

Jaderná energie / Jadrová energia

2/4 2023, ročník 4 (69)



jie

V tomto čísle věnovaném spouštění 3. bloku jaderné elektrárny Mochovce vám představíme společnost Slovenské elektrárne. Dozvíte se, jak probíhal celý proces přípravy spuštění EMO3, jak se na výstavbě nových mochovských bloků podílely společnosti ÚJV Řež a TES a jakou úlohu při spuštění plní Úrad jadrového dozoru SR, Poradné vedecké konzílium a společnost VUJE. Ve vzpomínkách Miroslava Hrehora si připomeneme někdejšího náměstka federálního ministra paliv a energetiky a vládního zmocněnce pro výstavbu jaderných elektráren Ing. Jozefa Kehera. Seznámíme vás s historií a budoucností jaderného programu ve Francii, se 3D modelem jaderné elektrárny VVER-440/V-213 a najdete zde mimo jiného i další část seriálu o vzniku a historii ČSKAE, pokračování vědeckopopulárního cyklu o jaderných zdrojích pro vesmír a informace z aktuálního dění.



Jaderná energie / Jadrová energia

Základní úlohou časopisu „Jaderná energie/Jadrová energia“ je přispívat k úrovni kultury jaderné bezpečnosti. Časopis je psaný v českém a slovenském jazyce, vědecké a odborné články, abstrakty a anotace též v anglickém jazyce. Časopis vychází čtyřikrát ročně nákladem 500 výtisků a v elektronické podobě, která je volně dostupná na adrese jadernaenergie.online.

Obsah časopisu je zaměřen na jadernou bezpečnost a radiační ochranu s důrazem na ochranu životního prostředí, zdraví profesionálních pracovníků a obyvatelstva; výzkum, vývoj a nové technologie; provoz a výstavbu jaderných elektráren; zpracování a ukládání radioaktivních odpadů; aplikace radioizotopů a ionizujícího záření; aktuální informace z dozorných orgánů, vzdělávání a rozvoj know-how.

YDAVATEL:

CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ S.R.O.

Hlavní 130, Řež
250 68 Husinec, Česká republika
IČO: 26722445

Úrad jadrového dozoru SR

Bajkalská 27
P.O.Box 24, 820 07 Bratislava, Slovenská republika
IČO: 30844185

REDAKCE:

Michal Šafránek – šéfredaktor
redakce@jadernaenergie.online
+420 775 374 384
Ing. Jiří Kuf, Ing. Jan Procházka.

ADRESA REDAKCE:

Centrum výzkumu Řež s.r.o.
Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec, Česká republika

REDAKČNÍ RADA:

Ing. Daneš Burket, Ph.D. – předseda,
doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.,
Ing. Jiří Duspiva, PhDr. Tomáš Ehler, MBA,
Ing. Miroslav Hrehor, Ing. Jiří Hůlka,
Ing. Aleš John, MBA, prof. Ing. Jan John, CSc.,
Ing. František Pazdera, CSc., Ing. Alena Rosáková,
prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc., Mgr. Petr Šuleř,
Ing. Radek Trtílek, Ing. Zdeněk Tipek,
Mgr. Miriam Vachová, Mgr. Ilona Vysoudilová,
RNDr. Marek Vyšinka, Ph.D.,
RNDr. Vladimír Wagner, CSc., Ing. Jan Zdebor, CSc.

GRAFIKA, SAZBA A TISK:

Boomerang Communication s.r.o.

REGISTRACE MK ČR

Časopis Jaderná energie/Jadrová energia
byl zapsán do evidence periodického tisku
Ministerstva kultury České republiky a bylo
mu přiděleno evidenční číslo MK ČR E 4671.
ISSN 2694-9024

ČÍSLO 2/2023, ROČNÍK 4 [69]

Vychází 29. 9. 2023

Editorial



Vážení čtenáři,

druhé letošní číslo našeho časopisu věnujeme bezesporu jedné z nejvýznamnějších událostí loňského a letošního roku, kterou je spuštění třetího bloku jaderné elektrárny Mochovce. V průběhu loňského léta jaderná komunita netrpělivě očekávala rozhodnutí Úradu jadrového dozoru Slovenskej republiky, který 25. srpna vydal povolení k uvedení do provozu. Štěpná řetězová reakce byla spuštěna 22. října a následovaly testy fyzikálního spuštění. Dalším významným milníkem byl letošní 13. leden, kdy Úrad jadrového dozoru vydal povolení k zahájení energetického spuštění a na konci ledna byl třetí mochovecký blok připojen k síti. Následovaly další testy energetického spuštění a postupné zvyšování výkonu, který v těchto dnech dosáhl 100 %.

Připomeňme, že první a druhý blok jaderné elektrárny Mochovce byly spuštěny v letech 1998 a 1999. Třetí a čtvrtý blok bohužel takové štěstí neměly, v červenci 1993 byla jejich výstavba zastavena a bylo rozhodnuto o konzervaci. Popis událostí následujících tří desítek let by vydal na knihu, a ne vždy to vypadalo s dokončením a spuštěním obou bloků optimisticky. O to víc jsme rádi, že jsme se spuštění třetího bloku dočkali a můžeme mu věnovat toto číslo.

Výroba třetího bloku mochovecké elektrárny pokryje 13 % celkové spotřeby elektřiny na Slovensku, které se díky tomu stane z pohledu dodávek elektřiny soběstačným. Uvedení nového jaderného bloku do provozu má velký význam nejen pro Slovensko, ale i celou Evropu, kde se výstavba nových jaderných zdrojů potýká s velkými těžkostmi. Nezbyvá než věřit, že další nové jaderné bloky – z našeho pohledu především ty dukovanské, temelínské a možná i další – budou při své přípravě a výstavbě čelit menším potížím, než se kterými se museli vypořádat naši slovenští přátelé.

A handwritten signature in blue ink that reads "Daneš Burket". The signature is fluid and cursive.

Daneš Burket

předseda redakční rady

Obsah

PŘEDSTAVUJEME

Predstavenie spoločnosti Slovenské elektrárne 4

Príhovor generálneho riaditeľa Slovenských elektrární 10

Ing. Branislav Strýček, MBA

MEDAILONEK VÝZNAMNÝCH OSOBNOSTÍ

Z osobných spomienok na Jožka Kehera 12

Ing. Miroslav Hrehor

PROVOZ A VÝSTAVBA JADERNÝCH ZAŘÍZENÍ

Uvádžanie 3. bloku Atómových elektrární Mochovce do prevádzky 14

Ing. Martin Mráz

Uvádžanie 3. bloku jadrovej elektrárne Mochovce do prevádzky z pohľadu ÚJD SR 20

Ing. Peter Uhrík

Poradné vedecké konzílium a jeho činnosti pri spúšťaní MO3 28

Ing. Miloš Štěpanovský, Ing. Lubomír Krenický, prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc., doc. Ing. Gabriel Farkas, PhD.

Vedecko-technická podpora spúšťania 3. bloku JE Mochovce 32

Ing. Martin Prachár

Historie JE Mochovce 36

Bc. Lukáš Lorenc

EMO34 Transport tlakové nádoby reaktoru a související úpravy konstrukcí 40

Ing. Radek Pazdera, Ing. Libor Gášek

TES s.r.o a jeho úloha ve vědeckotechnické podpoře ÚJD SR při spouštění EMO34. 44

Ing. Jiří Pulec

VZDĚLÁVÁNÍ A ROZVOJ KNOW-HOW

3D model: Jadrová elektrárň VVER-440/V-213 48

Mgr. Róbert Holý

SPOLUPRÁCE, PARTNERSTVÍ A PARTICIPACE

Nuclear Power in France and its Contribution to Reaching EU's Climate Objectives: Yesterday, Today and Tomorrow, Part 1 52

Jan Barták, Noël Camarcat

OKNO DO HISTORIE

Z knihy Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností, 13. část 62

ZAÍMAVOSTI Z DOMOVA I ZE SVĚTA

Jaderné zdroje energie pro vesmír, 6. díl: Využití antihmoty 66

RNDr. Vladimír Wagner, CSc.

