože umožní vyrábět elektřinu bez devastace přírodních zdrojů konstrukčními materiály, bez nutnosti záboru rozsáhlých přírodních ploch a bez nutnosti udržování záskokových fosilních elektráren pro dobu, kdy nesvítí slunce nebo nefouká vítr. Externí náklady výroby elektřiny ve fúzních elektrárnách budou nejnižší ze všech využívaných zdrojů energie včetně obnovitelných.

Fúzní elektrárny budou přitom naprosto bezpečné, protože neřízená jaderná reakce ve fúzních reaktorech není fyzikálně možná. Velmi vysoká teplota paliva dosahující až stovek milionů °C, která je pro průběh fúzní reakce nezbytná, je dokonalou bezpečnostní pojistkou. Jakmile dojde k jakémukoli poruše, palivo se přirozeně ochladí a fúzní reakce se v milisekundě zastaví. Kromě toho bude v každém okamžiku v reaktoru pouze několik gramů paliva a zastavení přívodu paliva okamžitě zastaví probíhající reakci. Ani případný havarijný únik paliva – izotopů vodíku – v tomto množství nic nezpůsobí.

Důležitou výhodou využití jaderné fúze jsou prakticky nevyčerpatelné zásoby fúzního paliva. Spotřeba fúzního paliva bude velmi nízká, fúzní elektrárna o výkonu Jaderné elektrárny Temelín spotřebuje okolo 2 kilogramů vodíkového paliva denně. Přitom jeho pozemské zásoby jsou velmi velké. První generace fúzních elektráren bude jako palivo využívat izotop vodíku deuterium, které se ve velkém množství

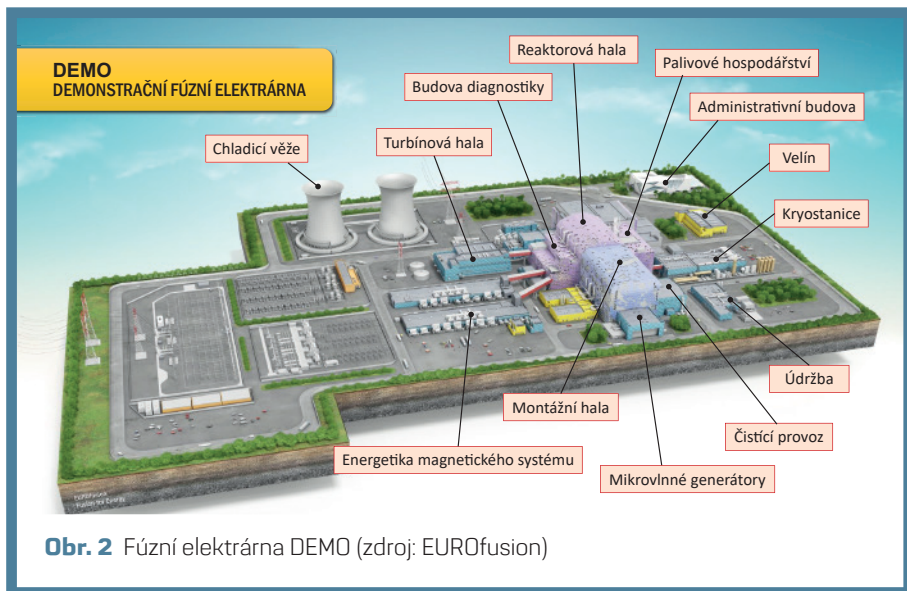
nachází ve vodě, a lithium, které se bude přímo ve fúzním reaktoru přepracovávat na izotop vodíku tritium. Další generace fúzních reaktorů pak bude používat jen deuterium. Ve vodě na Zemi se nachází více než $4,8 \times 10^{13}$ tun deuteria, které i přes vzrůstající energetickou spotřebu lidstvu vystačí na několik miliard let. Zásoby lithia v oceánech pro první generaci elektráren dosahují až $2,4 \times 10^{11}$ tun a vystačí více než milion let. Ve vesmíru pak fúzní palivo tvoří většinu viditelné hmoty.

Odpadem výroby elektrické energie ve fúzních elektrárnách bude inertní plyn helium a aktivovaná konstrukce reaktoru. Helium je ceněný plyn, který se používá v řadě aplikací, a počítá se s jeho využitím přímo v elektrárně pro doplnění chladiwa kryogenních systémů; fúzní elektrárna o výkonu Jaderné elektrárny Temelín vyprodukuje zhruba 1 kilogram helia denně. Při provozu reaktoru bude také docházet k aktivaci materiálů konstrukce reaktoru neutrony vznikajícími při fúzní reakci. Tyto materiály je ale možné zvolit takové, ze kterých nevznikají žádné radioaktivní prvky s dlouhým poločasem rozpadu. Díky vhodné volbě konstrukčních materiálů (například nízkoaktivovatelné feriticko-martenzitické oceli) bude možné konstrukci reaktoru po 50 letech recyklovat.

Dlouhodobým cílem výzkumu je využívání tzv. bezneutronové fúze, při které uvolněnou energii přenášejí pouze nabitě částice. V takovém případě bude možné vyrábět elektřinu přímo, bez termodynamického cyklu, pomocí magnetohydrodynamických generátorů. Zařízení elektrárny se tím výrazně zjednoduší, odpadnou chladicí věže a účinnost výroby elektřiny stoupne až na trojnásobek. Kromě toho se sníží prakticky na nulu aktivace konstrukčních materiálů. Využití bezneutronové fúze je ale podmíněno intenzivním vývojem fúzních reaktorů především v oblastech magnetických systémů a fyziky plazmatu, protože pro průběh bezneutronové fúze je nutné řádově vyšší magnetické pole, než umíme v současnosti vytvořit. Proto pro dosažení bezneutronové fúze musíme nejprve vyvinout nové silné magnety.

V současné době probíhá kompletace největšího fúzního reaktoru na světě – reaktoru ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) o tepelném výkonu 500 MW. Reaktor ITER nebude vyrábět elektřinu, jeho úkolem bude prokázat technickou realizovatelnost uvolňování velkého množství fúzní energie a otestovat technologické systémy pro fúzní elektrárny. ITER bude spuštěn v roce 2028 a plného výkonu dosáhne v roce 2036. Horké palivo o teplotě více než 150 milionů °C bude na konstrukci reaktoru a reaktorové technologie klást nároky, které jsou na hraně současných technických možností. Proto je úloha reaktoru ITER vyzkoušet tyto technologie zásadní. Jestliže se navržené komponenty a systémy osvědčí, bude zahájena výstavba prototypů fúzních elektráren označovaných jako demonstrační fúzní elektrárny, zkráceně DEMO.

V Evropské unii je zahájení výstavby elektrárny DEMO naplánováno na rok 2040 a její zprovoznění by mělo proběhnout do roku 2060. Reaktor DEMO bude přibližně o polovinu větší verzí reaktoru ITER, čistý elektrický výkon elektrárny bude okolo



400 MW_e. Alternativní cesty k elektřině z fúze představují čínský koncept CFETR (*China Fusion Engineering Test Reactor*) o výkonu 312 MW_e, který je podobný evropskému reaktoru DEMO (oba mají magnety založené na klasické technologii nízkoteplotních supravodičů), a americký koncept ARC (*Affordable-Robust-Compact*) o výkonu 270 MW_e, jenž předpokládá použití vysokoteplotních supravodičů umožňujících zdvojnásobení magnetického pole a tím zmenšení rozměrů reaktoru.

Závěr

V západních zemích v současnosti jaderná energetika stagnuje, a to i přesto, že nabízí jasné a účinné řešení transformace energetiky k nízkoemisní výrobě elektřiny. Nízkoemisní energetika je přitom klíčová pro zpomalení změn klimatu. Hlavním důvodem této stagnace je strach veřejnosti z jaderných elektráren a v poslední době i neopodstatněná víra v neomezené možnosti solární a větrné energetiky. Koncept malých a mikromodulárních reaktorů může jadernou energetiku oživit na základě jejich vysoké pasivní bezpečnosti a snížených investičních rizik. Nelze ale předpokládat jejich masové nasazení v hustě osídlených částech Evropy, a to včetně České republiky, kde má jaderná energetika širokou podporu.

V dlouhodobém horizontu je východiskem ze stagnace jaderné energetiky integrace fúzních elektráren. Díky své bezpečnosti a minimálnímu vlivu na životní prostředí by měly být pro veřejnost akceptovatelné. Omezený finanční rámec výzkumu jaderné fúze (který je například zhruba stokrát menší než finanční rámec výzkumu v automobilovém průmyslu) však nedává prostor pro výrazné urychlení finalizace fúzních elektráren. Pokud se tento stav nezmění, fúzní elektrárny se stanou významnou součástí energetiky až ke konci tohoto století.

Je to škoda, protože energetický mix založený na obnovitelných zdrojích rozmístěných v místech s vhodnými klimatickými podmínkami, malých modulárních reaktorech obsluhujících méně osídlená místa a fúzních reaktorech poskytujících vysoký bazový výkon v průmyslových oblastech bude vysoce efektivní.

Odkazy

<https://www.electricitymap.org/map>, 14. 1. 2021.

<https://www.powermag.com/nuclear-performance-improves-but-more-reactors-needed/>, 25. září 2019

<https://www.osel.cz/11541-jaderna-energetika-v-roce-2020.html>.

https://en.wikipedia.org/wiki/Akademik_Lomonosov, 14. 1. 2021.

<https://www.iter.org/>, 14. 1. 2021.

<https://www.euro-fusion.org/>, 14. 1. 2021.

Entler, S. et al., Approximation of the economy of fusion energy. *Energy* 152 (2018),

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218305395>, 14. 1. 2021.

Wagner, V., Fukušima I poté: *Cesta od havárie k rekonstrukci, důsledky a dopady pro Japonsko i svět*. Novela Bohemica, 2015.

Zhuang, G. et al., Progress of the CFETR design. *Nuclear Fusion* 59 (2019).

https://en.wikipedia.org/wiki/ARC_fusion_reactor, 14. 1. 2021.

Současný stav v oblasti malých modulárních reaktorů

Vladimír Wagner

V současné době se výrazně zintenzivnil zájem o malé modulární reaktory, které by mohly zajistit průnik jaderných zdrojů do decentrální výroby elektřiny a teplárenství. Zároveň by mohly přispět k optimalizaci financování a snížit rizika pro investory. Zatím se takové reaktory využívají pouze pro specifické účely, jako příklad může sloužit nedávno spuštěná plovoucí jaderná elektrárna Akademik Lomonosov. Ostatní projekty jsou zatím dominantně pouze na papíře. Zůstává tak stále velmi otevřená otázka, zda a v jakém rozsahu se tento segment jaderné energetiky rozvine.

Co jsou malé modulární reaktory?

Jako malé modulární reaktory SMR (*Small Modular Reactor*) se označují reaktory s elektrickým výkonem zhruba mezi 10 až 300 MWe. Obě hranice, tedy spodní ani horní, nejsou definovány úplně přesně. Pro horní hranici uvádí Mezinárodní agentura pro atomovou energii elektrický výkon 300 MWe a americké ministerstvo energetiky (DOE) pak tepelný výkon 1000 MWt. Tyto definice spolu zhruba souhlasí, tepelný výkon může být v dané kategorii podstatnější, protože se často uvažuje o malých reaktorech pro dodávky tepla nebo odsolování vody. Malé reaktory tedy mohou být docela velké. Reaktory u horní hranice nejsou tak daleko od výkonu reaktorů využívaných v Dukovanech. Definice dolní hranice je definována ještě méně přesně. Reaktory s menším elektrickým výkonem než zmíněných 10 MWe jsou označovány jako minireaktory nebo mikroreaktory.

Reaktory s takovým výkonem se stavěly již dříve. Budují se i dnes jako prototypy nebo demonstrační jednotky nových typů reaktorů. Postupem času se však hlavně z ekonomických důvodů přecházelo ke stále větším instalovaným výkonům. Náklady na instalovaný výkon a provoz rostou pomaleji než instalovaná kapacita reaktoru. V současnosti se však jako velká překážka rozvoje jaderné energetiky ukazují velké jednorázové investiční náklady, potřeba úvěru, a tedy cena peněz. Pokud by se podařilo realizovat malé modulární reaktory, daly by se tyto náklady v čase rozdělit. Úspory by se mohlo dosáhnout i v případě, že se budou malé modulární reaktory montovat na místě z relativně malého počtu velkých modulů vyráběných sériově v továrnách. Zároveň by malé jednotky umožnily pro jadernou energetiku otevřít oblast menších výkonů při výrobě elektřiny i teplárenství.

Zatím je nejdále cesta k využití těchto reaktorů ve specifických případech, jako jsou například plovoucí jaderné elektrárny, kde se jejich výhody oproti jiným řešením projeví nejvíce. Zde se uplatňují klasické reaktory, které byly vyvinuty například pro



Obr. 3 Umělecká představa malého modulárního reaktoru NuScale (zdroj: NuScale Power)

ledoborce. Ty patří k první skupině malých modulárních reaktorů ze dvou, jež by se mohly v budoucnu uplatnit. Do ní náleží klasické lehkovodní reaktory, tlakovodní nebo varné, které vycházejí ze známých standardně využívaných modelů.

Do druhé skupiny zahrnujeme úplně nové inovativní koncepty, většinou patřící ke IV. generaci. Zde jde často o snahu získat něco ve stylu dlouhodobé baterie. Celý reaktor by se v kompaktní formě dovezl na místo využití. V provozu bez výměny paliva by pak byl i násobně déle než deset let. Poté by se v celku odvezl pro výměnu paliva a zaměnil za jiný. Taková zařízení by umožňovala větší uplatnění i v klasických oblastech, jako je třeba teplárenství nebo decentralizovanější elektroenergetika. Zde je však vývoj většinou na úplném počátku. Prototypové realizace tak nejspíše vzniknou nejdříve až ve třicátých letech 21. století.

Proč by se měly realizovat?

Podívejme se podrobněji na problémy, které by tyto reaktory měly řešit, zda k tomu mají potenciál a zda je možné je využít. Největším problémem současné energetiky je skutečnost, že jde o velmi velkou počáteční investici. Tím, že velikost reaktorů z ekonomických důvodů značně vyrostla, je třeba pro jejich stavbu velká suma peněz. Investor si musí velkou část potřebné sumy půjčit, a celkové náklady tak značně ovlivňuje úrok z této sumy a potřebná doba splácení půjčky. Druhým problémem je, že

za současných podmínek existuje velké hlavně politické riziko předčasného zastavení stavby či využívání zdroje s velmi dlouhou životností. Vysoká je proto i cena pojištění této investice. Problémem je rovněž relativně malý počet staveb velkých bloků, který omezuje možnost sériové produkce. Malé modulární reaktory by se dominantně produkovaly v továrnách modulárním způsobem. To by pomohlo využít potenciál hromadné sériové produkce. Celkově by se tak zlepšily možnosti financování a dosáhlo by se optimálního finančního modelu.

Druhou oblastí, která by zlepšila postavení jaderných zdrojů, by byly malé decentralizované elektrárny a teplárny využívající malé modulární reaktory. Byly by blízko místa spotřeby a mohly by nahradit i lokální městské teplárny. V tomto případě je klíčové, aby se zajistila příslušná úroveň bezpečnosti, která by dovozovala úměrně nižší nároky pro obdržení licence.

Projekty malých modulárních reaktorů

V současné době se zájem o malé modulární reaktory SMR zintenzivnil. Projekty jsou však většinou pouze na papíře. U některých se nicméně už začalo s licencováním a hledáním umístění prvních prototypových staveb. Několik se dokonce buduje



Obř. 4 Plovoucí jaderná elektrárna Akademik Lomonosov (zdroj: Rosenergoatom)

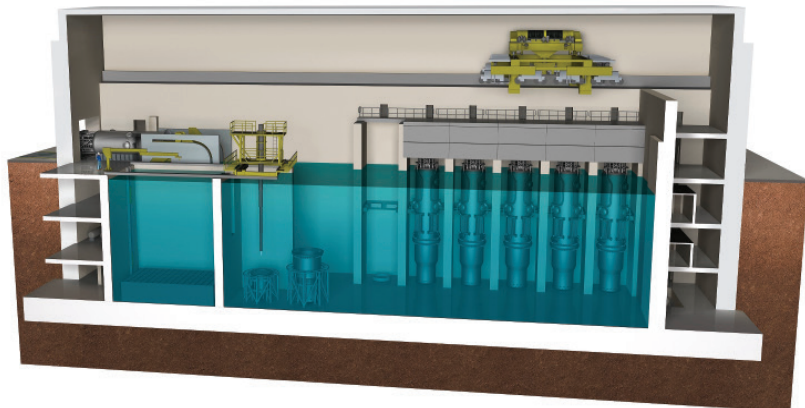
a dostává do provozu. V tomto případě jde ale většinou o reaktory pro specifické účely. Jak bylo zmíněno, lze projekty malých modulárních reaktorů rozdělit do dvou skupin. V první jsou reaktory odvozené z klasických velkých reaktorů, tedy nejčastěji tlakovodní reaktory. Do této skupiny patří i lehkovodní reaktory vyvinuté z těch, které se zatím využívají na lodích a ponorkách. Jejich příkladem může být projekt NuScale. Příkladem využití lodních reaktorů je pak již zmíněná plovoucí jaderná elektrárna Akademik Lomonosov. Tyto projekty mají největší šanci na brzkou realizaci. Je však otázka, jak to bude s jejich ekonomickou výhodností.