AKTUALITY

Výzkumný reaktor LR-0 oslavil čtyřicátiny 78

Na FJFI v Troji spustili v pořadí již desátý jaderný reaktor v ČR 79

Vzpomínka na Ing. Iva Peku, CSc. 80

Smutná zpráva pro jadernou energetiku 81



Uvádzanie 3. bloku Atómových elektrární Mochovce do prevádzky

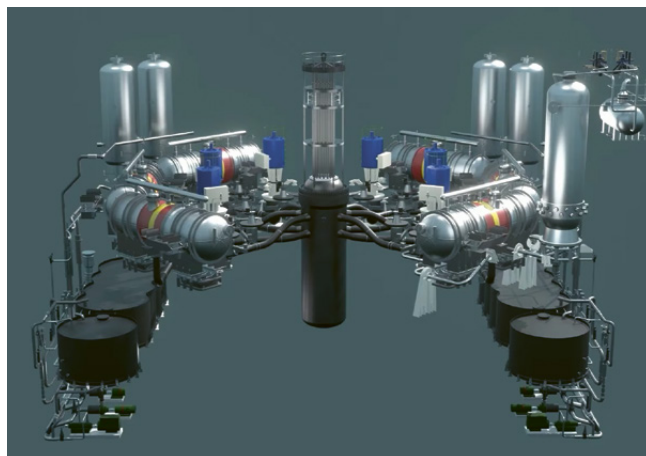
Ing. Martin Mráz

14

EMO34 Transport tlakové nádoby reaktoru a související úpravy konstrukcí

Ing. Radek Pazdera, Ing. Libor Gášek

40



3D model: Jadrová elektrárň VVER 440/V-213

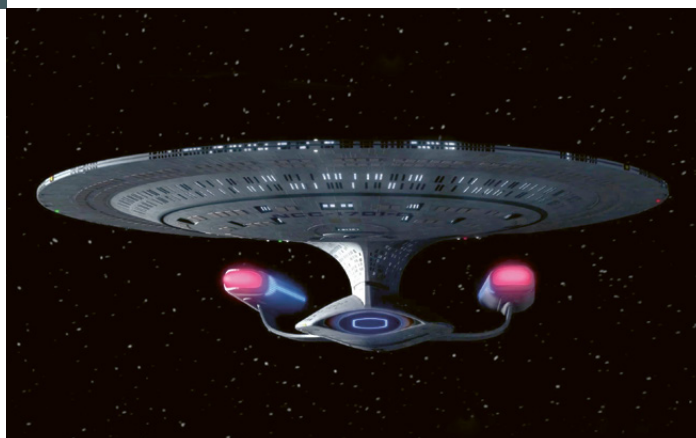
Mgr. Róbert Holý

48

Jaderné zdroje energie pro vesmír 6. díl: Využití antihmoty

RNDr. Vladimír Wagner, CSc.

66



Predstavenie spoločnosti Slovenské elektrárne

Slovenské elektrárne, a.s. vyrábajú približne 70 % všetkej elektriny na Slovensku. Najmä vďaka jadrovým elektrárnám najväčší slovenský výrobca dodáva až 95 % elektriny bez emisií oxidu uhličitého. Za znížovanie emisií sa spoločnosť ako jediná na Slovensku a vo východnej Európe dostala na prestížny index Financial Times: Europe's Climate Leader 2022. Okrem dvoch jadrových prevádzkuje spoločnosť aj 31 vodných, dve tepelné a dve fotovoltaické elektrárne. Ich celkový výkon je 4 143,8 megawattov. Spoločnosť má dvoch akcionárov. Majoritným akcionárom je spoločnosť Slovak Power Holding B.V. (SPH), vlastniaca podiel na základnom imaní vo výške 66,000000523 %. V SPH vlastní 50 % podiel na základnom imaní spoločnosť EP Slovakia B.V. (dcérska spoločnosť skupiny EPH) a 50 % patrí spoločnosti Enel Produzione S.p.A. (dcérska spoločnosť skupiny Enel). Minoritným akcionárom Slovenských elektrární s podielom na základnom imaní 33,999999477 % je Slovenská republika, v mene ktorej koná Ministerstvo hospodárstva SR.

Approximately 70% of all electricity generated in Slovakia comes from Slovenské elektrárne. Thanks to nuclear power plants in particular, Slovakia's largest producer supplies almost 95% of its electricity without emitting carbon dioxide. The company is the only one in Slovakia and Eastern Europe included in the prestigious Financial Times: Europe's Climate Leader 2022 index for reducing emissions. In addition to two nuclear power plants, the company operates 31 hydro, two thermal and two photovoltaic power plants. Their total capacity is 4,143.8 megawatts. The company has two shareholders. The majority shareholder is Slovak Power Holding B.V. (SPH) with 66.000000523 % stake in the share capital. In SPH, EP Slovakia B.V. (a subsidiary of the EPH Group) holds 50 % of the share capital and 50 % belongs to Enel Produzione S.p.A (a subsidiary of the Enel Group). The minority shareholder of Slovenske elektrárne, with a 33,999999477 % share in the share capital, is the Slovak Republic, on behalf of which acts the Ministry of Economy of the Slovak Republic.



Hlavnou činnosťou spoločnosti Slovenské elektrárne, a.s., je výroba a predaj elektrickej energie. S podielom približne 70 % na celkovej výrobe elektriny na Slovensku je spoločnosť najväčším tunajším výrobcom elektriny a jedným z najväčších v strednej Európe. Okrem toho vyrába a predáva teplo a poskytuje podporné služby pre elektrizačnú sústavu.

Slovenské elektrárne prevádzkujú 31 vodných, dve jadrové, dve tepelné a dve fotovoltaické elektrárne s celkovým inštalovaným výkonom 4 143,8 MW_e.

Ciele spoločnosti

Cieľom spoločnosti je bezpečne, spoľahlivo, efektívne a konkurencieschopne vyrábať, predávať elektrinu a teplo a obchodovať s nimi, bezpečne zaobchádzať s rádioaktívnymi od-

padmi a vyhoreným jadrovým palivom a trvalo znižovať vplyvy výrobných procesov na životné prostredie. V roku 2022 boli Slovenské elektrárne po druhýkrát zaradené medzi európskych klimatických lídrov podľa prestížneho denníka Financial Times (Europe's Climate Leaders) a patrili tak medzi tridsiatku najlepších spoločností energetického sektora Európy. Firma dlhodobo a zodpovedne rieši problematiku environmentálnych záťaží vo svojich prevádzkach.

Jadrové elektrárne

Štyri prevádzkované bloky v Jaslovských Bohuniciach (EBO) a Mochovciach (EMO) majú tlakovodné reaktory VVER-440 s vysokou úrovňou bezpečnosti, ktorú zaisťuje robustný projekt s 1,5 m hrubou železobetónovou obál-



Obr. 1 Inštalácia horného bloku reaktora na jadrovej elektrárne Mochovce 3 (zdroj Slovenské elektrárne, a.s.)





↑
Obr. 2 Solárna a jadrová elektrárň Mochovce (zdroj Slovenské elektrárne, a.s.)

kou, tzv. kontejnmentom, veľký objem vody na chladenie a trojnásobne zálohované pasívne a aktívne bezpečnostné systémy. Na všetkých blokoch sú zrealizované aj najnovšie, tzv. postfukušimské opatrenia na zvládnutie ťažkých havárií.

Výroba elektriny z štyroch 500-megawatových blokov v roku 2022 dosiahla 15 920 GWh a čistá dodávka do siete dosiahla 14 729 GWh. Jadrové bloky spoľahlivo celoročne poskytujú aj podporné služby – zápornú terciárnu reguláciu výkonu a sekundárnu reguláciu napätia. V lokalitách oboch jadrových elektrární poskytujú podpornú službu, zápornú sekundárnu reguláciu výkonu, aj elektrokotle, ktoré nahradili pôvodné kotolne v obidvoch jadrových zariadeniach.

3. a 4. blok Mochovce

Dostavba 3. a 4. bloku jadrovej elektrárne Mochovce (MO34) je najväčšou súkromnou investíciou na Slovensku. Po uvedení do prevádzky budú spolu pokrývať približne 26 %

spotreby elektriny na Slovensku. Výkon každého bloku je 471 MW, s predpokladom zvýšenia výkonu na viac než 500 MW v ďalších rokoch. Použitou technológiou je tlakovodný reaktor VVER-440/V-213.

Výstavba nových blokov predstavuje najväčšiu súkromnú investíciu v histórii Slovenska, na ktorej sa okrem slovenských firiem podieľajú aj renomované zahraničné spoločnosti. Stavba je jedným z najväčších a najvýznamnejších projektov, ktorý priniesol na Slovensko množstvo pracovných príležitostí. Na projekte priamo v Mochovciach bolo v čase vrcholiacich prác takmer 7 000 pracovníkov. Mochovce vytvorili spolu až 15 000 pracovných miest – priamych, nepriamych a vyvolaných. Bezpečnosť výstavby je najvyššou prioritou projektu. Na stavbe MO34 bolo ku koncu roka 2022 odpracovaných vyše 112 mil. človekohodín a v štatistike úrazovosti dosahuje projekt polovičnú hodnotu priemeru EÚ v stavebníctve.

Pre tretí blok Mochoviec Úrad jadrového dozoru SR vydal 25. augusta 2022 definitívne



povolenie na uvádzanie do prevádzky. Slovenské elektrárne v septembri 2022 zaviezli palivo, prešli do fázy fyzikálneho spúšťania, v októbri 3. blok Mochoviec dosiahol minimálny kontrolovaný výkon a v roku 2023 ho čaká ukončenie uvádzania do prevádzky. Na 4. bloku bol ku koncu roka 2022 dosiahnutý fyzický postup prác na 91,17 %. Ich spúšťanie sa predpokladá dva roky po treťom bloku.

Vodné elektrárne

Sumárny inštalovaný výkon vodných elektrární v portfóliu Slovenských elektrární je 1 653 MW, čo je približne 40 % z celkového inštalovaného výkonu Slovenských elektrární. Z toho je v prietochných vodných elektrárnach inštalovaných 736,6 MW a v prečerpávacích vodných elektrárnach 916,4 MW (Čierny Váh 734,4 MW, Liptovská Mara 98 MW, Dobšiná 24 MW a Ružín 60 MW). K tomu do 10. marca 2015 Slovenské elektrárne prevádzkovali VE Gabčíkovo s celkovým inštalovaným výkonom 746,54 MW a od tohto dňa prevádzku

prevzal Vodohospodársky podnik, š.p. Podiel vodných elektrární na ročnej výrobe elektrickej energie Slovenských elektrární dosahuje v priemere asi 11 %.

Vodné elektrárne – svojou prevádzkovou pružnosťou s možnosťou rýchlych zmien výkonov – sú schopné pokrývať prudko sa meniace požiadavky na výkon v špičkovej časti denného diagramu zaťaženia a tým sú vhodné aj na pokrývanie havarijných stavov v elektrizačnej sústave. Navyše ide o bezemisný zdroj elektriny.

Tepelné elektrárne

Závod hnedouhoľnej Elektrárne Nováky (ENO) so sídlom v Zemianskych Kostolnoch sa nachádza v blízkosti Nováckych uhoľných baní v okrese Prievidza. Okrem výroby a dodávky elektrickej energie zabezpečujú Elektrárne Nováky dodávku horúcej vody na vykurovanie miest Prievidza, Nováky, Zemianske Kostolany ako aj pre priemyselné a iné organizácie a pary pre dodávku tepla okolitým



Obr. 3 Jadrová elektráreň Bohunice (zdroj Slovenské elektrárne, a.s.)



↑
Obr. 4 Prečerpávacía vodná elektrárň Čierny Váh (zdroj Slovenské elektrárne, a.s.)

priemyselným podnikom. Elektrárne pracujú v elektrizačnej sústave v základnom a pološpičkovom režime. Svojím inštalovaným výkonom 266 MW_e predstavujú približne 6 % inštalovaného výkonu akciovej spoločnosti Slovenské elektrárne. V rámci odklonu od uhlia Elektrárň Nováky ukončí svoju prevádzku ku koncu roka 2023.

Elektrárne Nováky musia vykupovať domáce hnedé uhlie a elektrinu vyrábať a dodávať v rámci tzv. všeobecného hospodárskeho záujmu. V roku 2022 vyrobili 851 GWh a do siete dodali 682 GWh. Výroba aj dodávka zaostala za plánom predovšetkým pre nízke dodávky hnedého uhlia od spoločnosti HBP. Výpadok museli elektrárne nahradiť hnedým uhlím z Českej republiky. Napriek tomu sa deficit vo výrobe nepodarilo dohnať. Novácke bloky poskytujú aj primárnu, resp. sekundárnu reguláciu výkonu.

Závod Elektrárne Vojany sa nachádza na východnom Slovensku v okrese Michalovce. Celkový inštalovaný výkon prevádzkovaných blokov je 2× 110 MW. Výhodná poloha v blí-

kosti ukrajinských hraníc, maximálne skrátenie širokorozchodnej trate poloantracitového uhlia z Donbasko-Kuzbeckej ťažobnej oblasti a možnosť odberu chladiacej vody z Laborca boli najdôležitejšími kritériami pre rozhodnutie o výstavbe tejto tepelnej elektrárne. V súčasnosti, v rámci odklonu od uhlia, je už od roku 2009 do paliva pridávaná biomasa – drevná štiepka. Pre udržanie výroby elektrárne testuje prechod na tzv. tuhé druhotné palivo.

Fotovoltaické elektrárne

Slovenské elektrárne majú od marca 2010 v prevádzke dve fotovoltaické elektrárne, a to v Mochovciach a vo Vojanoch, každú s výkonom 1 MW. Za rok prevádzky každá z nich ušetrí približne 1 200 až 1 300 ton skleníkového plynu CO₂ v porovnaní s výrobou elektriny z uhlia. Slovenské elektrárne plánujú postaviť nové, výkonom aj rozlohou najväčšie fotovoltaické elektrárne na Slovensku. Vo Vojanoch sa fotovoltaický park bude rozkladať na ploche skoro 22 hektárov a jeho výkon bude 17 megawattov, výkon parku v Novákoch má byť až



23 megawattov na 26 hektároch.

Výroba tepla

Výroba tepla je založená prevažne na kombinovanej výrobe elektriny a tepla. V roku 2022 Slovenské elektrárne vyrobili 770 GWh tepla pre teplárenské účely. Z tohto, výroba tepla v lokalite EBO predstavovala 442 GWh a v lokalite ENO 233 GWh, V ostatných lokalitách bolo spolu vyrobených 95 GWh.

Akcionári

Akciová spoločnosť Slovenské elektrárne vznikla 21. januára 2002 ako nový subjekt z majetkovej podstaty a právny následník Slovenských elektrární, a.s., od ktorých bola k tomuto dátumu oddelená Prenosová sústava a Tepláreň Košice.

Vlastníkom akcií Slovenských elektrární sú Slovenská republika s podielom 34 % (v mene štátu koná Ministerstvo hospodárstva Slovenskej republiky) a spoločnosť Slovak Power

Holding BV (SPH) s podielom 66 %. Energetický a priemyslový holding, a.s., 28. júla 2016 uzavrel prvú fázu vstupu do Slovenských elektrární a stal sa päťdesiatpercentným akcionárom spoločnosti SPH, vrátane manažérskej kontroly. Zvyšných 50 % SPH ostalo zatiaľ vo vlastníctve skupiny Enel.

Slovenské elektrárne zamestnávali k 31. decembru 2022 spolu 3 873 zamestnancov, z toho 604 žien. Počet odpracovaných rokov na jedného zamestnanca bol v roku 2022 priemerne 18 rokov, čo znamená, že zamestnanci majú dlhoročné skúsenosti, rokmi nadobudnutú odbornosť a špecifické know-how. O tom, že zamestnanci spoločnosť považujú za stabilného zamestnávateľa, svedčí aj dlhodobá nízka miera dobrovoľnej fluktuácie a trojnásobné víťazstvo (2022, 2021, 2020) v ankete Najzamestnávateľ, ktorú vyhlasuje najväčší zamestnávateľský portál na Slovensku – Profesia.sk.



Obr. 5 Tepelná elektrárna Vojany (zdroj Slovenské elektrárne, a.s.)

Príhovor generálneho riaditeľa Slovenských elektrární

Ing. Branislav Strýček, MBA
Slovenské elektrárne, a.s.