V druhé skupině jsou projekty inovativních reaktorů. Jedná se například o různé typy klasických i rychlých reaktorů využívajících k chlazení kapalné kovy nebo plyn. Příkladem takového malého modulárního reaktoru, který se dostává do provozu, je čínský vysokoteplotní reaktor chlazený plynem, jenž využívá kulové lože HTR-PM. Může však jít i o velmi pokročilé technologie. Příkladem velmi inovativního reaktoru je reaktor s postupnou vlnou firmy TerraPower nebo reaktory využívající tekuté palivo v podobě roztavených solí. Zde je však velkým problémem nastavení posuzování jadernými bezpečnostními orgány. S licencováním takových modelů pro civilní a komerční využití nejsou zkušenosti a pravidla se teprve musí vytvořit. Podívejme se na současný stav v obou skupinách.

Lehkovodní malé modulární reaktory

Malé varianty v současné době využívaných klasických lehkovodních reaktorů jsou nejbližší možnosti realizace i hromadnějšího zavedení. V roce 2019 byla dokončena a do provozu uvedena plovoucí jaderná elektrárna Akademik Lomonosov. Elektrárna začala dodávat elektřinu a teplo ve městě Pevek na severu Sibíře. Jde o jeden z mála projektů malých modulárních reaktorů uvedených do praxe. Po analýze zkušeností s jejím budováním a provozem připravuje Rosatom komerční nabídky do zahraničí. Zatím sice několik potenciálních zákazníků projevilo zájem, ale ke konkrétní objednávce ještě nedošlo.

V budoucnu by se na základě zkušeností s provozem měly postavit pokročilejší plovoucí elektrárny. Budou využívat nové reaktory RITM-200, které se instalují do nových ledoborců. Na rozdíl od reaktorů KLT-40S, které jsou v elektrárně Akademik Lomonosov, se u nich vyměňuje palivo jednou za 8 až 10 let místo jednou za 3,5 až 4 roky. To umožní, aby nebylo potřeba na palubě skladovat čerstvé a vyhořelé palivo. Po osmi letech se stejně musí plovoucí elektrárna dopravit do loděnice na generální revizi. Práce na vybudování dvou takových plovoucích jaderných elektráren pro Čukotku se už rozběhly. Hledají se možnosti, jak využívat tyto malé reaktory i na pevnině v Jakutsku a jinde na Dálném severu. V roce 2020 bylo rozhodnuto o umístění první této elektrárny právě v Jakutsku, v Ustjanské oblasti. Na pevnině i v podobě



Obr. 5 Elektrárna s několika NuScale moduly (zdroj: NuScale Power)

plovoucí elektrárny by je Rosatom chtěl nabízet i do zahraničí, takovou možnost zvažují Filipíny, Brazílie, Saúdská Arábie i jiné blízkovýchodní státy nebo Indie.

Na konkrétní realizaci malých modulárních reaktorů pracuje i Čína. V březnu 2019 začaly přípravy k výstavbě malého modulárního reaktoru ACP100 studií environmentálních dopadů stavby v elektrárně Čchang-tiang (Changjiang), kde jsou již dva bloky CNP600. Jde o zmenšenou variantu tlakovodního reaktoru ACP1000. Někdy se tento projekt označuje jako Linglong One. Bude mít pouze 56 palivových souborů, systémy pasivní bezpečnosti a umístěn bude do podzemí. Reálný start projektu byl vyhlášen v červenci 2020.

V březnu 2019 byl také v Číně podepsán kontrakt na stavbu prvního demonstračního bloku jaderné teplárny ve městě Paj-šan (Baishan). Využil by se bazénový nízkoteplotní reaktor DHR-400 (District Heating Reactor). Pokud by se osvědčil, šlo by o ideální náhradu fosilních zdrojů pro centrální vytápění.

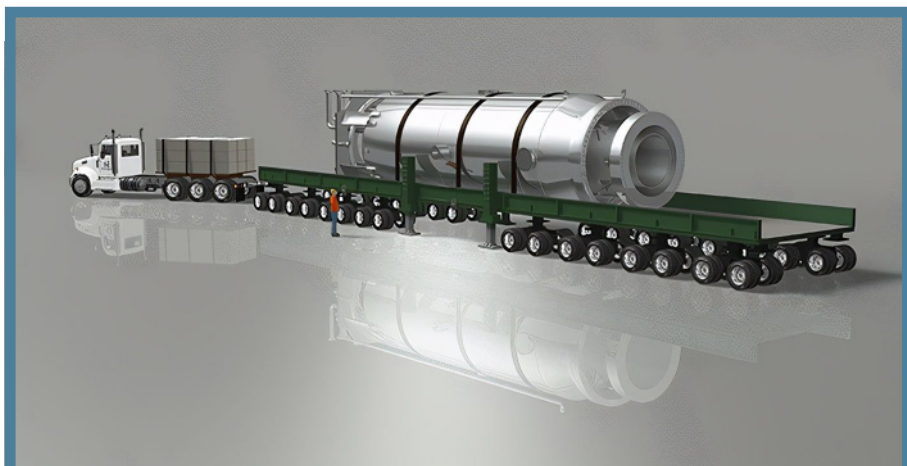
Jako příklad reaktoru z první skupiny, který je nejbližší realizaci v západních zemích, může sloužit americký projekt NuScale. Jde o malý modulární tlakovodní reaktor, který obsahuje aktivní zónu, kompenzátor objemu a parogenerátor uvnitř jednoduché nádoby fungující jako kontejnment. Jeden modul má tepelný výkon okolo 200 MWt a elektrický výkon mezi 50 až 60 MWe. Modul má 25 metrů na délku, 4,6 metru v průměru a váží 450 tun. Může se poskládat až 12 modulů dohromady. V tomto případě se dá celkově vyprodukovaný tepelný výkon přeměnit až na 720 MWe. Reaktor by se dal využívat i pro produkci tepla a odsolování.

Na vývoji palivových souborů využívajících kovový uran pro tento reaktor bude pracovat firma Enfission, která je společným podnikem firem Lightbridge Corporation a Framatome. Zatím se testovaly firmou Framatome upravené palivové soubory HTP2 využívající keramický oxid uraničitý. Oproti standardním palivovým souborům jsou kratší.

V září 2020 bylo dokončeno posouzení bezpečnostních parametrů reaktoru u amerického úřadu pro jadernou bezpečnost (NRC). Projekt dostal obecnou licenci. Ovšem konkrétní projekty budou muset žádat o licenci pro danou stavbu. První prototypová elektrárna s dvanácti moduly by se měla realizovat v INL (Idaho National Laboratory) v Idaho Falls. Její stavba se má zahájit v nejbližších letech. Do provozu by měla být uvedena v roce 2027. Předlicenční posouzení reaktoru bylo v roce 2019 zahájeno i v Kanadě.

O možnosti využití tohoto reaktoru uvažuje řada zemí, mezi nimi je například Kanada, Rumunsko, Jordánsko, Saúdská Arábie. Do spolupráce na vývoji a uplatnění reaktoru se zapojuje i jihokorejská firma Doosan Heavy Industry. Zájem o spolupráci na vývoji i využívání tohoto reaktoru má také ČEZ.

Podobně do této kategorie patří systém SMR-160 firmy Holtec. Spolupracují s ní další firmy, například společnosti Exelon, SNC-Lavalin a Mitsubishi Electric. Jde opět o tlakovodní reaktor s elektrickým výkonem 160 MWe, jehož všechny bezpečnostní systémy jsou pasivní bez pohyblivých částí. Chlazení může fungovat dlouhodobě bez zásahu člověka. Reaktor bude umístěn v podzemí. Dalším malým tlakovodním reaktorem je SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor), na kterém pracuje jihokorejská firma KHNP. Jde o reaktor s tepelným výkonem 330 MWt a elektrickým



Obr. 6 Reaktor NuScale při přepravě (zdroj: NuScale Power)

100 MWe. Posledním příkladem tlakovodního reaktoru je projekt firmy Rolls-Royce z Velké Británie. Velká Británie má velký zájem o využití jaderné energetiky při přechodu k nízkým emisím. Firma Rolls-Royce tak využije koncept svého reaktoru, který instaluje do ponorek a připraví koncept modulárního reaktoru s elektrickým výkonem 440 MWe. Tímto výkonem se však reaktor řadí spíše ke středním. Cílovým datem v tomto případě je pro spuštění prvních bloků rok 2029.

Jako příklad varného reaktoru může sloužit BWRX-300, který nabízí americko-japonská firma GE-Hitachi. Jde opět o modifikaci velkých klasických varných reaktorů této firmy na výkon 300 MWe. O výstavbu prvního bloku má zájem Estonsko i Polsko. Estonsko začalo v roce 2019 vybírat místo, kde by se u nich malý modulární reaktor postavil. Podle firmy měla být první studie k dispozici v roce 2021 a reaktor má být v druhé polovině dvacátých let. I s touto firmou předběžně jedná ČEZ o možné spolupráci.

Inovativní typy malých modulárních reaktorů

Dokončen je malý modulární reaktor HTR-PM v elektrárně Š'-tao-wan, který se nyní spouští. Jde o vysokoteplotní plynem chlazený reaktor s palivem ve tvaru koulí využívající uranové TRISO částice. K moderaci se v tomto případě využívá uhlík, který v kouli obklopuje zmíněné TRISO částice. Palivové koule se postupně kontinuálně vkládají do lože a vyhořelé odebírají. Chladicím plynem je v tomto případě helium. Celkový výkon dvou modulárních reaktorů s jednou společnou turbínou bude 210 MWe. Kromě elektřiny bude dodávat i průmyslové teplo s teplotou 750 °C. Umožní tak proniknutí jaderné energetiky i do této oblasti. Pracuje se rovněž na jeho větší variantě HTR-PM600.

Další projekty inovativních malých modulárních reaktorů jsou zatím pouze na papíře. Asi nejzajímavějším a nejznámějším případem je TerraPower Billa Gatese typu TWR (*Traveling Wave Reactor* – reaktor s postupnou vlnou). Mělo by jít o rychlý malý modulární reaktor chlazený sodíkem. Velmi vysoký stupeň vyhoření jaderného paliva by mu umožnil vydržet až 60 let bez výměny paliva. Palivo by totiž prohořívало postupně jako svíce. Mohl by se tak umístit pod zem. Je však nutné připomenout, že u tohoto reaktoru je třeba vyřešit celou řadu technologických výzev. Souvisí hlavně s odolností materiálů a celé technologie během extrémně dlouhého provozování bez zásahu zvenčí. Bill Gates plánoval výzkum reaktoru a jeho první realizace v Číně. To ovšem znemožnila obchodní válka mezi USA a Čínou. Otázka realizace projektu se tak stává značně nejistou.

Zatím nejdále je v této oblasti asi Kanada. Ta má svůj státní projekt podpory malých modulárních reaktorů nazvaný Cesty k malému kanadskému jadernému modulárnímu reaktoru (*Canadian Small Modular Reactor Roadmap*). Je to dáno tím, že zde jsou velké rozlohy s relativně malým osídlením a menší modulární zdroje by se pro ně velmi hodily. Výzkumná organizace Canadian Nuclear Laboratories (CNL) zároveň



Obr. 7 Příprava kulového paliva pro čínský malý modulární vysokoteplotní reaktor HTR-PM chlazený plynem (zdroj: CNI23)

v roce 2018 nabídla možnost vybudování pokusného jaderného reaktoru ve svých areálech. Reaktor by se tak měl postavit v areálu laboratoří Chalk River. Ozvalo se zhruba dvacet zájemců, z nichž zatím čtyři postoupili do druhého kola příprav. První z nich, firma Global First Power (GFP) již na konci března 2019 podala oficiální žádost o udělení licence pro stavbu a provoz malého jaderného reaktoru. Reaktor nese název MMR (*Micro Modular Reactor*). Je to vysokoteplotní plynem chlazený reaktor s tepelným výkonem 15 MWt a elektrickým 5 MWe. Další reaktor nabízí firma StarCore a jde o vysokoteplotní plynem chlazený reaktor s elektrickým výkonem 14 MWe. Třetí pak nabízí firma Terrestrial a jedná se o kompaktní reaktor využívající tekuté soli IMSR (*Integral Molten Salt Reactor*) s elektrickým výkonem 195 MWe. Čtvrtým se stal projekt U-Battery, jde opět o vysokoteplotní, plynem chlazený reaktor s elektrickým výkonem 4 MWe. Využívat by měl už zmíněné TRISO palivo. Dalším reaktorem v nabídce je kompaktním sodíkem chlazený rychlý reaktor využívající jako palivo kovový uran s označením ACR-100. Jeho výkon by měl být 100 MWe. Je naděje, že alespoň prototyp některého z nich se zrealizuje. Úřady pro jadernou bezpečnost USA a Kanady se dohodly, že při posuzování bezpečnosti některých z těchto projektů budou postupovat společně. Podrobněji o kanadských mikromodulárních reaktorech si přečtete ve speciální části.

České projekty

V Česku se v současné době pracuje nejméně na čtyřech projektech. Dva z nich jsou klasické reaktory opírající se o existující technologie reaktorů VVER.

Prvním z nich je systém, na kterém pracuje firma Witkowitz. Mělo by jít o malý modulární reaktor, jenž by v maximální míře využil stávající komponenty a technologie, čímž by se snížily nároky na vývoj i licencování. Šlo by o lehkovodní reaktor, který by měl aktivní zónu z palivových souborů využívaných v současných reaktorech VVER. Jejich počet by byl omezený tak, aby se celá aktivní zóna vešla do kontejneru podobného těm, jež se používají na uskladnění těchto vyhořelých palivových souborů. Aktivní zóna by se tak vyměňovala a přepravovala do elektrárny a z ní jako celek a palivové soubory v ní by se vyměňovaly v centrálním závodě. V bloku by byla místa pro dvě aktivní zóny. Po využití několik let v provozu by se aktivní zóna přesunula do spodní části, kde by chladla. Nad ní by se nasunula a spustila nová aktivní zóna. Po skončení využívání této další aktivní zóny by se starší odvezla a uvolnila pro ni místo. Samotný reaktor by tak nepotřeboval žádné zařízení pro výměnu paliva a jeho skladování. Výměna paliva v aktivní zóně by se realizovala pro velký počet reaktorů v centrálním závodě. Na reaktoru se před válkou spolupracovalo s Ukrajinou a o realizaci prvního prototypu se uvažovalo v černobylské zóně.

Dalším projektem je teplátor spojený s ČVUT. Jde o těžkovodní reaktor, kde se opět uvažuje o využití palivových souborů pro reaktory VVER. V tomto případě se předpokládá využívání čerstvých i vyhořelých palivových souborů. Použití vyhořelých souborů umožňuje právě využití těžké vody k moderaci. Těžký vodík méně pohlcuje neutrony a zlepšuje neutroniku systému. Využití vyhořelých článků sice může zlepšit ekonomii reaktoru, ale zároveň zvětšuje náročnost na licencování. Připomeňme, že v tomto případě nejde o reaktor k produkci elektřiny, ale čistě k produkci tepla. Mohl by tak být ideální náhradou uhelných tepláren, ale nemůže nahrazovat jaderné nebo uhelné elektrárny.

Další dva projekty patří k pokročilým systémům a na jejich vývoji pracuje společnost ÚJV, a. s., v Řeži. Prvním je projekt inovativního typu malého modulárního reaktoru vyvíjený dceřinou firmou této společnosti Centrum výzkumu Řež. Malý modulární reaktor se nazývá Energy Well. Zařízení vysoké sedm a půl metru bude možné přepravit na místo určení v běžném lodním kontejneru. Využíval by již zmíněné kulové palivo TRISO v uhlíkové matici s obohacením 15 procent. Uhlíková matrice slouží pro moderování neutronů. Jde o stejný typ paliva, který se využívá i v popsaných vysokoteplotních plynem chlazených reaktorech. Jako chladivo by se však v případě Energy Well využívaly tekuté soli FLiBe/NaBF₄. Pracoval by tak při atmosférickém tlaku a teplotách okolo 700 °C s přirozeným oběhem chladiva a s vysokou mírou pasivní bezpečnosti. Perioda výměny paliva má být sedm let. Jeho výkon by měl být 20 MWt. Projekt tohoto reaktoru čtvrté generace má být hotový zhruba za pět let. Výzkumem možnosti

využití tekutých solí pro chlazení reaktoru i v reaktorech s palivem ve formě tekutých solí s uranem či thoriem se kolegové z ÚJV, a. s., a CVŘ, s. r. o., zabývají už velmi dlouho.

Druhým projektem je pokročilý rychlý modulární reaktor chlazený plynem He-FASTo. Jeho tepelný výkon by měl být 200 MWt. Jednalo by se o vysokoteplotní reaktor a chladicím plynem by bylo helium. Pracovní teploty okolo 850 °C by umožnily využití v průmyslu a pro produkci vodíku. Opět by se využívaly pouze pasivní prvky bezpečnosti. Palivová kampaň by měla být pět let. Práce v režimu nemoderovaného rychlého reaktoru by navíc umožnila velmi efektivní využití paliva i využití recyklovaného vyhořelého paliva z klasických reaktorů. Při vývoji tohoto reaktoru využijí naši odborníci zkušenosti se zapojením do vývoje velkého vysokoteplotního reaktoru IV. generace chlazeného heliem Allegro.

Zatím jsou všechny čtyři projekty pouze na papíře a k případnému prvnímu prototypu mají ještě hodně daleko. Klasické reaktory by se díky co nejširšímu využití stávajících technologií mohly dostat do praxe dříve, ale i ony musí projít velice náročnou cestou licencování SÚJB. Ještě náročnější bude získání potřebných licencí u inovativních koncepcí. Prototypy lze realizovat ve specifických areálech, jako je třeba Jaderná elektrárna Temelín nebo zmíněná černobylská zóna. Pro konkurenceschopnost zařízení však bude klíčové nastavení podmínek pro obdržení licence sériových reaktorů v blízkosti sídel. V každém případě bude obrovským úspěchem, když se alespoň jeden z projektů dostane do stadia realizace prototypu. Pokud by se dokonce podařilo jej dotáhnout do stadia sériové produkce, bude to úspěch přímo fantastický.

Závěr

Jak je vidět i z tohoto přehledu, je okolo malých modulárních reaktorů v současnosti dosti značný ruch. Problém ovšem je, že zatím je to vše dominantně v oblasti vizí a papírových projektů. Realizace, které by byly ve stadiu výstavby, nebo se dokonce blížily k dokončení, lze spočítat na prstech a jsou pouze v Rusku a Číně. V těchto případech jde většinou o speciální využití pro oblasti, kde je možnost využití jiných zdrojů velmi omezená. Nevadí tak vyšší ekonomická náročnost.

Blíže zavedení do praxe jsou zmenšené verze klasických lehkovodních reaktorů. Jejich autoři většinou předpokládají, že umožní překonat problémy s financováním současných velkých reaktorů. Můj osobní názor je, že toto očekávání nemusí splnit. Finanční model závisí na cíli, se kterým se reaktor staví. Pokud je jejich cílem přechod na nízkoemisní energetiku a zajištění dlouhodobé stabilní dodávky elektřiny, je použitelný jiný finanční model než v případě, že zdroj buduje soukromý investor za účelem získání zisku v relativně krátkém čase.

V prvním případě, pokud je zajištěna politická a státní podpora, která radikálně sníží cenu pojištění a úvěrů a netlačí na rychlou návratnost, je cena produkované

elektřiny relativně velmi nízká. To, že se postupně přešlo ke stále větším blokům, nebylo náhodou. Pokud odhlédneme od nákladů financování, je větší blok efektivnější a cena vyrobené jednotky elektřiny nižší.

Ve druhém případě je vysoká cena financování a pojištění před riziky nedokončení například kvůli politickým vlivům. Zároveň je prioritou rychlá návratnost investic. Tam může mít rozdělení stavby do několika modulů, které se spouštějí postupně, i značný finanční efekt.

Podle mého názoru však malé modulární reaktory budou úspěšné, pokud proniknou do oblasti využití menších lokálních elektráren a tepláren. Případně, jako je tomu u vysokoteplotních reaktorů, do oblasti produkce průmyslového tepla. Důležitou podmínkou je realizace výroby továrním způsobem ve velkých sériích. Podmínkou také je, aby proces licencování u nich byl jednodušší, než je u velkých jaderných bloků. Kdy budou na trhu k dispozici komerční a konkurenceschopné modely, je tak pořád otázka.

Ještě naléhavější otázkou je proces licencování reaktorů v případě inovativních typů. Zde je většina projektů teprve ve fázi vývoje. Ve „vývoji“ jsou i regulatorní podmínky pro ně. Zde je možnost dostat se blízko koncepcie dlouhodobě fungující kompaktní „baterie“, která se vyměňuje jednou za mnoholeté období. To by mohlo přinést zlom v možnosti využití v decentralizované podobě i ekonomice. Zde však bude pravděpodobně potřeba na první komerční modely čekat mnohem déle. A zatím je zde obrovský prostor v oblasti vývoje a výzkumu.

Osobně si však myslím, že i při úspěšném zavedení malých modulárních reaktorů tyto nevytlačí velké reaktory III. generace. Oba typy se budou doplňovat a společně by v kombinaci s obnovitelnými zdroji a později i fúzními systémy měly přispět k přechodu k nízkoemisní společnosti.

Odkazy

<https://www.world-nuclear-news.org/>

<https://www.world-nuclear.org/>

<https://www.gen-4.org/gif/>

<https://www.atomic-energy.ru/>

<https://www.oecd-nea.org/>

<https://www.iaea.org/>

<https://www.nuscalepower.com/>

<https://www.terrapower.com/>

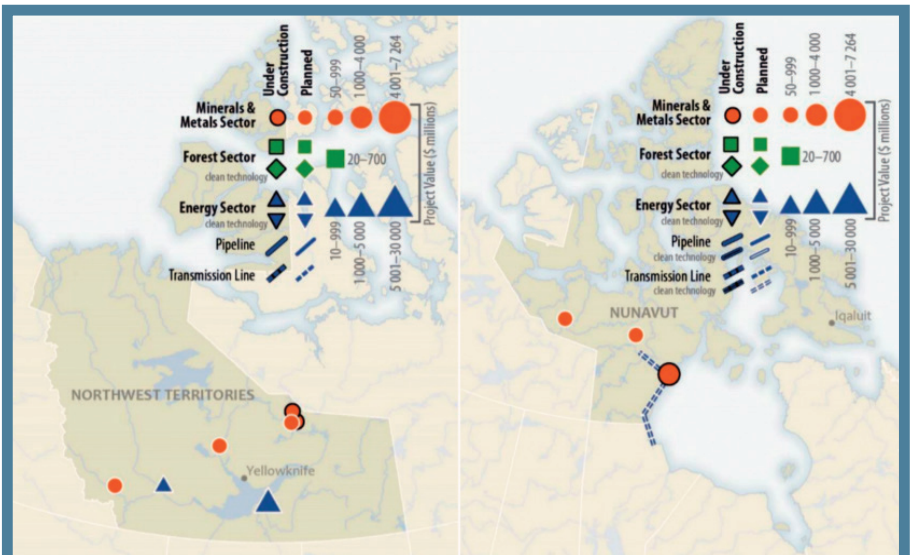
Potenciál mikromodulárních reaktorů pro odlehlé doly v Kanadě

Jan Syblík

Většina komunit v odlehlých oblastech světa není napojena na rozvod elektrické energie, a tudíž je odkázána na decentralizované zdroje energie, například na nejvíce rozšířené spalovací motory. Pro malé komunity čítající stovky až tisíce lidí je to jediné možné řešení, jak vyrábět elektrickou energii. Tento článek pojednává o možnosti nahrazení diesellových generátorů mikromodulárními jadernými reaktory v odlehlých kanadských dolech, což by s sebou přineslo snížení zátěže pro životní prostředí či snížení ceny provozu odlehlých dolů.

Odlehlé doly v Kanadě

Kanadský těžební průmysl se v některých oblastech podílí velkou měrou na jejich celkovém HDP. V teritoriích Nunavut nebo Northwest Territories se jedná



Obr. 8 Plánované projekty a projekty ve výstavbě v kanadských teritoriích Nunavut a Northwest Territories (zdroj: Natural Resources)

o přibližně 20 procent, respektive 30–40 procent. Nunavut je velmi řídké osídlenou oblastí, na 1877 tisících km² žije přibližně 40 tisíc lidí. Kvůli velmi nízké hustotě zalidnění zde není téměř žádná síť rozvodů elektrické energie. Výstavba a provoz dolů jsou různým způsobem napojeny na firmy, ve kterých mají většinový podíl původní obyvatelé Kanady. To zajišťuje místním lidem práci v dolech a v přidružených oblastech průmyslu, jako jsou dopravní infrastruktura, geologické průzkumy, technická podpora apod. Těžba v odlehlých dolech probíhá mnohdy desítky až stovky kilometrů od nejbližšího osídlení bez možnosti vybudování elektrické sítě, a proto se dieselové generátory využívají jako jediný stabilní a dostupný zdroj elektřiny.

S výrobou elektřiny spalovacími motory je provázána obtížná logistika vzhledem k velkému množství spotřebovaného paliva. Pro instalovaný výkon 1 MW činí roční spotřeba dieselového generátoru 2,6 milionu litrů paliva, přičemž doly v těchto oblastech spotřebovávají zhruba dvacetinásobek. Zároveň je nezbytné počítat s úniky paliva ve skladovacích nádržích do okolí, s náklady na dopravu paliva, což zahrnuje i údržbu celoročních silnic, a s rostoucí cenou provozu dieselových generátorů v závislosti na odlehlosti dolu. Po zahrnutí kapitálových, provozních a palivových nákladů je cena 1 MWh vyrobené pomocí dieselového generátoru 400–650 CAD. Rozptyl je dán různými cenami paliva v nejbližších komunitních centrech, odkud se nákladními vozy dováží na místo těžby.

Alternativní výroba elektřiny

Spalovací motory používané v klasických dolech představují velkou zátěž pro životní prostředí, ale i značnou finanční zátěž pro provozovatele. Z tohoto důvodu jsou kanadské odlehlé doly zajímavou variantou pro aplikaci alternativních zdrojů elektřiny.

Nunavut i North West Territories se nacházejí nad 60° zeměpisné šířky, kde panují extrémní klimatické podmínky, a proto je použití solárních panelů pro důlní účely nepřijatelné stejně jako využití geotermální energie.

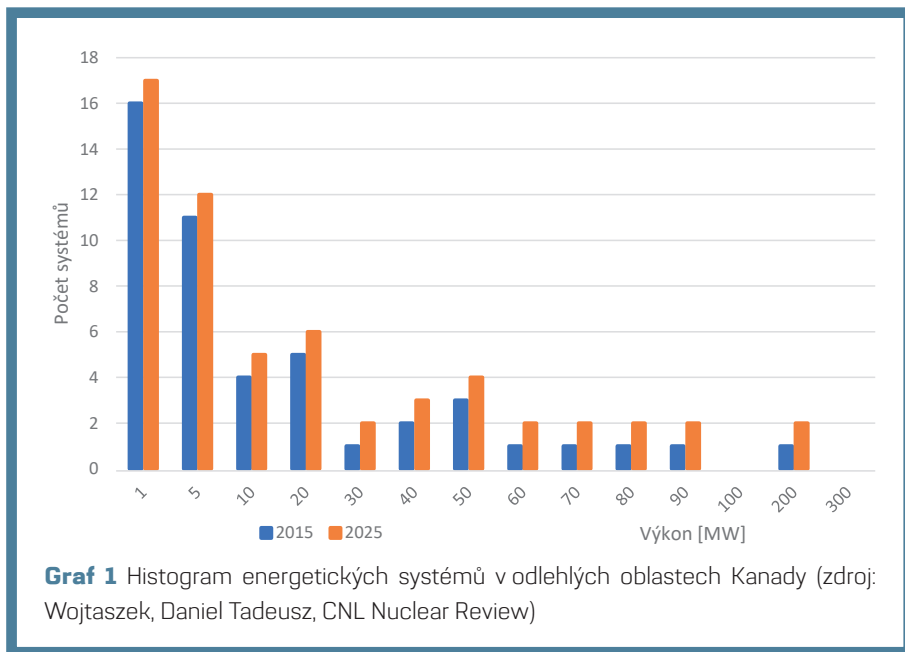
Konkurovat dieselovým generátorům v těchto oblastech se pokouší výrobci větrných turbín. První větrná farma byla postavena v diamantovém dole Diavik v North West Territories. V tomto dole s příkonem 22–26 MW se do roku 2012 vyráběla energie pouze z dieselových generátorů, avšak poté byly s investicí 31 milionů CAD postaveny čtyři větrné turbíny o celkové kapacitě 9,2 MW s pětinovým využitím v průběhu roku. Tato nízkoemisní výroba elektřiny tedy pokrývá kolem 8 procent výroby elektrické energie pro potřeby dolu. Životnost větrné turbíny je 20–25 let, což odpovídá průměrné životnosti dolu 15–20 let (bez zahrnutí rekultivačních prací a uzavírání dolu: cca 2 roky). Výhodou větrných farem je rychlá instalace zdrojů v řádu měsíců, nízké investiční náklady a nízkoemisní provoz. Bohužel, ani pro větrné turbíny zde není příznivé klima. Vítr má většinu času v roce teplotu –30 až –40 °C, tudíž je zapotřebí



Obr. 9 Diamantový důl Diavik (foto Joshua Zapf, Mining.com)

speciální rozmrazovací technologie pro lopatky větrných turbín. Protože se nejedná o stabilní zdroj elektrické energie, větrné turbíny je možné používat pouze jako doplněk k celkové spotřebě dolu, což dokazuje poměr vyrobené elektřiny vůči instalované kapacitě. Problémem zůstává vysoká nestabilita výroby elektřiny, a větrné farmy tak nejsou schopné pokrývat základní energetickou spotřebu dolů. V dolech musí být zdroj elektrické energie nezávislý na počasí a současně schopný okamžitě reagovat na změnu zatížení, k čemuž jsou dieselové generátory prozatím nejvhodnější řešení, a větrné turbíny tak mohou fungovat z logiky věci pouze jako doplněk k energetické spotřebě. Projevuje se zde stejný problém větrných elektráren, který známe z větrných parků jinde ve světě.

Další možností, a přitom také jedinou stabilní nízkoemisní výrobou elektřiny ze zatím zmiňovaných variant, jsou mikromodulární jaderné reaktory (μ MR, MMR). Tato zařízení jsou schopna zajistit základní zatížení v provozovaném dole nezávisle na povětrnostních podmínkách, bez nutnosti přepravy milionů tun ropy a při delších palivových cyklech také nezávisle na stavu komunikací.



Používání spalovacích motorů je výhodné zejména pro extrémní decentralizaci soustavy a dále také díky dostupnosti technologie a technologické vyzrálosti zařízení.

Mikromodulární reaktory

Mikromodulární reaktory jsou podskupinou malých jaderných reaktorů (SMR) s elektrickým výkonem do 10 MW_e. Roční zpráva Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA) o SMR zmiňuje celkem šest projektů μMR, vesměs ve fázi koncepčního návrhu. Do skupiny reaktorů vyrábějících elektřinu do 10 MWe patří také český projekt Energy Well, ruský lehkovodní reaktor ELENA s výkonem 68 kWe a lehkovodní ABV-6E s výkonem 6–9 MWe, který je jako jeden z mála na světě ve fázi finálního designu. Mezi mikroelektrárny patřila také první plovoucí jaderná elektrárna na světě MH-1A o výkonu 10 MWe.

Výhody μMR plynou z prohloubení výhod SMR, jejichž elektrický výkon je vyšší, až 300 MW_e. Jedná se hlavně o jednodušší logistiku při stavbě reaktoru díky malým rozměrům, přičemž důležitým faktorem je možnost transportu pomocí několika málo kamionů či lodních kontejnerů. Dále je to možnost pasivního chlazení aktivní

zóny využitím přirozené cirkulace chladiva, dlouhé doby palivových cyklů od 84 měsíců (Energy Well) až po optimistických 27 let (SEALER), možnost chlazení alternátoru vzduchem a nízké provozní náklady (podobně jako u velkých jaderných zdrojů) s možnostmi celkového ušetření až o třetinu oproti diesellovým generátorům.

Při menších rozměrech komponent jaderného reaktoru klesá výrobní cena jednotky i díky rozsáhlejší kompetitivnosti mezi dodavateli, kteří by se potenciálně ucházeli o zakázky. Menší rozměry zařízení tedy otevírají trh také drobnějším firmám, které dosud neměly se strojním zařízením pro jaderné reaktory zkušenosti. Současně se díky malým rozměrům oživuje i starší myšlenka provozu μ MR v podzemí. V případě zakopání reaktoru pod zem by se zvýšila bezpečnost systému vůči větrným hrozbám a teroristickým útokům. Zakrytí reaktoru pod zemský povrch by bylo lukrativní, jelikož by se čerpaly výhody právě z extrémně malého zastavěného povrchu. V takových případech však může být citelně snížen přístup k zařízení v době odstávkových prací nebo v případě havárie.

Nízký instalovaný výkon a kompaktnost rozšiřují možnosti použití takového reaktoru. Jsou jimi například mobilní pohonné jednotky při záchranných operacích, výletní lodě, jaderné „baterie“ či využití v kosmickém výzkumu. Nevýhodou určitých projektů μ MR je mimo jiné použití netradičních technologií zahrnutých do projektu a z toho plynoucí zdoluhavý proces designu (roztavené sole, superkritický CO_2 chladicí oběh atd.).

Spekulací v oblasti μ MR i SMR zůstává posouzení významu procesu učení, respektive možnost poučení se ze sériové výroby jaderných zařízení, což by mělo mít za následek zejména snižování investičních nákladů. Toho by mělo být docíleno zvýšením efektivity výroby. Za dobu rozvoje jaderné energetiky se výhody vyplývající z procesu učení ve složité ekonomii jaderného průmyslu neprojevíly. Prudký růst nákladů na výstavbu jaderných elektráren probíhal například v USA a využití



Obr. 10 Grafická vizualizace μ MR eVinci™ od firmy Westinghouse (zdroj: EnergyTech)

procesu učení nenastalo ani při výstavbě relativně standardizované francouzské flotily jaderných elektráren. Obecný předpoklad postupného snižování investičních nákladů může být proto u jaderné energetiky zavádějící, a není jasné, jakým způsobem se projeví v případě menších jaderných zdrojů.