Energetický sektor zažíva v poslednom období veľmi mnoho zmien, máme za sebou jeden z najnáročnejších rokov v histórii. Museli sme čeliť dôsledkom energetickej krízy, nestability na burzách s elektrinou a následných výrazných zásahov vlád do fungovania trhu, ktoré nás významne zasiahli. Slovenské elektrárne však zažívajú zároveň aj jeden z najdôležitejších momentov v histórii – uvádzanie nového jadrového bloku do prevádzky. Je to mimoriadne dôležitá správa pre nás, ale aj celé Slovensko. Mochovce 3 a 4 sú jedným z najväčších a najkomplexnejších projektov v Európe za posledné dve desaťročia.

V procese spúšťania 3. bloku Mochoviec sme zaznamenali viacero dôležitých momentov, s čitateľom by som sa rád a s hrdosťou podelil aspoň o tie najzásadnejšie. Tým prvým bolo získanie povolenia Úradu jadrového dozoru (ÚJD) pre uvádzanie 3. bloku jadrovej elektrárne Mochovce do prevádzky. Správa, ktorú sme obdržali 25. augusta 2022 bola výsledkom obrovského úsilia a spolupráce veľkého tímu ľudí. O náročnosti procesu svedčí, že rozhodnutie ÚJD malo takmer 140 strán, na ktorých sa úrad veľmi detailne zaoberal technickými a legislatívnymi požiadavkami, preveril a vysporiadal sa so všetkými vznesenými pripomienkami, námietkami a podnetmi.

Povolenie pre uvádzanie 3. bloku jadrovej elektrárne Mochovce do prevádzky nadobudlo právoplatnosť a vykonateľnosť podpisom predsedníčky ÚJD, pani Marty Žiakovej, 9. septembra 2022 krátko po polnoci, symbolicky priamo na reaktorovej sále 3. bloku. Po odovzdaní po-

volenia do rúk riaditeľa elektrárne Martina Mráza sme mohli pristúpiť k zavezeniu prvej palivovej kazety do reaktora.

Prvú kazetu sme zaviezli o 01:16. Napriek skorým ranným hodinám si spolu so zamestnancami elektrární, predstaviteľmi Úradu jadrového dozoru a ďalších dôležitých inštitúcií tento moment nenechali ujsť ani predstavitelia vlády či predsedníčka českého Štátneho úradu pre jadrovú bezpečnosť, pani Dana Drábová, a ďalší hostia. Napokon, bol to moment, na ktorý sme na Slovensku čakali od spustenia projektu v roku 2008.

Dosiahnuť tento mílnik by nebolo možné bez zamestnancov Slovenských elektrární, našich dodávateľov a odborníkov z európskeho jadrového priemyslu, najmä zo Slovenska a Českej republiky.

Dátum 22. október 2022 si Slovenské elektrárne zapísali do kalendára ako deň, keď nový jadrový blok v Mochovciach dosiahol minimálny kontrolovaný výkon. Bol to ďalší dôležitý mílnik pri spúšťaní – mohli sme oznámiť, že jadrové palivo v reaktore ožilo a reaktor sme uviedli po prvý raz do života.

Prvý mesiac tohto roka, 31. januára 2023, sme do životopisu nášho nového jadrového bloku zapísali ďalší významný moment, prifázovanie prvého turbogenerátora do siete. Nasledoval druhý turbogenerátor 4. februára.

Prifázovaním turbogenerátorov do elektrizačnej sústavy Slovenskej republiky sme prvýkrát reálne naplnili poslanie jadrovej elektrárne, teda bezpečne a spoľahlivo udržiavať



reťazovú štiepnu reakciu, ako aj dodávať reálne elektrinu spotrebiteľom.

Postupne sme v priebehu roku prechádzali jednotlivými etapami energetického spúšťania s výkonovou hladinou reaktora do 20, 35, 55, 75 a 90 %, pri ktorých sa vykonávali skúšky podľa harmonogramu uvádzania nového bloku do prevádzky. Po úspešnom vykonaní skúšok na týchto výkonových hladinách sme 22. septembra zvýšili výkon reaktora na 100 %.

Úplnú funkčnosť bloku a dosiahnutie projektových parametrov potvrdí úspešné ukončenie fázy 144-hodinového preukazného chodu na stopercentnom výkone. Po uvedení 3. bloku do skúšobnej prevádzky sa už naša plná pozornosť bude sústreďovať na dostavbu a proces spúšťania 4. bloku Mochoviec.

Nový jadrový blok v Mochovciach bude mať pri spustení inštalovaný výkon 471 megawattov,

čo pokryje približne 13 % z celkovej spotreby elektriny Slovenska. Z pohľadu výroby elektriny sa tak Slovensko už tento rok stane energeticky sebestačné.

Navyše, ide o bezemisný zdroj energie, čo je dôležité zdôrazniť v čase, keď čoraz viac čelíme dôsledkom klimatickej krízy. Najmä vďaka jadru v našom energetickom mixe Slovenské elektrárne dodávajú do siete 95 % elektriny bez emisií skleníkových plynov. Ročná produkcia tretieho bloku ušetrí 2,6 miliónov ton emisií oxidu uhličitého, teda zhruba toľko, ako keby zo slovenských ciest zmizlo viac ako milión osobných a nákladných áut. Uvedenie 3. bloku (a následne 4. bloku) jadrovej elektrárne v Mochovciach do prevádzky významne prispeje k plneniu záväzkov Slovenska a EÚ dosiahnuť uhlíkovú neutralitu do roku 2050.



Obr. 1 Panorama jadrovej elektrárne Mochovce s tretím blokom v prevádzke (zdroj Slovenské elektrárne, a.s.)



Ing. Branislav Strýček, MBA

branislav.strycek@seas.sk

Je členom a predsedom predstavenstva a generálnym riaditeľom Slovenských elektrární (SE). Do SE nastúpil v roku 2005 ako zástupca finančného riaditeľa a bol zodpovedný za reorganizáciu finančného úseku. V roku 2007 prevzal pozíciu finančného riaditeľa a od roku 2009 bol členom predstavenstva. Významným spôsobom prispel k úspešnej reštrukturalizácii spoločnosti po jej privatizácii v roku 2006. V roku 2011 bol Branislav Strýček

vymenovaný za finančného riaditeľa medzinárodnej divízie skupiny Enel so sídlom v Ríme. Po jeho návrate na Slovensko bol vymenovaný za podpredsedu predstavenstva spoločnosti (2012–2016) a ujal sa pozície riaditeľa obchodu, trhu, dispečingu a regulácie. Riadil aj podnikateľské aktivity v oblasti veľkoobchodného aj maloobchodného predaja na Slovensku, v Čechách, Poľsku a Maďarsku.

Z osobných spomienok na Jožka Kehera

Ing. Miroslav Hrehor



Ing. Jozef Keher

Jozef Keher (*1935) absolvoval Strojnícku fakultu SVŠT v Bratislave (1959) a tiež postgraduálne štúdium na ČVUT v Prahe. V roku 1967 nastúpil na JE A1 Bohunice ako vedúci technologického odboru. Od roku 1972 pracoval vo funkcii námestníka riaditeľa EBO pre prevádzku a techniku a riadil spúšťanie JE A1. V rokoch 1978–1981 pracoval na FMTIR ako námestník ministra v odbore jadrovej energetiky. V rokoch 1982–1990 bol námestníkom federálneho ministra palív a energetiky a bol vládny splnomocnencom pre výstavbu jadrových elektrární. V rokoch 1991–1992 pracoval ako poradca na FMH ČSR. V roku 1996 prešiel do JE Mochovce. Za zásluhy o rozvoj jadrovej energetiky mu SNUS v roku 1998 udelila Čestný diplom SNUS a stal sa členom sekcie seniorov. Je jedným zo zakladajúcich členov SJF a držiteľom pamätnej medaily SJF. Dnes žije na dôchodku v Piešťanoch.

Profesionálny život Jožka Kehera bol spojený s výstavbou a prevádzkou jadrovej elektrárne A1. Tento program bol nakoniec po havárii A1 ukončený prechodom na bloky VVER. V diskusiách odborníkov i laikov dodnes zaznievajú protichodné názory na to, či bol program A1 z pohľadu ďalšieho rozvoja jadrovej energetiky prínosný, alebo neúspešný. Jožko patrili ku generácii odborníkov, ktorí verili, že program A1 naštartoval rozvoj jadrovej energetiky v Československu. Koordinovaným úsilím veľkého počtu organizácií zapojených do návrhu projektu JE A1, výroby jej komponentov, výstavby a nakoniec i prevádzky pomohol vytvoriť široký káder odborníkov všetkých profesií nutných pre zvládnutie jadrovej energetiky. Jednoducho povedané, na tomto projekte vyrástla celá jedna generácia jadrových odborníkov, ktorá plynule prešla do

realizácie jadrového programu na báze reaktorov VVER. Z tohto pohľadu sa dá program A1 považovať za mimoriadne prínosný a užitočný.