Výhody použití μ MR v odlehlých dolech

Zdroj elektrické energie v odlehlých dolech bez přístupu k rozsáhlejší přenosové soustavě musí splňovat určitá specifika, která je možné najít i u μ MR. Zdroj má v první řadě poskytovat stabilní výkon nehledě na klimatické podmínky a přitom musí být schopný poskytovat plynulou regulaci podle potřeby sítě. Oproti větrným elektrárnám se v případě μ MR jedná o stabilní zdroj elektrické energie, který je schopen pokrýt základní zatížení potřebné k chodu důlní činnosti.

Dieselové generátory mají obvykle výkon 5 MW_e a jejich instalovaná kapacita bývá 180 procent projektové špičkové poptávky dolu, což dává konstruktérům μ MR otevřené možnosti v kombinaci zdrojů při nahrazování původních spalovacích motorů. Klasicky se dnes používají spalovací motory v režimu N+2, kde N generátorů splňuje poptávku mezi 80–85 procenty své jmenovité kapacity výroby, jeden je v pohotovostním režimu (režim rotující rezervy) a u jednoho se předpokládá možnost kdykoliv provést údržbu.

V této souvislosti by bylo vhodné regulovat μ MR podle aktuální potřeby sítě. V případě neregulovatelného μ MR musí být reaktor vždy doprovázen spolehlivým stabilním zdrojem, který je schopen reagovat na změnu frekvence sítě (např. diesellový generátor). Z tohoto důvodu je i pro regulovatelné μ MR obtížné nahradit spalovací motory v plné výši a s neregulovatelnými reaktory je to prakticky nemožné.

Výhoda μ MR pro tuto část trhu je především v tom, že se razantně omezí dodávky paliva. Tím se ušetří nejen na ceně paliva, jež je v případě jaderných zdrojů mnohem menší, ale také na údržbě silnic. V neposlední řadě se jaderné elektrárny počítají mezi zdroje s nízkoemisní výrobou elektřiny, které přispívají k ochraně životního prostředí. Potenciál snížení emisí skleníkových plynů se dá jednoduše ukázat u skupiny těžebních dolů Ring of Fire. Zde lze během 20 let zabránit spotřebě 962 milionů až 3 miliard litrů nafty a tím emisím ve výši 2,7 milionu až 8,3 milionu tun ekvivalentu CO₂.

Nakonec je zajímavé vzít v úvahu i celý proces výstavby dolu. Nejprve probíhá vyhledávání a předběžné průzkumy, jež určí, jestli je naleziště lukrativní. Dále pokračují detailnější průběžné průzkumy možných nalezišť a nakonec pokročilý průzkum, který zahrnuje data pro studii proveditelnosti. Tyto průzkumy mohou trvat sedm až deset let, což dává vhodný časový rámec pro přípravu prvních jednotek μ MR svého druhu na konkrétním místě.

Jaderná energetika v kanadské legislativě

Přístup Kanadského regulačního úřadu pro jadernou energii je komplexní a z velké části technologicky neutrální, to znamená, že umožňuje bezpečný provoz všech typů jaderných technologií zahrnujících SMR i μ MR.

Všechna jaderná zařízení jsou klasifikována jako jaderná zařízení třídy IA podle předpisů o jaderných zařízeních třídy I, což zahrnuje mimo jiné jaderné elektrárny nebo malé reaktory na výrobu energie či tepla pro průmyslové účely a malé reaktory pro neenergetické účely. Při regulaci μ MR proto může Kanadská komise pro jadernou bezpečnost (Canadian Nuclear Safety Commission) použít stejná kritéria, která se používají k regulaci tradičních jaderných reaktorů.

Zákon o použitém jaderném palivu (Nuclear Fuel Waste Act) vyžaduje, aby každý vlastník paliva zřídil svěřenecké fondy tak, aby bylo zajištěno, že je k dispozici bezpečné financování činností souvisejících s nakládáním s odpady. Organizace pro nakládání s jaderným odpadem (Nuclear Waste Management Organization) ve výročních zprávách uvádí zůstatek svěřeneckého fondu a množství odpadu pro každého vlastníka jaderného odpadu v Kanadě.

Závěr

Odlehlé doly v Kanadě představují zajímavou možnost implementace jaderných reaktorů nižších výkonů. Zařízení typu μ MR jsou schopná významně snížit zatížení pro životní prostředí díky své vlastní bezemisní výrobě elektřiny a tepla. Pomocí těchto jednotek je možné odlehčit velmi slabému logistickému propojení a snížit celkové náklady na provoz odlehlých dolů.

Potenciální využití mohou μ MR nacházet i v oblastech odlehlých komunit. Zde je možné použít μ MR jako teplárny nebo jako zdroje s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla. Tato varianta je však mnohem více závislá na veřejném mínění a vztahu domorodého obyvatelstva k jaderné energetice. Výsledkem by ale bylo výrazné snížení negativních vlivů provozu dolů na životní prostředí.

Názor původního obyvatelstva Kanady na jaderný průmysl je silně ovlivněn historickými událostmi podobně jako v Austrálii. V minulosti probíhala těžba uranu nešetřně kvůli zásahům do posvátného území. Dnešní pohled je však pozitivnější vzhledem k moderním technologiím těžby, lepší informovanosti, zavedení povinnosti těžebních společností komunikovat s obyvatelstvem a mimo jiné díky spolupráci vlády a původního obyvatelstva v otázkách územních nároků a významu určitých oblastí pro místní populaci.

Odkazy

- Socio-Economic Data. Mining North Works [online]. [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <http://miningnorthworks.com/statistics/>
- Gross Domestic Product. NWT Bureau of Statistics [online]. [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://www.statsnwt.ca/economy/gdp/>
- Kirby, Jessica, Diavik Diamond Mine powers up with wind. Canadian Mining & Energy [online]. 2014 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: https://www.miningandenergy.ca/sustainability/article/diavik_diamond_mine_turns_to_wind/
- Thomson, Jimmy, How can Canada's North get off diesel? The Narwhal [online]. 2019 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://thenarwhal.ca/how-canadas-north-get-off-diesel/>
- Burgess, Harry, et al., NI 43-101 Technical Report Feasibility Study McFaulds Lake Property Eagle's Nest Project James Bay Lowlands Ontario, Canada [online]. Noront Resources, 2012 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://norontresources.com/wp-content/uploads/2014/10/pdf/2%20Eagles%20Nest%20Project%20Feasibility%20Study.pdf>
- HATCH LTD. Ontario Ministry of Energy SMR Deployment Feasibility Study: Feasibility of Potential Development of Small Modular Reactors (SMRs) in Ontario [online]. Ministry of Energy, Northern Development and Mines, 2016 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://www.publications.gov.on.ca/ontario-ministry-of-energy-smr-deployment-feasibility-study-feasibility-of-potential-development-of-small-modular-reactors-smrs-in-ontario>
- Wyk, Liezl van. Diavik Diamond Mines Inc. Wind Farm Project. Energy and Mines [online]. 2013 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://energyandmines.com/wp-content/uploads/2014/08/liezlvanwyk.pdf>
- Bertoli, Chris. Diavik Wind Farm: Superintendent Electrical & Instrumentation. Senate of Canada [online]. 2015 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: https://sencanada.ca/content/sen/committee/412/ENEV/Briefs/2015-04-21_Presentation-DiavikWindFarm_e.pdf
- Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition [online]. International Atomic Energy Agency, 2020 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf
- Ingersoll, Daniel T. Small Modular Reactors: Nuclear Power Fad or Future? [online]. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2016, 210 s. [cit. 2021-02-26]. ISBN 978-0-08-100268-1.
- Morales Pedraza, Jorge. Small modular reactors for electricity generation. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-52215-9.
- Exploration and Mining Guide for Aboriginal Communities [online]. 2016, 210 s. [cit.

- 2021-02-26]. ISBN 978-1-100-21430-6. Dostupné z: <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/mineralsmetals/files/pdf/abor-auto/mining-guide-eng.pdf>
- Small modular reactors. Canadian Nuclear Safety Commission [online]. 2020 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: https://nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/research-reactors/other-reactor-facilities/small-modular-reactors.cfm#_CNSC's_involvement_withRegulating
- Wojtaszek, Daniel Tadeusz. Potential off-grid markets for SMRS in Canada. CNL Nuclear Review. 8(2): 87–96. <https://doi.org/10.12943/CNR.2017.00007>
- Jamasmie, Cecilia. Dominion Diamond sues partner in Diavik mine. The Northern Miner [online]. 2020 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.northernminer.com/news/dominion-diamond-sues-partner-in-diavik-mine/1003818173/>
- Topf, Andrew. NWT doles out exploration grants as diamond activity heats up. Mining.com [online]. 2020 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.mining.com/nwt-doles-out-exploration-grants-as-diamond-activity-heats-up-65568/>
- Natural Resources: Major Projects Planned or Under Construction – 2018 to 2028 [online]. Nunavut: Energy and Mines Ministers' Conference, 2018 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/emmc/pdf/2018/en/major-projects-planned-or-Under-Construction-2018-2028-eng.pdf>
- Canada taking stake in Westinghouse eVinci Nuclear Micro-Reactor as Carbon-free option for Industrial and Remote regions [online]. [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://www.energytech.com/home/article/21236613/canada-taking-stake-in-westinghouse-evinci-micronuclear-as-carbonfree-option-for-industrial-military-and-remote-regions>
- Zapf, Joshua. Mining.com. Diavik Diamond Mine. Mining.com [online]. [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://www.mining.com/diavik-diamond-mine/>

Seismické ohrožení jaderných elektráren - změny metodiky při zavedení SMR

Jiří Málek

Malé modulární reaktory (SMR) mají oproti současným reaktorům významné výhody. Avšak z hlediska jejich bezpečnosti je nutné řešit některé nové problémy. To platí i pro jejich odolnost vůči zemětřesení. Je třeba posoudit předem seismické ohrožení ve všech lokalitách, kde budou umístěny, a to si vyžádá změnu metodiky, jakou se seismické ohrožení nyní posuzuje.

Škody způsobené zemětřesením můžeme rozdělit na přímé a následné. Přímé škody vznikají v průběhu otřesů půdy, kdy dochází k poškození budov, mostů, silnic, železnic a další infrastruktury. Za významnější jsou ale často považovány následné škody, které vznikají v důsledku řetězu událostí, jež následují po zemětřesení. V minulých staletích bylo nejvíce následných škod způsobeno vlnami tsunami a požáry, což se stalo i při největším evropském zemětřesení v Lisabonu 1. listopadu 1755. Po zemětřesení vypukly rozsáhlé požáry kvůli nezajištěným topeništím. Lidé často utíkali směrem k moři, kde však byli smeteni obrovskou vlnou. Většina z odhadovaných 60 tisíc obětí tak byla způsobena právě požáry a ničivou silou vlny tsunami. Toto zemětřesení bylo impulzem pro vznik moderní seismologie jako vědní disciplíny, která by měla následky zemětřesení zmírnit a třeba i najít možnost, jak je zcela eliminovat. Také nejznámější zemětřesení na území USA v San Franciscu 18. dubna 1906 bylo následováno ničivými požáry, jež zničily celé čtvrti a zavinily podstatnou část ze 3000 lidských obětí. Město pak bylo zcela přestavěno s přihlédnutím k seismickému ohrožení. Přesto jsou obavy z opakování zemětřesení a následného požáru v tomto městě stále patrné.

V druhé polovině dvacátého století se přidalo k potenciálním následkům zemětřesení také nebezpečí úniku radioaktivity z jaderných elektráren. Konstrukce prvních jaderných elektráren toto nebezpečí zohledňovaly, avšak velmi nedostatečně. Přesto se dlouho dařilo tomuto nebezpečí unikat. Jako příklad můžeme uvést jadernou elektrárnu Kozloduj v Bulharsku, jež odolala silnému zemětřesení s epicentrem v oblasti Vrancea v Rumunsku, a to 4. března 1977. Při zemětřesení ve Spitaku v Arménii 7. prosince 1988 byla odstavena jaderná elektrárna v Mecamoru. Elektrárna otřesům odolala, přestože bylo při zemětřesení překročeno špičkové zrychlení, se kterým se původně při výstavbě elektrárny počítalo. K havárii jaderné elektrárny a úniku radioaktivity v důsledku zemětřesení a následné vlny tsunami došlo poprvé ve Fukušimě v Japonsku při zemětřesení v provincii Tóhoku dne 11. března 2011. Od té doby se věnuje seismickému ohrožení jaderných elektráren značná pozornost. Vzhledem k počtu jaderných elektráren a frekvenci silných zemětřesení v místech, kde jsou postaveny, je jen otázkou času, kdy bude některá elektrárna opět vystavena silnému zemětřesení.

Také v případě našich jaderných elektráren prošlo hodnocení jejich seismického ohrožení podstatnými změnami. První československá jaderná elektrárna v Jaslovských Bohunicích, kde byl první reaktor uveden do komerčního provozu v roce 1972, byla postavena v lokalitě, která je z dnešního pohledu na seismické ohrožení považována za zcela nevhodnou. Nachází se v těsné blízkosti seismické zóny Malé Karpaty, kde v minulosti došlo k poměrně silným zemětřesením. Navíc je postavena v údolí řeky Váhu na neogenních sedimentech, jež mohou amplitudy seismických vln za určitých podmínek zesilovat. Lokální seismická síť, která poskytla údaje o seismicitě lokality, byla vybudována až po dokončení prvního bloku elektrárny. Teprve tato dodatečná měření a další provedené výpočty umožnily správně stanovit seismické ohrožení v tomto místě. Ani v případě jaderné elektrárny Dukovany, spuštěné v roce 1985, v době uvedení do provozu nebyla k dispozici všechna seismická měření, která se dnes vyžadují. Tato elektrárna je naštěstí situována v seismicky klidné oblasti, jak prokázaly pozdější výzkumy, jež však byly provedeny až v nedávné době, dlouho po uvedení elektrárny do provozu. Dosud se diskutuje o metodice výpočtu seismického ohrožení od zemětřesení ve východních Alpách, od kterých se šíří vlny směrem k elektrárně Dukovany s malým útlumem (Málek et al., 2017). V oblasti s velmi malou seismicitou se nachází také novější Jaderná elektrárna Temelín, kde byl reaktor poprvé spuštěn v roce 2000. I když odhad seismického ohrožení v tomto případě byl proveden již před spuštěním elektrárny, v pozdější době se prováděly další seismologické výzkumy, jež zohledňovaly nový vývoj v metodice stanovení seismického ohrožení. Tyto dodatečné studie potvrdily malé seismické ohrožení. Otázkou však zůstává, co by se dělo v opačném případě, tedy pokud by se zjistilo, že elektrárna je ohrožena zemětřesením. Dodatečné antiseismické úpravy elektrárny by byly velmi drahé.

Tyto příklady z praxe ukazují na možné problémy se zohledněním seismického ohrožení při širším praktickém uplatnění SMR. Jestliže se v minulosti v některých případech nedařilo provést včas posouzení seismického ohrožení pro relativně malý počet jaderných elektráren, dají se čekat ještě větší problémy při posuzování mnoha lokalit pro umístění SMR. Přitom mnohé z nich by mohly být umístěny v blízkosti velkých měst, aby je bylo možno efektivně využít i pro teplárenské účely. I malý únik radioaktivity v důsledku zemětřesení by tak mohl znamenat velkou katastrofu.

Pro Českou republiku se jeví jako nejlepší řešení provést zhodnocení seismického ohrožení plošně pro celé území, a to ve kvalitě, jež by vyhovovala mezinárodním standardům pro umísťování jaderných zařízení. V roce 2020 v Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i., započal projekt podporovaný TA ČR, který by měl v horizontu několika let vytvořit mapu seismického ohrožení ČR v potřebné kvalitě. Toho však nelze dosáhnout pouze metodami, jež se v ČR dosud používaly. Mezinárodním standardem je aplikace pravděpodobnostní metody výpočtu seismického ohrožení. Pro běžné budovy se vytváří mapa, která udává 10procentní pravděpodobnost

překročení špičkového zrychlení při zemětřesení během 50 let. Pro jaderná zařízení je to však zcela nedostatečné, protože nikdo jistě nechce riskovat, že elektrárna bude v příštích 50 letech poškozena zemětřesnou činností s 10procentní pravděpodobností. Uvažují se proto mnohem nižší pravděpodobnosti, což ovšem vyžaduje kvalitnější vstupní data a zdokonalené metody výpočtu.

Abychom dosáhli přijatelné míry rizika, musíme provést daleko detailnější seismologické průzkumy, jež se dosud v ČR neprováděly s výjimkou lokalit, kde stojí jaderné elektrárny. Jde především o výzkum mikrozemětřesení, která mapují seismicky nebezpečné zlomy. Protože naše území leží uvnitř tektonické desky, může se velké zemětřesení na takových zlomech vyskytnout po velmi dlouhé době, jednou za mnoho tisíc let. Proto poslední velké zemětřesení u nás nikdo nepamatuje a nelze najít o něm zmínky ani v nejstarších kronikách. V mezidobí mezi velkými zemětřeseními se na těchto zlomech vyskytují pouze mikrozemětřesení. Je tedy velmi důležité mikrozemětřesení zaznamenávat, zkoumat a zjistit tak seismický režim na zlomu.



Obr. 11 Digitální model viklanu na Medvědí stezce, který slouží ke stanovení velikosti zemětřesení, jež se v tomto místě nevyskytlo během posledních několika tisíc let (zpracovala L. Sýkorová)

Dosud se však mikrozemětřesení studovala jen v lokalitách současných jaderných elektráren a v několika dalších oblastech, například na Chebsku a v Jeseníkách.