Z pozície zmocnenca vlády pro výstavbu jadrových elektrární zodpovedal Jozef Keher za výstavbu všetkých blokov v bývalom Československu. Jeho riadiacich štábov sa okrem hlavných dodávateľov pravidelne zúčastňovali i zástupcovia štátneho dozoru ČSKAE, ktorí niekedy vystupovali i s kritickými stanoviskami a občas mu spôsobovali vrásky na čele, zvlášť keď niektoré stanoviská poukazujúce na technické nedostatky behom výstavby ohrozovali plánované termíny výstavby a spúšťania jednotlivých blokov. Jožko nakoniec vždy našiel so štátnym dozorom kompromis, pretože pochopil, že tlak na čo najvyššiu kvalitu realizácie našich jadrových



Obr. 1 Odovzdávanie 1. bloku jadrovej elektrárne Dukovany do prevádzky v roku 1985 – zľava: Jozef Keher, Miroslav Lenk a riaditeľ elektrárne Bohumil Vincenc (zdroj Skupina ČEZ, brožúra Jaderná elektrárna Dukovany včera, dnes a zíttra)



Obr. 3 Jozef Keher a Mária Ďurišová na otvorení informačného centra jadrovej elektrárne A1 6. decembra 2022 (zdroj Jadrová a vyradňovacia spoločnosť, a. s.)



blokov je k prospechu veci a prispel k tomu, že tieto bloky sú i dnes po toľkých rokoch stále bezpečné.

Jožko bol ako zmocnenec vlády vedľa výstavby jadrových blokov poverený i vypracovaním návrhu zákona o štátnom dozore nad jadrovou bezpečnosťou. Povolal k tomu dr. A. Ševčíka, bývalého námestníka ministra FMPE. Zákon bol vydaný pod číslom 28 v roku 1984 a bol na svoju dobu veľmi moderný, lebo dával už vtedy štátnemu dozoru významné právomoci, vrátane možnosti zastaviť prevádzku jadrového bloku.

Ako je možné, že Jožko dal „zelenú“ takému zákonu, ktorý umožnil vznik silného protihráča v realizácii jadrového programu v Československu? Jožko si nepochybne už vtedy, s ohľadom na vývoj vo svete, uvedomoval, že jadrová energetika u nás sa neobí-

de bez náročnej kontroly štátu nad všetkými fázami jej realizácie. Preto chcel od autorov tohoto zákona, aby štátny dozor bol v našom jadrovom programe silným partnerom, ktorý bude mať potrebnú autoritu a všetky právomoci nutné k účinnému výkonu kontroly jadrovej bezpečnosti. To kolektív autorov pod vedením dr. Ševčíka splnil. Je preto osobitnou zásluhou Jožka Kehera, že Zákon č. 28/1984 Sb. bol z tohto pohľadu na svoju dobu v štátoch bývalého sovietskeho bloku výnimočný.

Osobne cítim, že si Jožko Keher za svoj celoživotný prínos jadrovej energetike Československa zaslúži hlboké uznanie.



Obr. 2 Jozef Keher (druhý sprava) na Prvom stretnutí „otcov zakladateľov“ ktoré sa konalo 2. apríla 2008 v Piešťanoch (zdroj Slovenská nukleárna spoločnosť)

Uvádžanie 3. bloku Atómových elektrární Mochovce do prevádzky

Ing. Martin Mráz

Slovenské elektrárne, a.s., závod elektrárne Mochovce

Článok je komplexným chronologickým zhrnutím obdobia uvádzania 3. bloku Atómových elektrární Mochovce do prevádzky – od vydania prvostupňového rozhodnutia Úradu jadrového dozoru SR, cez zavezenie prvej palivovej kazety do reaktora, dosiahnutie prvej kritičnosti až po energetické spúšťanie na rôznych výkonových hladinách reaktora. Obsahuje osobný pohľad riaditeľa AE Mochovce, Martina Mráza, na celý proces prípravy spúšťania a všetky jeho etapy s rôznymi výzvami, ktoré uvádzanie bloku do prevádzky prinieslo a museli sa okamžite riešiť.

The article is a comprehensive chronological summary of the period of the Mochovce Nuclear Power Plant Unit 3 commissioning – from the issuance of the first-instance decision of the Nuclear Regulatory Authority of the Slovak Republic, through the first fuel loading into the reactor, the first criticality achievement, up to the power start-up tests at various reactor power levels. It contains a personal view of the Mochovce NPP Director, Martin Mráz, on the whole process of preparation for the start-up and all its stages with various challenges that the commissioning of the unit brought and had to be solved immediately.

Krátko z histórie projektu

Atómové elektrárne Mochovce boli od začiatku projektované ako štvorbloková elektrárňa. Výstavba 1. a 2. bloku začala v roku 1981 zemnými výkopovými prácami a výstavba 3. a 4. bloku v roku 1987. Začiatkom 90-tych rokov boli však práce postupne prerušené kvôli nedostatku financií. Dokončovacie práce na prvých dvoch blokoch sa znova rozbehli v roku 1996 a uvedené do prevádzky boli v rokoch 1998, resp. 2000.

O dostavbe 3. a 4. bloku elektrárne Mochovce (MO34) sa začalo hovoriť až po privatizácii Slovenských elektrární talianskou nadnárodnou spoločnosťou Enel. Projekt dostavby sa oficiálne začal v novembri 2008 mobilizáciou dodávateľského reťazca, pričom hlavné zmluvy pre jadrovú časť, sekundárnu časť a pre systém kontroly a riadenia boli podpísané v roku 2009 a následne sa rozbehli práce. Dostavby sa zúčastnilo asi 450 dodávateľských subjektov. V čase vrcholu výstavby v Mochovciach na stavenisku MO34 pracovalo takmer 7 000 pracovníkov, ktorí spolu od začiatku dostavby odpracovali doteraz viac ako 115 mil. človekohodín.

Povolenie uvádzania do prevádzky

Pre 3. blok Mochoviec Úrad jadrového dozoru SR zverejnil návrh druhostupňového rozhodnutia 24. januára 2022. Po overení splnenia všetkých technických a legislatívnych požiadaviek, Úrad jadrového dozoru SR vydal 25. augusta 2022 druhostupňové rozhodnutie, t. j. povolenie pre uvádzanie jadrového zariadenia AE Mochovce 3. blok do prevádzky, ako aj súvisiace povolenia k príprave na zavezenie paliva. Slovenské elektrárne tak preukázali úspešné splnenie všetkých technických kontrol, skúšok, testov systémov a zariadení, ako aj pripravenosť na fázu fyzikálnych a energetických testov. Následne sa spustilo viacero prípravných činností, ktoré bolo potrebné zabezpečiť pred samotným zavezením paliva.

Samotné rozhodnutie sa nerodilo ľahko. Nešlo iba o technické posúdenie materiálov potrubných dielov alebo zvarových spojov; okrem technického pohľadu bolo v rámci povolenieho procesu nevyhnutné obstať aj v otázkach týkajúcich sa posudzovania vplyvu na bezpečnosť prevádzky blokov.

V konečnom dôsledku Úrad jadrového dozoru SR konštatoval, že pri preskúvaní námietok nevyšli najavo žiadne také skutočnosti, ktoré by zásadným spôsobom menili podstatu veci, na ktorej bola založená úvaha a rozhodovanie prvostupňového orgánu. Pri tejto príležitosti by som rád vyzdvihol prístup Úradu jadrového dozoru SR; jeho odborníci, ktorí pracovali na posudzovaní pripravenosti 3. bloku AE Mochovce na uvedenie do prevádzky, boli mimoriadne profesionálni, čo významnou mierou pomohlo k tomu, že prevádzka 3. bloku je a bude bezpečná.

Zavezenie prvej palivovej kazety do reaktora

Niekoľko minút po polnoci, po potvrdení právoplatnosti povolenia predsedníčkou Úradu jadrového dozoru SR, pani Martou Žiakovou, priamo na reaktorovej sále 3. bloku, sa 9. septembra 2022 začal zo skladu čerstvého paliva 3. a 4. bloku AE Mochovce prepravovať cez reaktorovú sálu pomocou žeriavu kontajner s prvými palivovými kazetami. Prvá kazeta bola zavezená do reaktora o 01:16 h. Bol to moment, ktorý pre nás jadrárov znamenal veľmi veľa. Po 23 rokoch sme boli opäť v stave uvádzania jadrového bloku do prevádzky. Bol to akýsi pocit zadosťučinenia, pocit hrdosti a napriek aktuálnemu času (1 hodina po polnoci) sme neboli unavení, naopak, plní energie. Boli sme nadšení, že začína etapa spúšťania, že blok bude slúžiť tomu, na čo bol postavený, a teda že bude vyrábať elektrickú energiu. Zavezením prvej palivovej kazety sa začala nielen etapa fyzikálneho spúšťania, ktorá bola rozdelená na dve podetapy, ale blok 3 AE Mochovce sa stal jadrovým zariadením a začali nám platiť limity a podmienky pre prevádzku, jednoducho povedané „skončila výstavba a začala prevádzka“.

Prvá podetapa fyzikálneho spúšťania zahŕňala okrem zavezenia jadrového paliva do reaktora a montáže reaktora po zavezení všetkých 349 palivových kaziet do aktívnej zóny aj prípravu na testy fyzikálneho spúšťania. Po zavezení kaziet bola 20. septembra ukončená montáž reaktora. Z pohľadu prípravy bloku na prevádzku pokračovali tzv. predkritické testy, ktoré zahŕňali tesnostné a pevnostné skúšky primárne-



↑
Obr. 1 Zavážací stroj (zdroj Slovenské elektrárne, a.s.)



←
Obr. 2 Prvé palivové kazety sa presúvajú z uzla čerstvého paliva do reaktora (zdroj Slovenské elektrárne, a.s.)

ho okruhu, parogenerátorov a hermetickej zóny. Tieto testy potvrdili pripravenosť jadrového zariadenia 3. bloku na prevádzku. Za spomenutie stojí hlavne veľmi dobrý výsledok tesnosti hermetickej zóny. Poslednou časťou predkritických testov boli funkčné skúšky bezpečnostných systémov kontroly a riadenia (SKR), ktorými sme potvrdili komplexnú pripravenosť bloku na druhú podetapu – kritické testy.

Druhú podetapu sme začali v podvečer, piatok 21. októbra 2022 prípravou na prvý kritický test – „prvé uvedenie reaktora do kritické-

ho stavu". Samotný prvý kritický stav reaktora sme dosiahli v sobotu 22. októbra 2022 o 21:38. Priebeh dosahovania je vidieť na obrázku, kde sú pre pamiatku podpísaní účastníci dosiahnutia kritického stavu. Toto bol druhý moment procesu spúšťania, ktorý bol z istého pohľadu výnimočný. Dosiahnutie kritického stavu, teda začiatok kontrolovanej štípanej reťazovej reakcie a začiatok výroby tepla z jadrového reaktora znamená, že sme potvrdili, že sme schopní spoľahlivo riadiť reaktor.

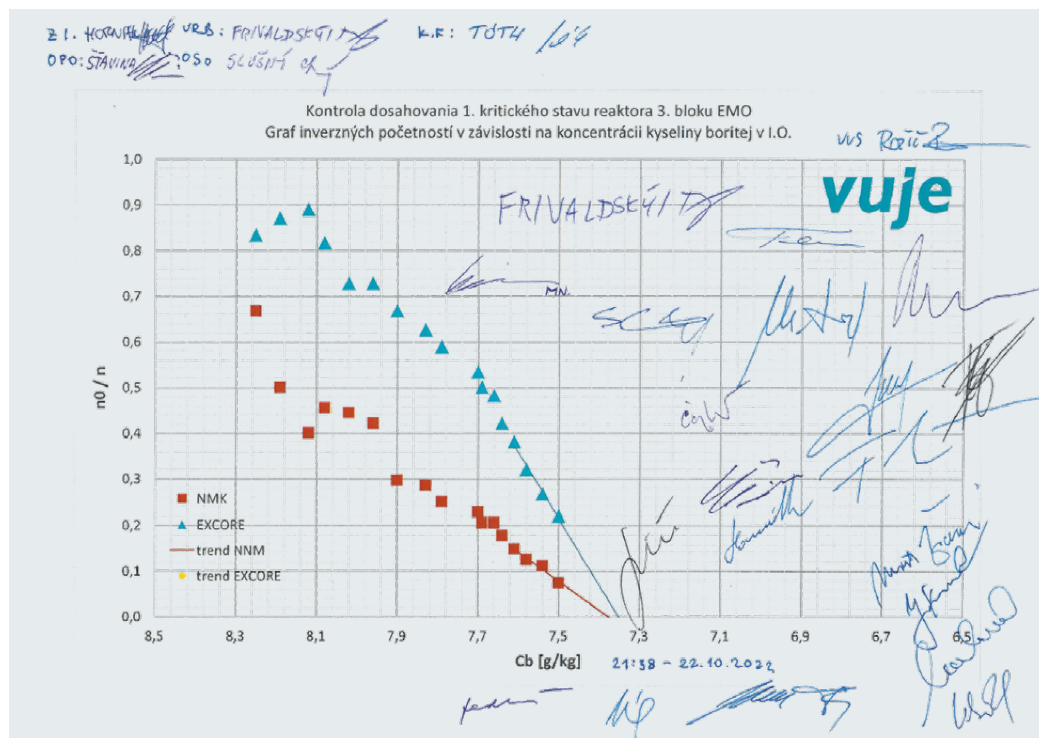
V tejto fáze sme začali realizovať testy fyzikálneho spúšťania z pohľadu overenia vlastností aktívnej zóny a samozrejme najprv pri teplote 200 °C. Tímy, ktoré sa pripravovali dlhodobo na spúšťanie, mohli naplno ožiť. Či už to bol prevádzkový personál, „spúšťači“ od nás z AE Mochovce, ale aj kolegovia z VUJE, ktorí zabezpečovali vedecké vedenie spúšťania a samotné vedenie skúšok jednotlivých testov. Na mnohých z testov som bol osobne prítomný, z pohľadu celoživotného jadrára boli všetky veľmi zaujímavé – nielen ich priebeh, ale aj spracovanie nameraných dát a ich vyhodnocovanie. Fyzikálne testy sa meraním teplotného koeficientu reaktivity presunuli neskôr na teplotnú úroveň 260 °C, kde sa opätovne overili vlast-