Jako další příklad nově uplatňovaných metod můžeme uvést výzkum nestabilních skalních útvarů, viklanů, skalních hřibů, pískovcových věží nebo skalních bran (Zábránová et al., 2020). Tyto útvary existují již mnoho tisíc let, a byly tedy vystaveny všem zemětřesením, která zde proběhla. Pokud stanovíme výpočtem parametry potenciálního zemětřesení, jež by způsobilo destrukci skalního útvaru, můžeme si být jisti, že takové zemětřesení se během existence skalního útvaru nevyskytlo. A pokud se takto velké zemětřesení nevyskytlo v minulosti, je poměrně velká pravděpodobnost, že se nevyskytne ani v blízké budoucnosti, protože seismologie obvykle považuje seismický režim za stacionární. Na **obrázku 11** je příklad digitálního modelu nestabilního skalního útvaru, který byl vytvořen pro účely numerické simulace účinků zemětřesení. Jedná se o viklan, jenž se nachází na Medvědí stezce v Jeleních vrších blízko lipenské přehradě na Šumavě. Je tak umístěn na trase, po které se šíří seismické vlny od alpských zemětřesení směrem k Jaderné elektrárně Temelín. Protože alpská zemětřesení přispívají značnou měrou k seismickému ohrožení Temelína, je existence tohoto viklanu velmi důležitá s ohledem na výše zmíněné poznatky. Pro ostatní místa v ČR jsou však důležité jiné skalní útvary, proto je třeba provést jejich systematický výzkum. Obdobně to platí i pro další metody uplatňované při stanovení seismického ohrožení.

Ve světě, v místech se silnou seismickou aktivitou, se často uplatňují při budování jaderných zařízení stavební antiseismické prvky, jako jsou aktivní vyrovnávací kyvadla, tlumiče vibrací pod základovou deskou atd. Jako příklad může sloužit výstavba experimentálního termonukleárního reaktoru ITER ve Francii. Přestože ve fúzních elektrárnách, které jsou budoucností jaderné energetiky, nehrozí únik radioaktivity, bylo by jejich poškození při zemětřesení obrovskou finanční ztrátou. Při uvažované výstavbě SMR v České republice by však uplatnění antiseismických stavebních prvků značně prodražilo jejich instalaci. Proto se jako ekonomičtější varianta jeví výstavba bez těchto antiseismických prvků, ovšem v místech s malým seismickým ohrožením.

Odkazy

- Málek, J., Brokešová, J., Vackář, J., Mid-European seismic attenuation anomaly. *Tectonophysics*, 2017, roč. 712–713, s. 557–577, DOI: 10.1016/j.tecto.2017.06.003.
- Zábránová, E., Matyska, C., Stemberk, J., Málek, J., Eigenoscillations and Stability of Rocking Stones: The Case Study of The Hus Pulpit" in The Central Bohemian Pluton, *Pure Appl. Geophys.*, 2020, 177 (5), s. 1907–1916.

Malé modulární reaktory pohledem veřejného mínění

Martin Ďurd'ovič

Téma jaderné energetiky se v příštích letech přesune do centra veřejné diskuse. Tento vývoj loni předznamenal dění kolem připravované výstavby nového bloku Jaderné elektrárny Dukovany a kolem snížení počtu zvažovaných lokalit k umístění hlubinného úložiště v ČR na čtyři. Politické postoje k jádru střední Evropu rozdělují: státy V4 jádro vnímají jako součást přechodu k nízkoemisní energetice, Německo a Rakousko naopak energetickou budoucnost spatřují mimo jádro. Oba protikladné vlivy působí rovněž v české diskusi o jádru. Do té v uplynulé dekádě pozvolna vstupuje také alternativa využít k výrobě energie tzv. malé modulární reaktory.

Proměny jaderné energetiky jsou zasazeny do sociálních procesů. Proto je opodstatněné nevynechat při studiu jaderné energetiky sociálně- a humanitněvědní perspektivu. Na poli evropského výzkumu reprezentuje tuto perspektivu mezinárodní platforma Social Sciences and Humanities in Ionizing Radiation Research.¹ V ČR je téma Sociální aspekty jaderné energetiky, které řeší Sociologický ústav AV ČR, v. v. i., součástí výzkumného programu AV21 *Systémy pro jadernou energetiku*.² Díky zapojení do programu bylo v červnu 2020 realizováno dotazníkové šetření na reprezentativním vzorku populace ČR (1013 respondentů ve věku 15+), jež se zaměřilo právě na malé modulární reaktory.³ Protože přinejmenším ve středoevropském měřítku je podobný výzkum pionýrským počinem, byla výsledná výzkumná zpráva přeložena také do angličtiny.⁴

Podobně jako v případě jiných výzkumů veřejného mínění na specializovaná odborná témata (před dvěma lety proběhl např. výzkum znalosti a hodnocení jaderné fúze)⁵ byl podíl těch, kdo někdy slyšeli o technologii malých modulárních reaktorů, relativně malý: kladně odpovědělo 18 procent dotázaných. Při interpretaci výsledných dat je proto třeba brát v potaz, že ostatní respondenti se o existenci technologie malých modulárních reaktorů dozvěděli teprve v okamžiku dotazování.

¹ <https://www.ssh-share.eu/>

² <https://www.avcr.cz/cs/strategie/vyzkumne-programy/prehled-programu/2.-systemy-pro-jadernou-energetiku>

³ <https://cvvm.soc.cas.cz/cz/tiskove-zpravy/ostatni/ekologie/5335-verejnost-o-malych-modularnich-reaktorech-cerven-2020>

⁴ <https://cvvm.soc.cas.cz/en/press-releases/other/ecology/5336-czech-public-opinion-on-small-modular-reactors-june-2020>

⁵ <https://cvvm.soc.cas.cz/cz/tiskove-zpravy/ostatni/ekologie/5003-znalost-a-hodnoceni-jaderne-fuze-kveten-2019>

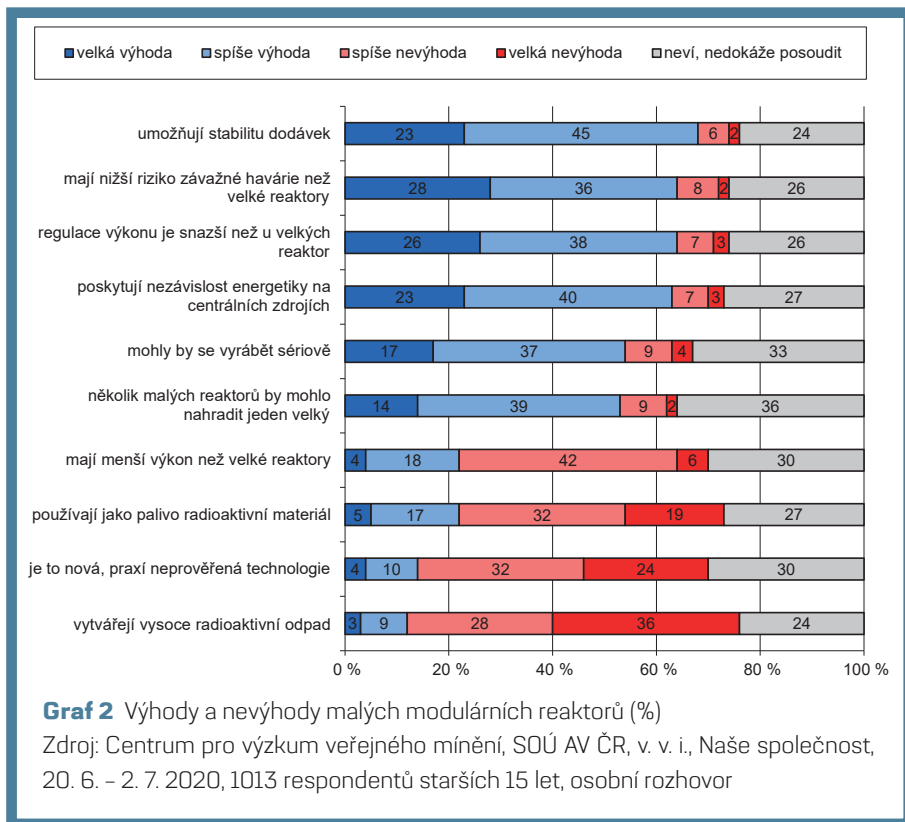
Téma spadá do širší oblasti výzkumu postojů české veřejnosti k jaderné energetice. Získaná data na jednu stranu odrážejí známý poznatek, že většina české populace se k jádru dlouhodobě staví vstřícně. V roce 2020 na otázku, jaký by měl být podíl jaderné energetiky na výrobě elektřiny, odpovědělo 31 procent dotázaných, že by se tento podíl měl zvyšovat, 37 procent se vyjádřilo, že by měl zůstat na současné úrovni, 21 procent se vyslovilo pro snižování podílu jádra a 11 procent uvedlo, že „neví“.⁶ Na druhou stranu jsou malé modulární reaktory v oblasti vnímání jaderné energetiky veřejností novým fenoménem. Jedná se zatím o technologii, která je záležitostí výzkumu a vývoje a konkrétní projekt pro stavbu na území ČR neexistuje. Otázky jsme proto zaměřili tak, abychom vedle vlastností, jež sdílejí se současnými reaktory, zjistili názory respondentů na specifické charakteristiky malých modulárních reaktorů. Výsledkem je empiricky podložená informace o tom, jak se k myšlence malých modulárních reaktorů a jejímu uplatnění v praxi staví laická veřejnost ČR.

Hlavní baterie otázek, jak ji prezentuje **graf 2**, zjišťovala formou deseti výroků názory na různé vlastnosti malých modulárních reaktorů. Úkolem respondentů bylo u každého výroku odpovědět, zda dotýčnou vlastnost pokládají za výhodu, nebo za nevýhodu, případně měli možnost se uchýlit k odpovědi „neví, nedokáže posoudit“ (tato možnost byla tazatelem aktivně nabízena, tj. předčítána).

Jako hlavní výhoda malých modulárních reaktorů je vnímána stabilita dodávek (68 %). Tuto vlastnost sdílejí s velkými reaktory. Ze specifických vlastností se jako výrazné výhody jeví nižší riziko závažné havárie než u velkých reaktorů (64 %), snazší regulace výkonu než u velkých reaktorů (64 %) a skutečnost, že by malé modulární reaktory posílily nezávislost energetiky na centrálních zdrojích (63 %). Za komparativní výhody je považováno také to, že by se malé modulární reaktory mohly vyrábět sériově (54 %) a že by několik malých reaktorů mohlo nahradit jeden velký (53 %). U těchto dvou výroků zároveň pozorujeme vyšší procento (33 %, resp. 36 %) těch, kdo se necítili kompetentní zaujmout názorové stanovisko.

Dolní část tabulky viditelně vyčleňuje čtyři výroky popisující nepříznivě vnímané vlastnosti. Jako nevýhody se lidem jeví relativně menší výkon malých modulárních reaktorů (48 %) a to, že jde o novou, praxí neprověřenou technologii (56 %). Malé modulární reaktory mimo to zůstávají zatíženy klasickými problémy jaderné energetiky. Lidé pokládají za výraznou nevýhodu jak skutečnost, že tyto reaktory používají jako palivo radioaktivní materiál (51 %), tak především to, že vytvářejí určité množství vysoce radioaktivního odpadu (64 %). Za zmínku nicméně stojí, že ve skupině dotázaných, kteří se v oblasti technických a fyzikálních principů fungování jaderné elektrárny považují za odborníky (1%) nebo mají pokročilé znalosti (10 %), jsou naopak

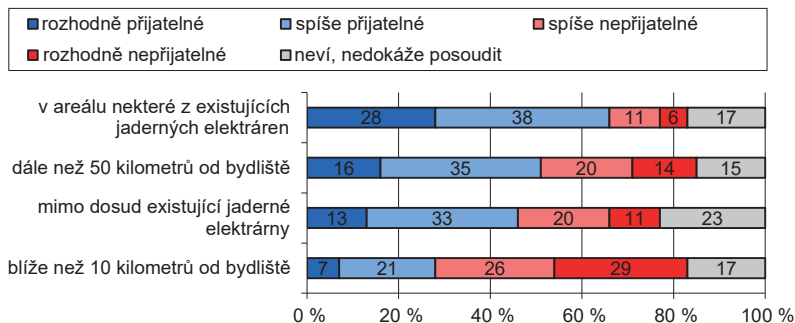
⁶ <https://cvvm.soc.cas.cz/cz/tiskove-zpravy/ostatni/ekologie/5331-verejnost-o-jaderné-energetice-cerven-2020>



malý výkon modulárních reaktorů a novost technologie statisticky častěji hodnoceny jako výhody.

Technologie malých modulárních reaktorů nastoluje otázky týkající se sociální přijatelnosti případného umístění takového zařízení. **Graf 3** prezentuje výsledky odpovědí na otázku, v níž jsme zjišťovali, nakolik přijatelné či nepřijatelné jsou pro respondenty různé varianty umístění. Hypotetickou výstavbu malého modulárního reaktoru v areálu některé ze dvou jaderných elektráren v ČR by na základě získaných odpovědí akceptovaly asi dvě třetiny populace (66 %). Výstavba mimo jaderné elektrárny by byla přijatelná pro 46 procent dotázaných, zatímco pro 31 procent by byla nepřijatelná, zbytek tvoří odpovědi „neví“.

Názor na přijatelnost výstavby mimo existující jaderné elektrárny nabývá zřetelnější kontury ve zbývajících dvou variantách, kde je umístění reaktoru uvedeno



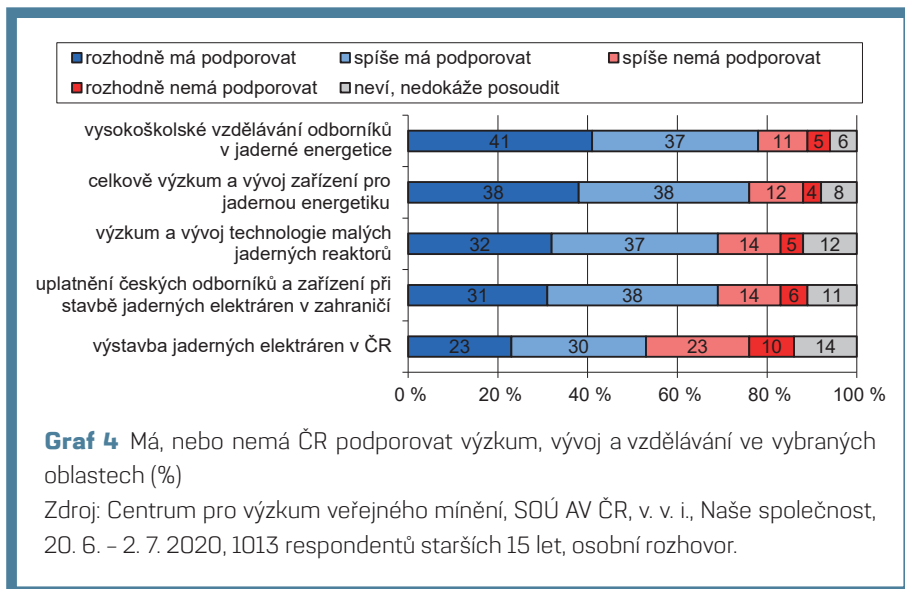
Graf 3 Přijatelnost či nepřijatelnost výstavby malých jaderných reaktorů (%)

Zdroj: Centrum pro výzkum veřejného mínění, SOÚ AV ČR, v. v. i., Naše společnost, 20. 6. – 2. 7. 2020, 1013 respondentů starších 15 let, osobní rozhovor

do vztahu k bydlišti respondenta. Výstavbu malého modulárního reaktoru ve vzdálenosti dále než 50 kilometrů od místa bydliště by akceptovala zhruba polovina populace (51 %). Při interpretaci tohoto údaje je ovšem na místě opatrnost. Vzhledem k hustotě zalidnění na území ČR by se v případě výstavby část populace vždy nacházela ve vzdálenosti blíže než 50 kilometrů. Nezávazně deklarovanou přijatelnost v dotazníkovém šetření navíc nelze ztotožnit s faktickou přijatelností. Ta by se odvíjela od konkrétního projektu umístění a byla by provázána svébytnou dynamikou názorové diferenciací, prosazování zájmů, lokální opozice apod. Podobnou dynamiku v současnosti vykazují třeba procesy komunikace související s hledáním místa pro výstavbu hlubinného úložiště jaderného odpadu v ČR.

Že je blízkost jaderného zařízení a lidských sídel citlivou záležitostí, dokládají odpovědi na dílčí otázku, zda by respondenti souhlasili s výstavbou malého jaderného reaktoru ve městě s možností jeho využití jako teplárny. S takovým umístěním by souhlasila asi čtvrtina populace (27 %), zhruba polovina by nesouhlasila (52 %) a zbytek neví.