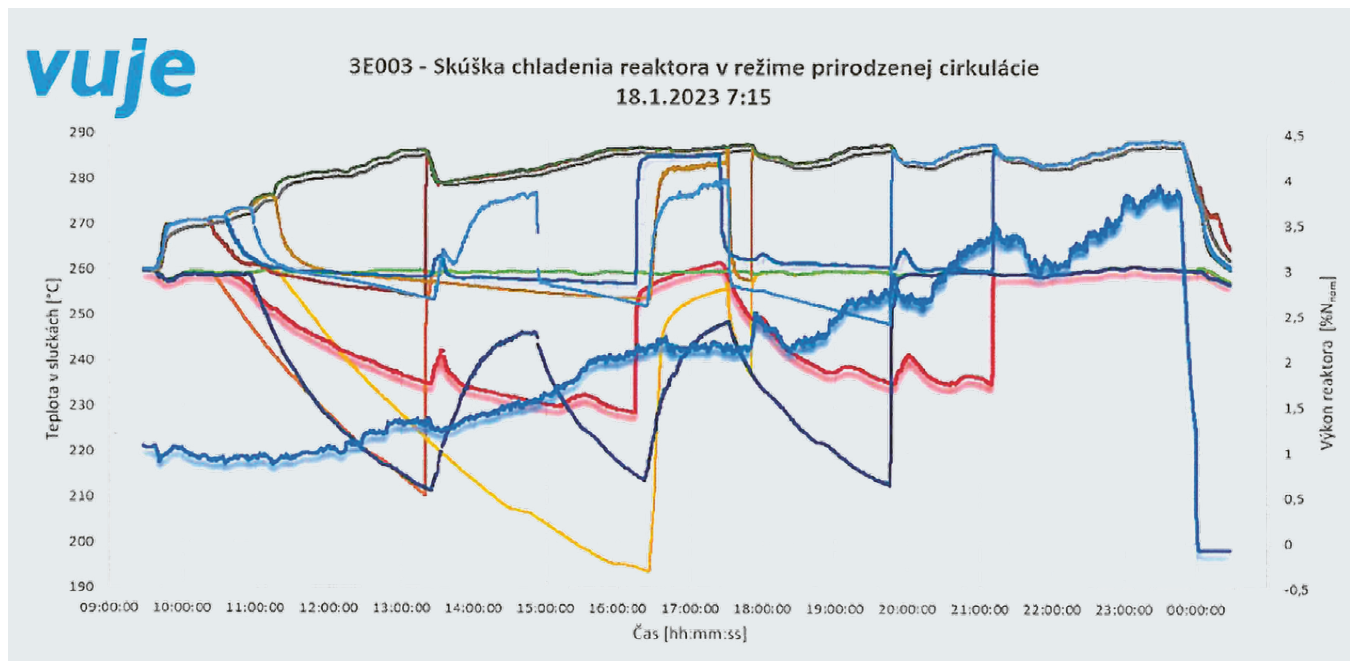
nosti aktívnej zóny pri týchto parametroch. Samotná realizácia celého fyzikálneho spúšťania sa predĺžila, čo ma však upokojuje je správnosť našich rozhodnutí z pohľadu jadrovej bezpečnosti. Tu sme neuhli ani milimeter, aj keď nás to stálo niekoľkotýždňové posunutie v harmonograme. Fyzikálne spúšťanie bolo ukončené posledným testom 7. januára 2023. Jeho priebeh a najmä výsledky testov ukázali správnosť správanie sa celého bloku v zmysle projektu, v tejto fáze najmä zariadení primárneho okruhu a reaktora.

Správu o výsledkoch fyzikálneho spúšťania Slovenské elektrárne odovzdali Úradu jadrového dozoru SR, ktorý 13. januára 2023 vydal súhlas na ďalšiu etapu uvádzania jadrového zariadenia do prevádzky – energetické spúšťanie.

Energetické spúšťanie

V tejto etape uvádzania do prevádzky sa zvyšuje výkon reaktora v prvom kroku na 5 % a vykonávajú sa ďalšie testy. Simulujú sa aj situácie, ktoré elektrárne v bežnej prevádzke pravdepodobne nikdy nezažije. Výkonová hladina sa postupne zvyšuje (na 20, 35, 55, 75 a 90 %) až do dosiahnutia 100 % nominálneho výkonu.





Pri každej výkonovej hladine sa vykonáva séria vopred naplánovaných a Úradom jadrového dozoru SR schválených testov.

Ďalším významným míľnikom bol prechod na tzv. výkonovú prevádzku. Prechod bloku do REŽIMU 1, a teda zvýšenie výkonu bloku (reaktora) nad 2 % nominálneho, sa uskutočnil 15. januára 2023 zhruba o 3. hodine ráno. Nasledovali testy na 5 % výkonovej hladine, kde sme sa sústredili hlavne na test odvodu tepla z reaktora v režime prirodzenej cirkulácie. To je test, ktorý nám má ukázať, že keď stratíme „elektrinu“ pre hlavné cirkulačné čerpadlá, dokážeme odvieť teplo z aktívnej zóny. Test bol posledný na tejto hladine, dopadol veľmi dobre, t. z. teplo odviezol v požadovanom množstve. Tým sme sa mohli posunúť na ďalšiu výkonovú hladinu, a to 20 % nominálneho výkonu.

Na 20 % výkonovej hladine sme ako prvé otestovali vlastnosti aktívnej zóny reaktora a prvýkrát sme overili vlastnosti vytypovaných regulačných obvodov sekundáru, nakoľko to dovolili parametre z pohľadu objemu ale aj ich kvality. Na záver tejto výkonovej hladiny, keď parogenerátory produkovali už dostatočné množstvo pary, sme pristúpili ku skúškam na turbínach a začali s prípravou na ich prvé roztočenie. To prebehlo cez víkend 28. a 29. januára 2023 a postupne sme stáli na 500, 1 300 a na-

koniec na 3 000 otáčkach za minútu. S veľkou hrdosťou konštatujem, že nábeh oboch turbín parou z parogenerátorov bol bezchybný. Následne, v utorok 31. januára 2023, 3 minúty pred 23. hodinou, bol prvý turbogenerátor prvýkrát prifázovaný k elektrizačnej sústave SR a do siete tak začali tiecť prvé megawatthodiny nízko-uhlíkovej elektriny. Toto bol ďalší míľnik, ktorý pre nás veľa znamená, a to, že generátor je schopný vyrábať a dodávať elektrickú energiu do siete. Tu sme mohli vidieť, že nielen teplo z reaktora, ale aj elektrina z generátora sú realitou, a že blok začína dodávať do siete toľko očakávané megawatty. V sobotu 4. februára 2023 sme úspešne prifázovali k sieti aj druhý turbogenerátor a testy na 20 % výkonovej hladine mohli byť ukončené.

Po dodaní sumárnych správ predbežného vyhodnotenia 20 % hladiny sme pristúpili k zvýšeniu výkonu bloku na 35 % nominálneho výkonu. Od 35 % výkonovej hladiny ďalej je štruktúra testov na danej hladine rozdelená v podstate do troch oblastí. Prvou je overenie vlastností aktívnej zóny reaktora, druhou overenie funkčnosti a vlastností obvodov sekundáru a treťou sú tzv. dynamické skúšky bloku, kde testujeme reakcie technológie na projektové poruchy. Tu sme už realizovali prvé dynamické testy. Išlo hlavne o zregulovanie výkonu



Obr. 3 Panel blokovej dozorne na 3. bloku jadrovej elektrárne Mochovce (zdroj Slovenské elektrárne, a.s.)

bloku na úroveň vlastnej spotreby po odpojení z elektrizačnej sústavy.

Od 18. marca 2023 sme boli s blokom na výkonovej hladine do 55 % nominálneho výkonu. Testy sa rozbehli veľmi dobre, bolo však potrebné vysporiadať sa s technickými výzvami na separátoroch oboch turbín, aby sme mohli prejsť k testom s požiadavkou na dosiahnutie maximálnych elektrických výkonov na turbogenerátoroch a následne k dokončeniu testovania na tejto výkonovej hladine. To sa nám nakoniec podarilo, avšak samotná 55 % výkonová hladina bola naozaj veľmi náročná, hlavne po inžinierskej stránke.

Nasledujúce dve výkonové hladiny do 75 % a do 90 % prebehli v podstate identicky, v porovnaní s „55-kou“ bez vážnejších problémov. „75-ku“ sme dosiahli v sobotu 15. júla podvečer. Hladina 90 % bola prvýkrát dosiahnutá opäť cez víkend, tentokrát v nedeľu 12. augusta 2023, 16 minút po polnoci. Rozdiel u týchto hladín v porovnaní s „55-kou“ bol v spomínaných dynamických testoch, kde už pri takýchto výkonoch dochádza k významným prechodovým javom. Tu je potrebné skonštatovať že nastavenie a spolupráca regulačných obvodov je veľmi dobrá a väčšinu „dynamík“ operátori „len sledujú“. Toto ma priam fascinovalo, keď som videl ako po výpadku napájačiek blok sám zreguloval hladiny v parogenerátoroch na nominálne hodnoty.

100% výkon sme s 3. blokom dosiahli v piatok 22. septembra 2023 o 15:30. Je to ďalší z míľnikov, na ktoré sme hrdí. Blok pracuje na nominálnom výkone a na to treba trochu času – navnímať a pochopiť to, že sme to dokázali. Aktuálne (27. septembra 2023) prebiehajú posledné testy na výkonovej hladine 100% Nnom, kde záverečným testom je „Preukazný 144-hod chod“, ktorým bude spúšťanie 3. bloku zavŕšené.