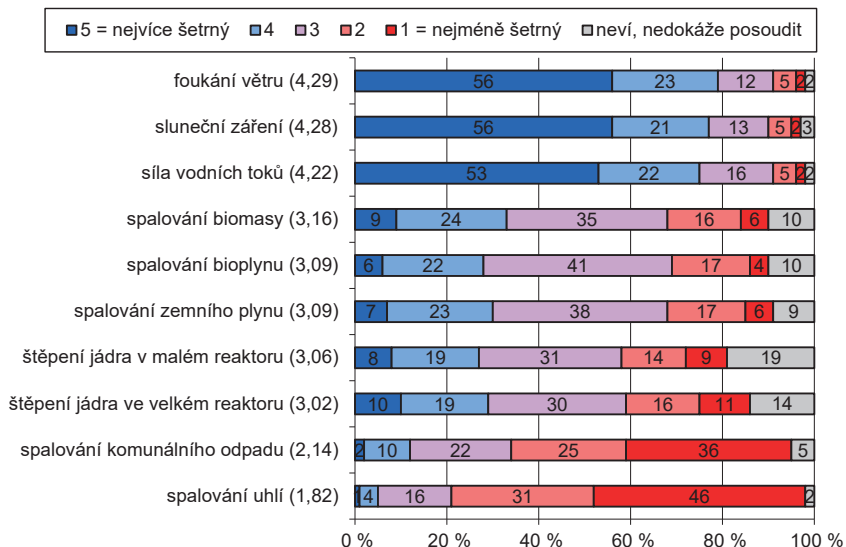
Jak je zřejmé z **grafu 4**, nehledě na problematiku případného umístování převažuje v české veřejnosti mínění, že výzkum a vývoj technologie malých jaderných reaktorů si zaslouhují podporu (69 %). V širším kontextu, jak jej graf načrtává, jde o informaci, která souzní s celkovou podporou výzkumu, vývoje a vzdělávání v oblasti jaderné energetiky. Z grafu lze vyčíst, že určitá část veřejnosti – zhruba 16 a více procent – podporu schvaluje, přestože si není jista tím, zda výzkum, vývoj a vzdělávání mají vyústit do výstavby jaderné elektrárny v ČR.



Trend vývoje energetiky nejen ve středoevropském prostoru obecně směřuje k většímu využití obnovitelných zdrojů a ke snižování podílu uhelné energetiky v energetickém mixu. Debaty o energetice v tomto ohledu úzce souvisejí s otázkami ochrany životního prostředí a s problémem změny klimatu, jež jsou také pravidelným předmětem výzkumů veřejného mínění.⁷

Navzdory většinové podpoře, které se v ČR těší, nelze říct, že by jaderné reaktory v očích české veřejnosti byly synonymem šetrnosti vůči životnímu prostředí. Poslední graf 5 na základě jiné otázky dotazníku nabízí srovnání různých zdrojů energie vzhledem k tomu, zda je respondenti považují za šetrné, nebo nešetrné vůči životnímu prostředí. Jaderná energetika tu figuruje až na spodních místech žebříčku v závěsu za spalováním zemního plynu. Data přitom naznačují, že myšlenka štěpení jádra v malém reaktoru evokuje představu mírně šetrnějšího zdroje než klasické štěpení ve velkých reaktorech.

⁷ <https://cvvm.soc.cas.cz/tiskove-zpravy/ostatni/ekologie/5251-hodnoceni-ochrany-zivotniho-prostredi-cerven-2020>
<https://cvvm.soc.cas.cz/tiskove-zpravy/ostatni/vztahy-a-zivotni-postoje/5253-postoje-ceske-verejnosti-ke-zmene-klimatu-na-zemi-cerven-2020>



Graf 5 Hodnocení šetrnosti a nešetrnosti k životnímu prostředí u různých zdrojů energie (%)

Zdroj: Centrum pro výzkum veřejného mínění, SOÚ AV ČR, v. v. i., Naše společnost, 20. 6. – 2. 7. 2020, 1013 respondentů starších 15 let, osobní rozhovor

Green Deal a role jaderné energetiky v ČR

Jan Horáček, Slavomír Entler

V roce 2017 Česká republika přistoupila k Pařížské dohodě o změně klimatu, která požaduje zcela dekarbonizovat ekonomiku do roku 2050. Některé země s vhodnou geografickou polohou mohou mít energetický mix dominantně založený na obnovitelných zdrojích energie (OZE). Česká republika k nim ale nepatří kvůli klimatickým podmínkám vnitrozemského státu v hustě osídleném středu Evropy s omezenými možnostmi akumulace energie. Proto ani z hlediska ochrany životního prostředí, ani z ekonomického hlediska není efektivní postavit energetiku ČR na OZE jako na hlavním zdroji elektrické energie.

Analýza statistických dat o spotřebě a výrobě elektřiny [1] pomocí matematického modelu energetických mixů [2] ukazuje, že po odstavení všech uhelných i jaderných elektráren hrozí ČR v obdobích zimní inverze (zamračené bezvětří) a v zimních nocích nepravidelné výpadky elektrické sítě (blackouty), přestože bychom vysokou investicí 4 bilionů Kč navýšili 25× aktuální výkon solárních fotovoltaických elektráren (FTE), 99× aktuální výkon větrných elektráren (VTE) a nainstalovali baterie za 1 bilion Kč. Kvůli podobné skladbě energetiky v okolních zemích nebude možné za nepříznivého počasí využít import energie a museli bychom proto až 4x navýšit výkon plynových elektráren, které by sloužily jako záskok při poklesu výkonu FTE a VTE (více scénář 96% OZE).

Kromě vysokých investic při výstavbě OZE a nezbytnosti záskokových fosilních plynových elektráren je potřeba vzít v úvahu také náklady na likvidaci materiálů po ukončení provozu OZE. Kvůli nízké hustotě toku energie spotřebují OZE o několik řádů více konstrukčních materiálů než jiné elektrárny o stejné roční produkci elektřiny a jejich životnost je mnohem kratší. V rámci cirkulární ekonomiky by bylo nezbytné recyklovat vysoké množství odpadu, každý den zhruba 1200 tun fotovoltaických panelů a 1 větrnou elektrárnu o výšce 100 m [3].

Významně racionálnější je scénář Státní energetické koncepce posilující roli jaderných elektráren, které jsou prakticky bez emisí skleníkových plynů. Tento scénář umožní efektivně využívat několikanásobně vyšší výkon OZE a vede k soběstačnosti ČR ve výrobě elektřiny. Dalším rozvojem scénáře bychom snížili uhlíkovou stopu elektroenergetiky až 9× oproti dnešku a splnili bychom cíl klimatické dohody EU Green Deal (scénář 62% jádro + 35% OZE).

Výsledky prezentované v této stati byly získány pomocí matematického modelu Energetika.m v prostředí Octave, který je volně dostupný pro všechny zájemce [2]. Uvedené hodnoty emisí jsou součtem hodnot emisí uvedených u každého zdroje podle přepočteního koeficientu analyzujícího celý životní uhlíkový cyklus energetických zdrojů podle [4]. Použité přepočtení koeficienty používá i ourworldindata.org

zařazený Oxfordskou univerzitou [5]. Ty, které se týkají úmrtnosti a materiálních škod v důsledku používání energetických zdrojů, vycházejí z celosvětové statistiky a jsou uvedeny v grafech.

Emise plynu jsou započítány včetně možných úniků metanu z těžby, transportu a skladování. Ačkoliv jsou emise ostatních polutantů (popílků, NO_x , SO_x) z plynu mnohem nižší než z uhlí, emise skleníkových plynů jsou menší jen o 40 procent. Pokud by docházelo k více než několika málo procentním únikům zemního plynu, mohou být ekvivalentní emise plynových zdrojů vyšší než u uhelných zdrojů, protože nespálený zemní plyn (především metan) má 25× silnější skleníkový efekt než zplodiny jeho spálení. Německo proto v lednu 2021 zavedlo na zemní plyn emisní povolenky 25 eur za tunu $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ a chce tento přístup k zemnímu plynu jako fosilnímu zdroji energie prosadit v celé Evropské unii.

Dekarbonizace elektroenergetiky

Česká republika přistoupila k Pařížské dohodě o změně klimatu, která požaduje zcela dekarbonizovat ekonomiku do roku 2050, což by za předpokladu, že totéž provede zbytek světa, stabilizovalo globální nárůst teploty na +1,5 °C vůči předindustriálnímu klimatu. Protože celosvětové emise navzdory půl století vyjednávání na mezinárodní úrovni stále rostou o 1,5 procenta ročně [6], je podle poslední zprávy IPCC 2021 [7] již nepravděpodobné udržení nárůstu teploty pod hranicí 2 °C.

Uhlíková stopa obyvatel ČR je jedna z největších na světě [6] a celkově dosahuje až 10 tun ekvivalentu $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /osobu/rok, což představuje dvojnásobek světového průměru. Česká republika má nejvyšší podíl průmyslu na tvorbě HDP ze zemí EU a je významným subdodavatelem pro větší ekonomiky. Zhruba 40 procent veškerých emisí skleníkových plynů ČR přitom pochází z elektroenergetiky. Některé studie, např. [8, 9, 10, 11], uvádějí, že lze sestavit energetický mix z téměř 100 procent založený na OZE a že je to jen otázka politických priorit a financí. Avšak v klimatických a geografických podmínkách České republiky lze fosilní paliva nahradit pomocí OZE jen částečně:

- Solární a větrné zdroje jsou závislé na počasí, denní a roční době, a nelze je řídit podle aktuální spotřeby energie. Vodní zdroje jsou významně omezené geografickými podmínkami ČR a průběžnou dostupností vody. Biomasa (lesy, zemědělská produkce) je také omezená a ani zdaleka nevystačí pro udržitelný provoz všech tepláren a elektráren.
- Přestože ČR již 15 let intenzivně buduje fotovoltaické a větrné elektrárny, za zimních nocí s inverzním počasím klesá v ČR produkce OZE až na 0,3 procenta spotřeby elektřiny. Průměrný výkon OZE je u nás v zimním období zhruba 1 procento celkové spotřeby a dostupná akumulací kapacita musí být naplnována z jiných zdrojů, viz **obr. 12**.

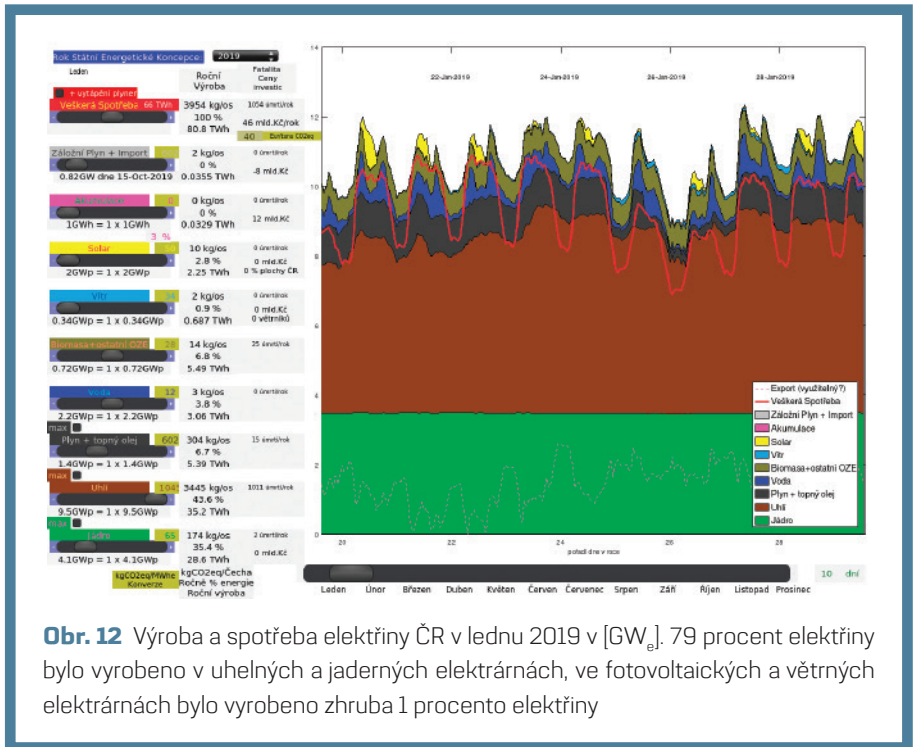
- Výkon všech akumulčních kapacit ČR dokáže uspokojit jen 10 procent spotřeby elektřiny ČR [12]. V ČR nemáme vysokohorské řeky s přehradami schopnými akumulovat potřebné množství energie a dominantním akumulčním zařízením jsou přečerpávací elektrárny. O jejich další výstavbě se ale v současnosti neuvažuje (výstavba poslední, Dlouhé stráně, trvala 18 let). Bateriové systémy lze nakoupit rychleji, avšak tyto investice jsou kvůli krátké životnosti baterií vysoce ztrátové. Proto je 99 procent akumulované elektřiny celého světa uloženo v přečerpávacích vodních elektrárnách [13].

Nemožnost vyrobenou energii efektivně akumulovat je kritickým limitem všech solárních a větrných zdrojů ČR. Není důležité jenom to, zda se ročně vyrobí stejné množství energie, jako se spotřebuje, ale také zda se jí vyrobí dost na pokrytí celkové spotřeby v každém okamžiku dne i noci, 365 dní v roce. Dostupnost elektřiny v kterýkoliv okamžik je důležitou vlastností elektroenergetiky a hraje významnou roli ve všech oblastech lidského života od běžného komfortu domácností přes strategické infrastruktury (mobilní a datové sítě, vodárny, nemocnice, pouliční osvětlení, MHD, železnice atd.) až po otázky národní bezpečnosti. Každý energetický scénář proto musí tuto dostupnost garantovat a vyloučit výpadky dodávek elektřiny.

Současný stav

Podívejme se na graf spotřeby a výroby elektrické energie v ČR v lednu roku 2019 na **obrázku 12**. Leden bývá nejkritičtějším měsícem kvůli minimálnímu svitu slunce a maximální spotřebě na vytápění. Červená křivka celkové spotřeby ČR vykazuje polední nárůsty o zhruba 20 procent vůči nocím a podobně i víkendové poklesy. Navzdory intenzivní výstavbě FTE a VTE většinu spotřebované elektřiny vyrobily fosilní, jaderné, vodní a biomasové zdroje, zatímco fotovoltaické a větrné zdroje v tomto měsíci dodávaly pouze 1 procento celkové spotřeby.

Celková česká roční výroba 80,8 TWh převýšila spotřebu 66 TWh a přebytek byl exportován (čárkované). Export této dominantně „uhelné“ elektřiny se významně podílel na emisích skleníkových plynů elektroenergetiky ČR ve výši 3954 kg CO_{2,eq}/osobu/rok. Kladná obchodní bilance ve výrobě elektřiny skončí v roce 2023 plánovaným uzavřením několika uhelných elektráren, čímž emise ČR klesnou na 2972 kg CO_{2,eq}/os/rok.



Obr. 12 Výroba a spotřeba elektriny ČR v lednu 2019 v [GW_e]. 79 procent elektriny bylo vyrobeno v uhelných a jaderných elektrárnách, ve fotovoltaických a větrných elektrárnách bylo vyrobeno zhruba 1 procento elektriny

Scénář EU Fit for 55

V rámci Zelené dohody (Green Deal) si Evropská unie stanovila závazný cíl dosáhnout do roku 2050 klimatické neutrality. K tomu je nezbytné, aby se v příštích desetiletích výrazně snížily emise skleníkových plynů. Důležitým krokem ke klimatické neutralitě je závazek snížit emise do roku 2030 alespoň o 55 procent označovaný jako Fit for 55. **Obrázek 13** ukazuje situaci, pokud bychom v souladu s tímto závazkem do roku 2030 zcela odstoupili od uhlí. Sice bychom odstranili nejvíce znečišťující zdroje emisí, avšak v krátké době bychom museli například navýšit výkon FTE více než dvakrát, výkon VTE více než třikrát, výkon plynových elektráren 4× a dohodnout adekvátní zvýšení importu plynu. Popsaný scénář by vedl ke snížení uhlíkové stopy o 63 procent a v elektroenergetice by zajistil splnění cíle Fit for 55.

Státní energetická koncepce

Státní energetická koncepce z roku 2015 stanovila hlavní priority a strategické záměry státu v sektoru energetiky pro následujících 25 let. Na základě této koncepce, která si v souladu s Pařížskou dohodou o změně klimatu klade za cíl dosažení uhlíkové neutrality, cílíme v roce 2043 k energetickému mixu 52% jádro + 31% OZE, který je zobrazen na **obrázku 14**. Realizací koncepce a souvisejících změn energetického mixu klesnou emise skleníkových plynů ČR na 1142 kg CO_{2,eq}/os/rok.

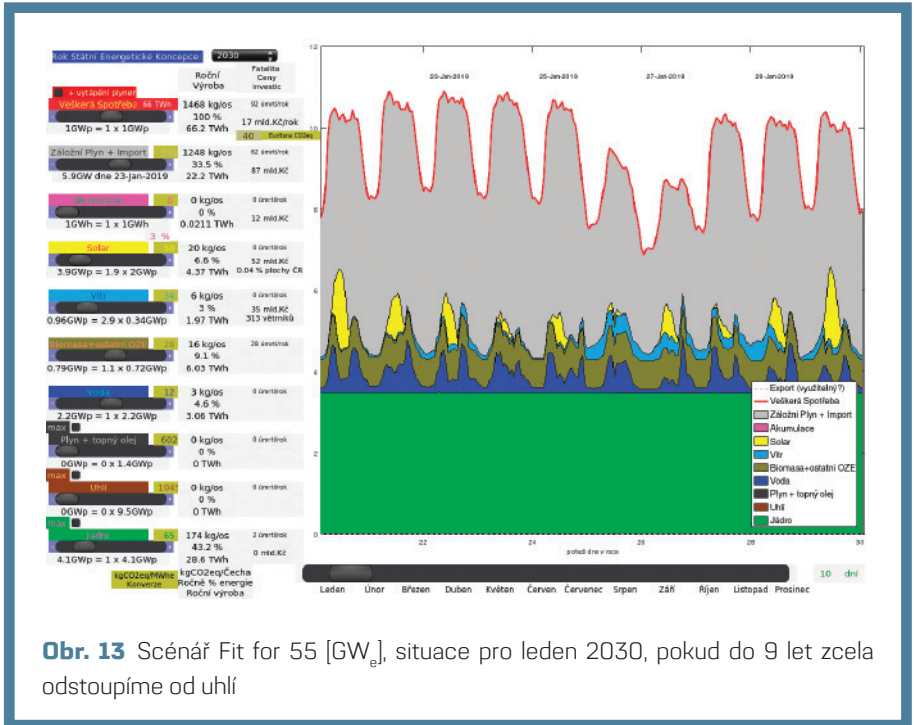
62% jádro + 35% OZE

Doporučení státní Uhelné komise z roku 2020 je zbavit se veškerého uhlí do roku 2038. Pokud upravíme scénář Státní energetické koncepce a nahradíme uhelné elektrárny jadernými, emise skleníkových plynů ČR klesnou na 456 kg CO_{2,eq}/os/rok. Znamená to navýšení instalovaného výkonu jaderných elektráren oproti dnešku 1,6×, zvýšení výkonu FTE 3,2× a VTE 11× s celkovou investicí v hodnotě 750 mld. Kč. Pro vykrývání propadů výroby v OZE bychom 2,4× navýšili výkon plynových elektráren, což je nejméně ze všech analyzovaných mixů. Scénář je zobrazen na **obrázku 15**.

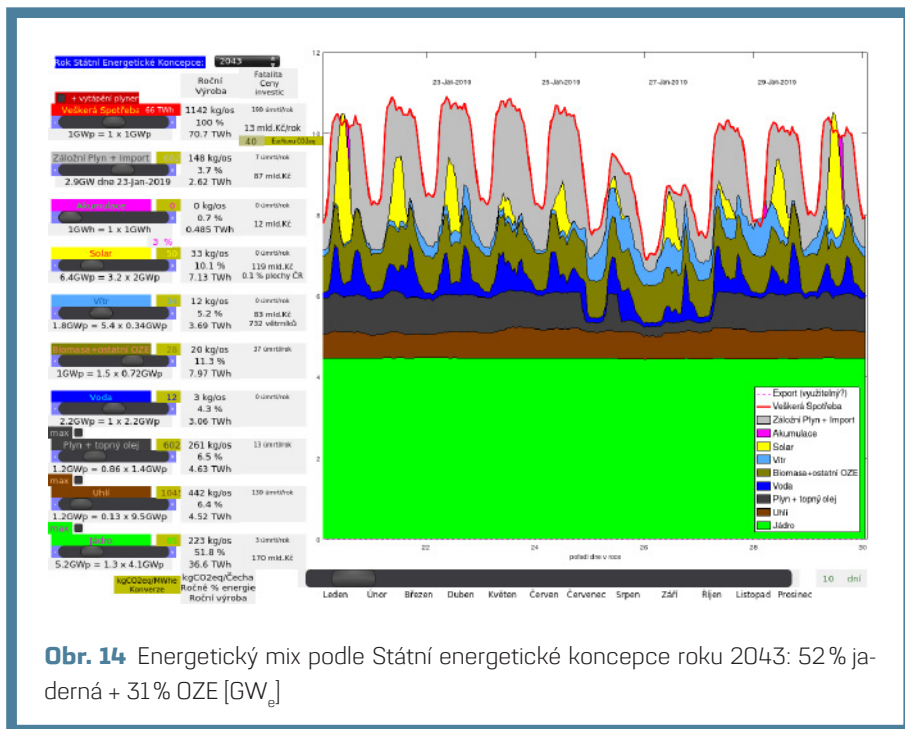
Scénář zajistí pokles emisí o 88 procent oproti dnešku za dostupné investice a zároveň ročně ušetříme při ceně 40 eur/tunu CO_{2,eq} 40 miliard Kč za emisní povolenky. Energetický mix 62% jádro + 35% OZE je proto blízký optimálnímu scénáři z hlediska klimatických závazků a je efektivní i z hlediska ekonomiky energetického mixu. Snížení emisí CO_{2,eq} podle tohoto scénáře poskytne dostatek času, několik století pod hranicí růstu teploty o +2,5 °C považovanou za ještě bezpečnou, na vývoj a realizaci nových nízkoemisních zdrojů energie umožňujících vyrábět elektrickou energii s minimálními dopady na životní prostředí.

37% jádro + 49% OZE

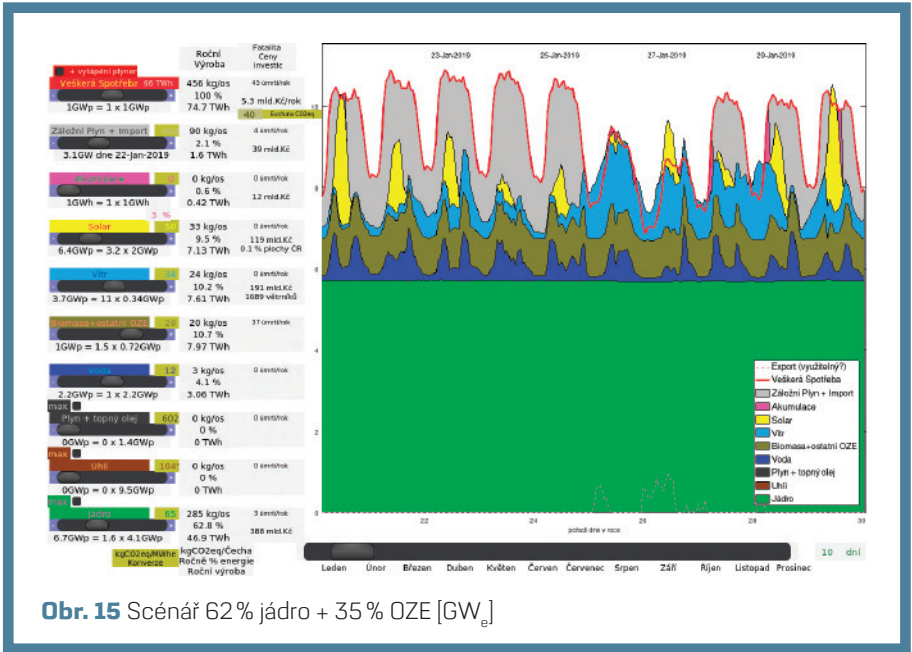
Alternativou k předchozímu scénáři je naopak zmrazení výkonu jaderných elektráren na současné úrovni a náhrada odstavených uhelných elektráren masivní výstavbou OZE až s desetinásobným navýšením výkonu FTE a VTE. Tento scénář je zobrazen na **obrázku 16**, který ukazuje, že by přes vysoký nárůst instalovaného výkonu OZE na 1000 procent současného stavu chybělo o některých zimních nocích až 5,3 GW elektrického výkonu a museli bychom třikrát navýšit výkon plynových elektráren.



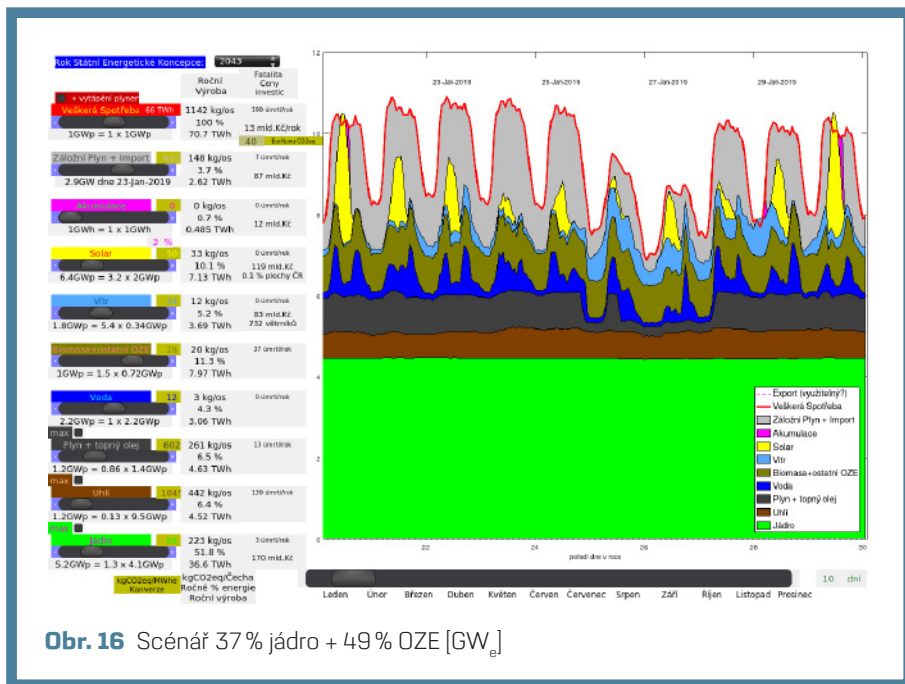
Obr. 13 Scénář Fit for 55 [GW_e], situace pro leden 2030, pokud do 9 let zcela odstoupíme od uhlí



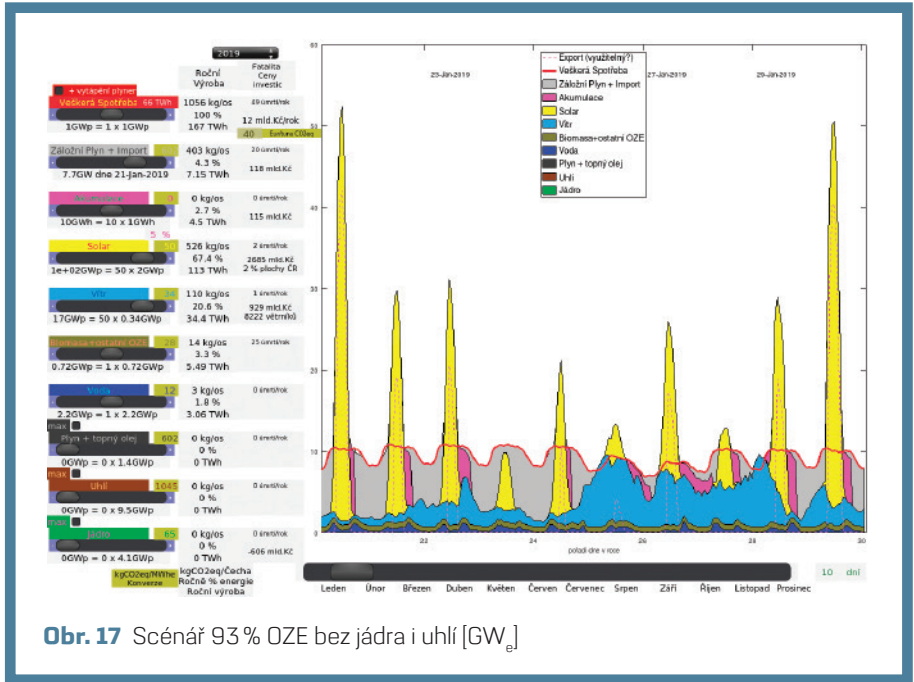
Obr. 14 Energetický mix podle Státní energetické koncepce roku 2043: 52% jaderná + 31% OZE [GW_e]



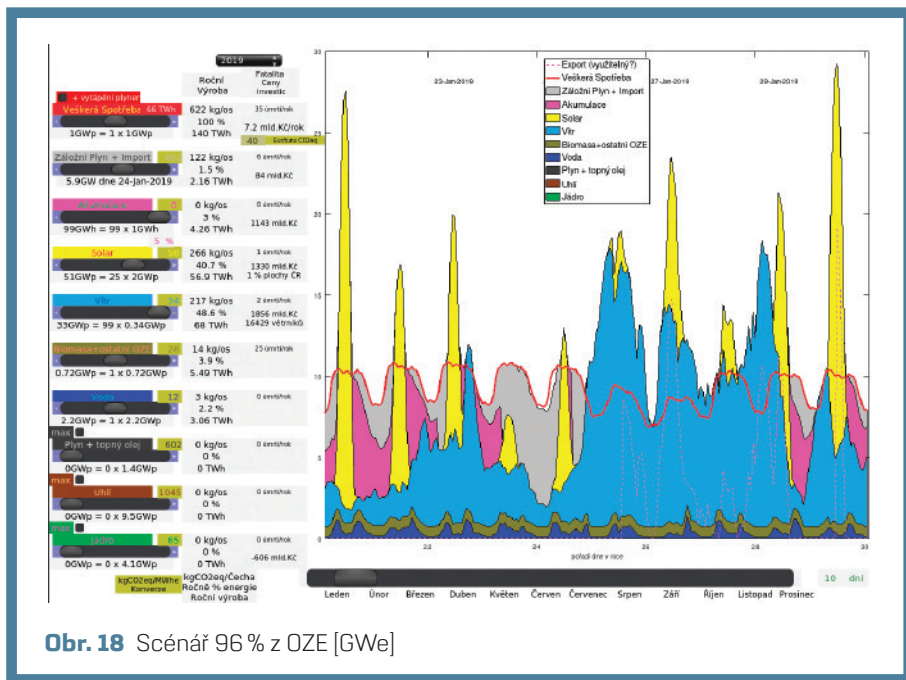
Obr. 15 Scénář 62% jádro + 35% OZE [GW_e]



Obr. 16 Scénář 37% jádro + 49% OZE [GW_e]



Obr. 17 Scénář 93 % OZE bez jádra i uhlí [GW_e]



Obr. 18 Scénář 96 % z OZE [GWe]

V létě by schodky ve výrobě elektřiny vykryly bateriové farmy, jejichž současná pořizovací cena by byla zhruba 11 mld. Kč (8 bateriových farem podle [14]). V zimě by ale tyto farmy vystačily jen na půl hodiny lednové noční spotřeby ČR (v grafu fialové plošky) a schodky ve výrobě by musely vyrovnat plynové elektrárny. Díky bateriím by klesly výdaje ČR za emisní povolenky o 0,2 mld. Kč, avšak investice do baterií s návratností $11/0,2 = 55$ let by byla vzhledem k desetileté životnosti baterií ztrátová.

Celkové emise skleníkových plynů ČR by v tomto scénáři dosáhly 900 kg CO_{2,eq}/os/rok a byly by tak téměř dvojnásobné ve srovnání s předchozím scénářem. Hlavním důvodem je skutečnost, že by muselo být 14 procent elektřiny vyrobeno z plynu. Baterie za 100 mld. Kč by snížily výdaje na emisní povolenky CO_{2,eq} o 1 mld. Kč/rok s vyplývající ztrátovou návratností investice 100 let při životnosti baterií 10 let.

Kvůli nerovnoměrnému výkonu, nedostupnosti efektivních úložišť energie a souvisejícím záskokům plynovými elektrárnami nejsou FTE a VTE ekvivalentní náhradou jaderných elektráren a neumožňují stejně účinně snižovat emise skleníkových plynů.

93 % OZE

Část populace v řadě zemí odmítá jadernou energetiku kvůli obavám z možných havárií jaderných elektráren a radioaktivnímu odpadu. To v minulosti vedlo německou vládu k rozhodnutí odstavit v rámci projektu Energiewende všechny jaderné elektrárny a poslední tři by měly být uzavřeny do konce roku 2022. Navzdory již téměř bilionu eur investovaných do Energiewende má ale Německo emise skleníkových plynů na osobu 10× vyšší než například Francie, v jejímž energetickém mixu hraje jaderná energetika hlavní roli [15].

Při scénáři 93% OZE (**obr. 17**) by prakticky celá výroba elektřiny v ČR probíhala ve fotovoltaických a větrných zdrojích s kolísajícím výkonem. Protože je potenciál spalování biomasy a vodních zdrojů na hranici svých možností, bude v zimním období v OZE docházet k výraznému poklesu výroby elektřiny, který bude kompenzován výrobou v plynových elektrárnách.

Negativní vliv samotných fotovoltaických a větrných elektráren na životní prostředí přitom také není zanedbatelný. Dopady nízkého energetického toku OZE, kterými jsou především vysoká spotřeba konstrukčních materiálů na jejich výstavbu a rozsáhlá zastavěná přírodní plocha, zatím nejsou zřetelné, protože je OZE málo. VTE a FVE, které dnes dosluhují, produkovaly ve své době (na přelomu století) jen 0,01 procenta celosvětové spotřeby [16]. Realizací scénáře 93 procent OZE by každoroční množství odpadu z likvidace OZE vzrostlo řádově 10 000krát.

Scénář 93% OZE proto není z uvedených důvodů bezemisní a je doprovázen emisemi skleníkových plynů 1056 kg CO_{2,eq}/os/rok, které jsou tvořeny převážně emisemi záskokových plynových elektráren (400 kg CO_{2,eq}/os/rok) a celoživotním cyklem OZE (636 kg CO_{2,eq}/os/rok podle [4]).

Scénář 93% OZE vyžaduje:

- Postavit 50× více FTE a VTE, než stojí dnes, a to za investici 2685 mld. Kč do FTE a 929 mld. Kč do VTE. Fotovoltaické panely pokryjí 2 procenta území ČR, tedy stejně, jako je dnes veškerá zastavěná plocha ČR včetně všech měst. Dále by bylo postaveno zhruba 8222 větrných elektráren Vestas 2 MW [3] o výšce sto metrů (jako dům o 40 podlažích). Protože v ČR není dostatek vhodných větrných míst a VTE budou pracovat s nižší efektivitou, bude muset být jejich počet pravděpodobně ještě vyšší.
- Instalovat akumulaci za 115 mld. Kč v rozsahu 77 bateriových farem, každá o rozloze vesnice [14]. Tyto farmy ušetří ročně 1 mld. Kč v nákladech na emisní povolenky (hlavně díky FTE v létě) s návratností investice 115 let. Životnost baterií je obvykle zhruba 10 let, po uplynutí této doby budou představovat nebezpečný chemický odpad, který bude třeba ekologicky zlikvidovat. Denně bude třeba zlikvidovat a současně doplnit zhruba 1 kamion baterií [3]. Alternativou k bateriovým farmám je výstavba vodních přečerpávacích elektráren. Pokud

by měly kapacitu vodní elektrárny Dlouhé stráně [17], stačily by pouze tři a jejich životnost by byla cca století.

- Navýšit výkon plynových elektráren 6×. V grafu na **obrázku 17** vidíme, že výše uvedená akumulace (viz fialové plošky) by v zimním období nestačila, a schodek by musely pokrýt záskokové plynové elektrárny. Tyto elektrárny by pracovaly pouze v zimních nocích v průměru 10 procent nocí ročně, což by mnohonásobně zvýšilo cenu vyráběné elektřiny.
- Smířit se s devastací zdrojů nerostných surovin, jako je ocel, cement a kovy vzácných zemin. Jak ukazuje následující tabulka, na výrobu jedné GWh spotřebuje FTE při výstavbě 140× více oceli a 28× více betonu než jaderná elektrárna. Při stavbě FTE by bylo instalováno orientačně půl miliardy fotovoltaických panelů 200 Wp o váze 16 kilogramů, vyrobených ze skla, hliníku, křemíku, stříbra a dalších látek. Při obvyklé životnosti panelů 20 let bychom museli v trvale udržitelné ekonomice denně ekologicky zlikvidovat a nainstalovat 70 000 takových panelů, tedy zhruba 1120 tun směsi skla, hliníku, křemíku, olova, mědi a stříbra.

Tabulka 1 Porovnání spotřeby konstrukčních materiálů JE a VTE na 1 vyrobenou GWh

	Jmenovitý výkon [MW _e]	Roční výroba elektřiny [GWh]	Životnost [rok]	Spotřeba oceli na vyrobenou GWh [tun/GWh]	Spotřeba betonu na vyrobenou GWh [tun/GWh]
JE Temelín	2000	14 000	60	0,03	0,4
VTE Vestas V90	2	3,6	20	4,2	10

Od jara do podzimu bychom vůbec nevyužili 61 procent celkově vyrobené elektřiny a velmi pravděpodobně bychom ji nemohli ani exportovat, protože v okolních zemích bude ve stejné době převládat obdobný přebytek výkonu OZE. Mohli bychom tuto energii akumulovat do vodíku, avšak to by znamenalo další vysoké investice do velkokapacitních výrobních a zkapalňovacích zařízení nebo skladovací infrastruktury.

96 % OZE

Při polovičním výkonu FTE oproti předchozímu scénáři, a naopak zdvojnásobením výkonu VTE bychom dosáhli podílu 96 % OZE na výrobě elektřiny. V takové případě by emise klesly na 661kg CO_{2,eq}/rok/os a energetický mix by byl výrazně vyrovnanější než předchozí mix 93 % OZE (**obr. 17**). Tato cesta ale není pro ČR aplikovatelná, protože nemáme dostatek vhodných lokalit pro výstavbu desítek tisíc větrných elektráren.

Závěr

Z provedené analýzy reálných dat vyplývá, že nejnižší emise skleníkových plynů nabízí scénář 62% jádro + 35% OZE. Tento scénář je blízký scénáři Státní energetické koncepce a sníží uhlíkovou stopu české elektroenergetiky oproti dnešku devětkrát. Jestliže dnes vypouštíme 3954 kg CO_{2,eq}/os/rok, při realizaci scénáře 62% jádro + 35% OZE by emise ČR klesly na 456 kg CO_{2,eq}/os/rok.

Analýza dokládá, že je tento scénář mnohem ekologičtější a levnější než scénáře s vyšším zastoupením OZE, které by více poškozovaly životní prostředí jak z hlediska vyšších emisí CO_{2,eq}, tak z hlediska intenzivního čerpání nerostných surovin a produkce velkého množství elektroodpadu. Při navyšování podílu OZE nad 35 procent budou emise stoupat až na více než tunu CO_{2,eq}/osobu/rok, protože současně se zvyšováním

Tabulka 2 Přehled analyzovaných scénářů české energetiky

Energetický mix	Podíl roční výroby z OZE	Graf	Násobek současného instalovaného výkonu					Baterie GWh	Celkové emise kgCO _{2,eq} za rok a osobu	Odhad celkových investic od 2021 miliard Kč
			uhlí	jádro	slunce	vítr	plyn			
Stav 2019	14 %	1	1	1	1	1	1	0	3954	0
Fit for 55 rok 2030	23 %	2	0	1	2	3	4	0	1468	160
Státní energetická koncepce rok 2043	31 %	3	0,2	1,3	3,2	5,4	3	0	1142	400
62% jádro	35 %	4	0	1,6	3,2	11	2,4	1	456	750
37% jádro	49 %	5	0	1	10	10	3	1	927	745
93% OZE	93 %	6	0	0	50	50	6	10	1056	3900
96% OZE	96 %	7	0	0	25	99	4	99	622	4413

podílu OZE úměrně porostou množství spáleného fosilního zemního plynu, spotřeba primárních zdrojů surovin a množství odpadu.

Akumulační bateriové farmy s krátkou životností baterií jsou přitom vysoce neekonomické a náročné na ekologickou recyklaci. Mnohem vhodnější by bylo použití přečerpávacích vodních elektráren, avšak o jejich výstavbě se zatím neuvažuje.

Scénář 62 % jádro + 35 % OZE, který je neúčinnější v boji proti klimatickým změnám a v ochraně životního prostředí, vyžaduje co nejdříve zahájit výstavbu nejen náhrady dosluhujících jaderných bloků, ale také výstavbu nových. Do jejich zprovoznění nelze bez rizika zimních blackoutů odstavit většinu uhelných elektráren.

Současně je žádoucí investovat výrazně více peněz a lidských zdrojů do výzkumu nových nízkoemisních zdrojů energie a technologií, jako jsou jaderná fúze [18], hluboké geotermální vrty nebo vysokokapacitní úložiště energie [19].

Poznámka

Všechny uvedené ceny jsou pouze porovnávací, počítané v cenách z roku 2020 a nezahrnují ani budoucí vývoj, ani inflaci, ani recyklaci materiálů z OZE a baterií. Uvažujeme konstantní spotřebu elektřiny z roku 2019, zatímco ekonomický růst, nastávající elektromobilita a odstavování uhlí pro vytápění budou zvyšovat dle prognóz budoucí spotřebu elektřiny až o 2 procenta/rok navzdory úsporám energie, jako je zateplování domů, využívání veřejné dopravy, vytápění dřevem atd. Výkon vodních a biomasových elektráren je ponechán na stejné úrovni jako dnes. Emise z výroby, provozu a recyklace baterií nebyly v důsledku nedostatku informací v této analýze započítány.

Dramatický růst ceny plynu od roku 2021 podpořil výše uvedené závěry. Proměnlivý výkon OZE vyžaduje zálohy plynovými záskokovými zdroji a ekonomika scénářů s vyšším podílem OZE se cenou plynu významně zhoršuje. Aktuální válka Ruska proti Ukrajině dále kriticky snižuje energetickou bezpečnost České republiky. To vše ukazuje nevhodnost scénářů s vyšším podílem OZE, které masivně zvyšují spotřebu plynu. Navyšování podílu OZE tak povede nejenom k růstu ceny elektřiny, ale v krajním případě také k omezení dodávek elektřiny.

Odkazy

- [1] Energostat, 25. 10. 2021.
- [2] Energetika.m, https://drive.google.com/file/d/1fBb_TdGZx-aUn5ck1UA4EorU6d-L6AnIW/view?usp=sharing, <https://www.gnu.org/software/octave/>, 25. 10. 2021.
- [3] A. Osička, BP, VUT v Brně, 2010, https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28453.

- [4] B. K. Sovacool, *Env. Sc & Tech.*, 55 (2021) 5258, <https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.1c00140>.
- [5] <https://ourworldindata.org/>, 25. 10. 2021.
- [6] <https://faktaoklimatu.cz/>, 25. 10. 2021.
- [7] <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>, 25. 10. 2021.
- [8] T. W. Brown, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92 (2018) 834, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.113>.
- [9] <https://www.energywatchgroup.org/publications/>, 25. 10. 2021.
- [10] M. Jacobson, *One Earth*, 4 (2019) 449, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.12.003>.
- [11] <http://www.eurosolar.cz/>, 25. 10. 2021.
- [12] <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice>, 25. 10. 2021.
- [13] Joint Research Center, European Commission. 2013. Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage. <http://www.jrc.ec.europa.eu>, 25. 10. 2021.
- [14] Hornsdale Power Reserve. <https://hornsdalepowerreserve.com.au/>, 25. 10. 2021.
- [15] <https://app.electricitymap.org/>, 25. 10. 2021.
- [16] J. Cardozo, *Fusion Energy*, 35 (2016) 94, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10894-015-0012-7>.
- [17] <https://www.dlouhe-strane.cz/>, 25. 10. 2021.
- [18] S. Entler, *Energy*, 152 (2018) 489, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.130>.
- [19] <https://www.academia.cz/edice/kniha/vyzkum-pro-energetiku-vybrana-temata>, 25. 10. 2021.

Autoři

Mgr. Martin Ďurdovič, Ph.D. – je vědeckým pracovníkem Centra pro výzkum veřejného mínění v Sociologickém ústavu AV ČR, v. v. i., a vyučuje na katedře sociologie na Filozofické fakultě UK v Praze. Zabývá se sociální teorií a studiem vztahů mezi společností a energetikou.

Ing. Slavomír Entler, Ph.D., – pracuje v oddělení Tokamak Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., a vyučuje na Fakultě strojní a Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze. Zabývá se vývojem senzorů magnetického pole pro fúzní reaktory ITER a DEMO a problematikou realizace prvních fúzních elektráren.

Mgr. Jan Horáček, dr. ès. sc., DSc. – pracuje v oddělení Tokamak v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., a vyučuje na Matematicko-fyzikální fakultě UK v Praze. Zabývá se fyzikou okrajového plazmatu, problematikou interakce plazma–stěna a hledá fyzikální řešení přežití tepelného štítu reaktoru v kontaktu s extrémně horkým plazmatem.

RNDr. Jiří Málek, Ph.D. – je vedoucím Oddělení seismotektoniky Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i. Zabývá se seismologií, výzkumem lokální seismicity, vývojem nových metod pro seismická měření a metod pro hledání zdrojů geotermální energie.

Ing. Jan Syblík – postgraduálně studuje v Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze a od roku 2019 pracuje v Oddělení hodnocení a výzkumu jaderné bezpečnosti Státního ústavu radiační ochrany. Zabývá se subkanálovou analýzou aktivní zóny jaderných reaktorů, návrhy tepelných cyklů na bázi superkritického oxidu uhličitého, technologií malých modulárních reaktorů a integrací jaderné fúze do energetiky.

RNDr. Vladimír Wagner, CSc. – pracuje v Oddělení jaderné spektroskopie Ústavu jaderné fyziky AV ČR, v. v. i., a vyučuje na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze. Zabývá se experimentálním studiem horké a husté jaderné hmoty v relativistických srážkách těžkých iontů a možností transmutace vyhořelého jaderného paliva pomocí intenzivních zdrojů neutronů.

Nová strategie Akademie věd České republiky

motto: „Špičkový výzkum ve veřejném zájmu“

Program Udržitelná energetika

Lidská civilizace byla vždy formována dostupností energie v různých jejích formách a je na ní životně závislá. Bez spolehlivých a dostatečných dodávek energie bychom se museli rozloučit s mnoha výtobky civilizace, které považujeme za samozřejmé. Celosvětová spotřeba energie činí asi 580 mil. Tj ročně. Největší část vyrobené energie končí v průmyslu a dopravě.

Hlavním zdrojem energie jsou dosud fosilní paliva s podílem přibližně 83%. Podíl obnovitelných zdrojů energie sice roste, dosahuje však pouze okolo 15%. Se stoupající spotřebou energie je tato situace dlouhodobě neudržitelná. Zdroje fosilních paliv jsou omezené a emise vznikající při jejich spalování mohou mít v dohledné době fatální dopad na klima na naší planetě. Do hry tak vstupují nové faktory a energetiku čeká v příštích desetiletích zásadní přeměna směrem k udržitelnosti. Legislativní rámec této přeměně v našich podmínkách stanovil balíček „Fit for 55“ v rámci Zelené dohody pro Evropu – závazku Evropské unie dosáhnout do roku 2050 klimatické neutrality.

Výroba, transport, skladování a využívání energie ve všech jejích formách představuje složitý systém, jehož pochopení vyžaduje znalosti z mnoha vědních oborů. Probíhající změny mohou mít značné socioekonomické dopady pramenící z rizik v podobě nestability a nedostupnosti dodávek energie, vysokých cen energií nebo hrozeb pro politickou soudržnost hospodářských celků s odlišnými zájmy. V programu *Udržitelná energetika* spojují své síly ústavy AV ČR a jejich externí partneři z oblasti přírodních, technických a společenských věd na řešení mezioborových výzkumných výzev a dopadu probíhající přeměny energetiky na společnost.

Program pokrývá klíčové oblasti spojené s přechodem k udržitelné energetice. Obnovitelné a jaderné zdroje energie nabízejí nízkoemisní řešení potřeb primární energie. V oblasti jaderné energie je třeba hledat nová řešení pro termojadernou fúzi a zajistit bezpečnost existujících jaderných elektráren se štěpnými reaktory. Nestálost výroby energie z obnovitelných zdrojů a postupná decentralizace výroby vytváří tlak na skladování energie v dosud nevídané míře. Velkou roli v této oblasti může sehrát vodík, který je do budoucna považován za hlavní zdroj energie pro oblast dopravy. Je třeba minimalizovat vliv energetického využití paliv na životní prostředí. Pokrok v těchto oblastech vyžaduje pochopení a přijetí ze strany veřejnosti. Proto je důležitou součástí programu popularizace a přenos poznatků do vzdělávací sféry.

Koordinátor

- doc. Ing. Miroslav Chomát, CSc.

Koordinační pracoviště

- Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i.
- Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i.

Partnerská pracoviště

- Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i.
- Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.
- Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, v. v. i.
- Ústav chemických procesů AV ČR, v. v. i.
- Ústav informatiky AV ČR, v. v. i.
- Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i.
- Ústav makromolekulární chemie AV ČR, v. v. i.
- Sociologický ústav AV ČR, v. v. i.
- Národohospodářský ústav AV ČR, v. v. i.
- Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i.
- Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i.
- Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.

Externí pracoviště

- České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
- České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
- Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta
- Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemické technologie
- Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemicko-inženýrská
- Západočeská univerzita v Plzni, Research and Innovation Centre for Electrical Engineering (RICE)
- Státní úřad pro jadernou bezpečnost
- ÚJV Řež, a. s.
- Centrum výzkumu Řež, s. r. o.
- ČEPS, a. s.
- Česká vodíková technologická platforma (HYTEP)

Jaderná energie představuje neefektivnější a nejsilnější energetický zdroj, jaký lidstvo zná. Přitom jde o nízkoemisní a nízkouhlíkový zdroj, který umožňuje účinně snižovat emise při výrobě elektřiny a který jako jeden z mála může účinně zpomalit globální oteplování způsobující klimatické změny. Jaderná energetika v řadě zemí prokázala, že její rozšíření úspěšně vede k nízkoemisní energetice (Francie, Švýcarsko, Švédsko a další). S omezením výstavby jaderných elektráren byl současně utlumen také vývoj nových konceptů jaderných reaktorů. Odpovědí na tento stav je vývoj nových malých pasivně bezpečných modulárních reaktorů, umožňujících snížit komerční i technologická rizika, a intenzifikace vývoje nových reaktorů na bázi jaderné fúze.

Malé (*Small Modular Reactor, SMR*) a mikromodulární (*Micro Modular Reactor, MMR*) reaktory tak představují významný krok ve vývoji jaderných zdrojů energie. Nová technická řešení s vysokým stupněm pasivní bezpečnosti a nízkými celkovými investičními náklady přibližují výstavbu jaderných elektráren komerční sféře a rozšiřují možnosti využití jaderné energie.



STRATEGIE AV21

Edice Strategie AV21 | Udržitelná energetika

Martin Ďurdovič, Slavomír Entler, Jan Horáček, Jiří Málek, Jan Syblík, Vladimír Wagner | **Malé modulární reaktory**

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., pro Kancelář Akademie věd ČR, Národní 3, 117 20 Praha 1. Grafická úprava Robin Brichta. Fotografie na obálce NuScale Power a Ústav fyziky plazmatu AV ČR.

Technická redaktorka Ivana Říhová. Obrazová redaktorka Lucie Veselá.

Odpovědná redaktorka Dana Packová.

Vydání 1., 2022. Ediční číslo 12896. Sazba a tisk **SERIFA**®, s. r. o., Jínonická 80, 158 00 Praha 5.

<http://av21.avcr.cz>

ISBN 978-80-200-3395-6



9 788020 033956