Na záver mi nedá nespomenúť jeden aspekt na ktorý som nesmierne hrdý. Počas celého spúšťania 3. bloku do terajšieho stavu (testy na 100% výkone) sme na bloku mali jednu jedínú AO-1 (automatické odstavenie reaktora s pádom všetkých regulačných kaziet naraz). Toto pre mňa potvrdzuje správnosť vedenia samotného spúšťania, správnosť rozhodnutí počas rôznych náročných situácií, správnu výstavbu bloku ako takého a to ma naplňa spokojnosťou pre bezpečnosť budúcej prevádzky.

Proces spúšťania jadrového bloku do prevádzky je mimoriadne komplexný, náročný, neustále prináša množstvo výziev. Dosiahnutie tohto cieľa, ku koncu ktorého sa blížime, je výsledkom tímovej práce veľkého počtu odborníkov – projektovému tímu, personálu AE Mochovce, Úradu jadrového dozoru SR, VUJE, ale aj kolegov z STU. Za ich profesionálny, odborný prístup a výbornú spoluprácu patrí všetkým moje poďakovanie a ocenenie.



Ing. Martin Mráz

martin.mraz@seas.sk

je riaditeľom Atómových elektrární Mochovce. Narodil sa v roku 1973, je absolventom Materiálovotechnologickej fakulty STU v Trnave so špecializáciou na aplikovanú informatiku a automatizáciu v priemysle.

V rokoch 1997–2000 pracoval vo VÚJE Trnava ako člen spúšťacieho tímu pre 1. a 2. blok EMO pri energetickom spúšťaní. Do AE Bohunice nastúpil v roku 2000 ako technik výroby, neskôr prešiel všetkými pozíciami na blokovej

dozorni – od novembra 2001 pracoval ako operátor sekundárneho okruhu, o rok neskôr ako operátor primárneho okruhu a od novembra 2006 bol vedúcim reaktorového bloku. V apríli 2012 prešiel na pozíciu vedúceho riadenia prác a od 1. januára 2013 bol manažérom riadenia prác. Do funkcie riaditeľa Atómových elektrární Bohunice bol menovaný 1. júla 2015, a od 1. mája 2019 je riaditeľom AE Mochovce.

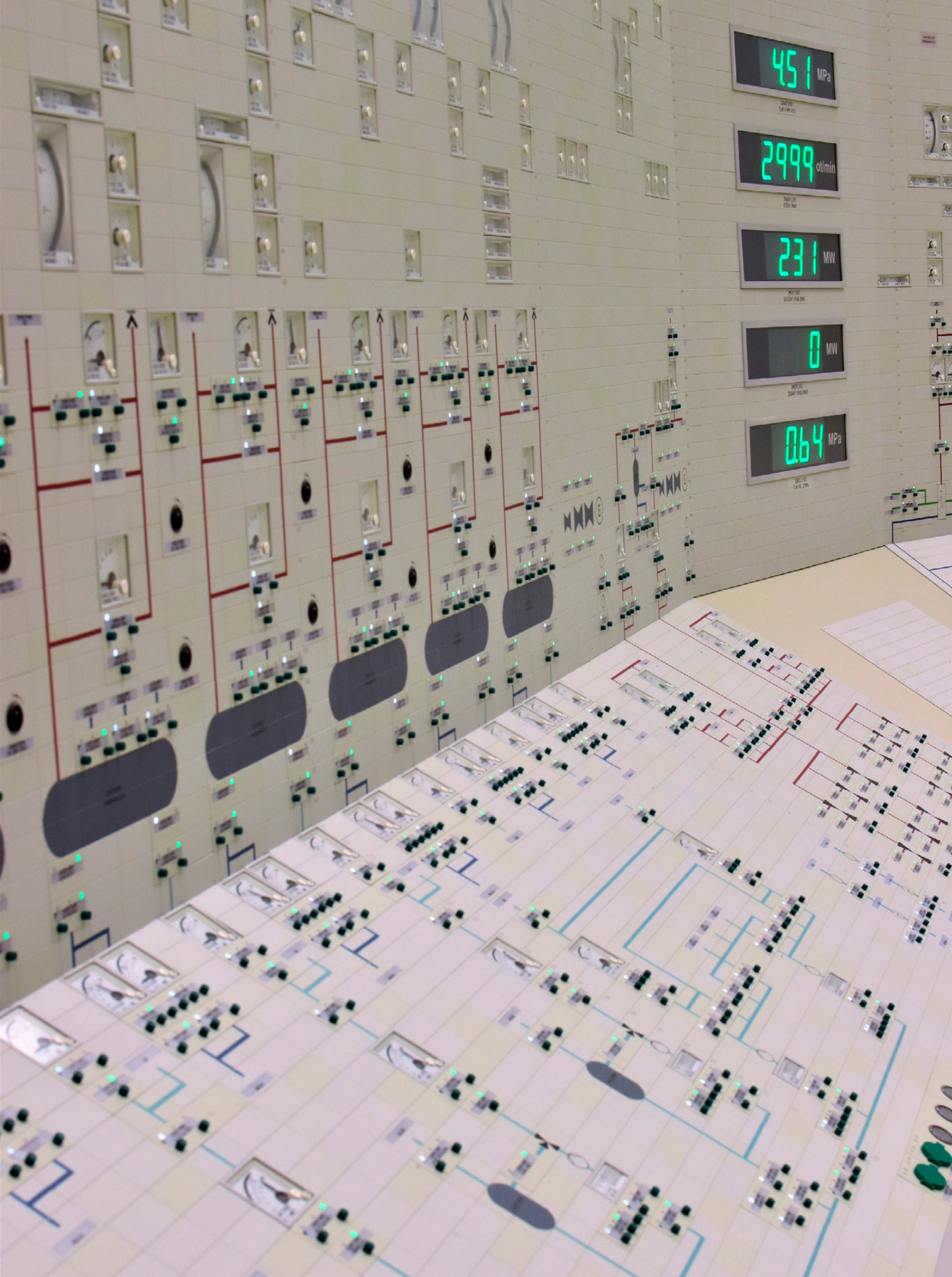
451 MPa

2999 rot/min

231 MW

0 MW

064 MPa



Uvádžanie 3. bloku jadrovej elektrárne Mochovce do prevádzky z pohľadu ÚJD SR

Ing. Peter Uhrík
Úrad jadrového dozoru Slovenskej republiky

Článok uvádza chronologický prehľad krokov povoľovacieho procesu na uvádžanie 3. bloku jadrovej elektrárne Mochovce do prevádzky a prístup Úradu jadrového dozoru Slovenskej republiky k dozoru nad vykonávanými činnosťami. V závere článku sú uvedené možné príčiny, ktoré mohli prispieť k oneskoreniu výstavby a spúšťania elektrárne.

The article provides a chronological overview of the steps of the licensing process of NPP Mochovce Unit 3 commissioning and the approach of the Slovak Nuclear Regulatory Authority to the supervision of the activities being carried out. At the end of the article, the possible causes that may have contributed to the delay in the construction and start-up of the power plant are listed.



Postaviť jadrovú elektrárňu (JE), pripraviť ju komplexne na uvádžanie prevádzky, otestovať a overiť všetky technologické systémy a napokon ju priviesť od spustenia štiepnej reťazovej reakcie až po nominálny výkon je nesmierne zložitá a komplexná úloha. Na jej plnení sa podieľajú najmä dva rozhodujúce subjekty – staviteľ a dozorné orgány.

Stavba 3. a 4. bloku jadrovej elektrárne Mochovce (MO34) a dokončovanie 3. bloku (MO3) boli komplikované a trvali veľmi dlho. Analýza príčin predĺženia času výstavby nie je jednoduchá, vystačila by isto na niekoľko samostatných článkov. Určite je ale nutné sa analýzou podrobne a veľmi pragmaticky zaoberať a príliš ju neodkladať. Bez jasne a detailne špecifikovaných príčin meškania stavby a ich adresovania hrozí, že príčiny sa zopakujú aj na dokončovaní štvrtého bloku, resp. pri výstavbe nového jadrového zdroja.

V nasledujúcom článku je objasnené ako k plneniu úloh vyplývajúcich z dokončovania a spúšťania MO3 pristupoval Úrad jadrového dozoru Slovenskej republiky (ÚJD SR, úrad).

Úrad sa pri svojej činnosti riadi viacerými zákonmi, ktorými je stanovená jednak oblasť pôsobenia ale tiež sú nimi stanovené aj kompetencie, právomoci a úlohy úradu.

Sú to najmä kompetenčný zákon (č. 575/2001 Z. z.), atómový zákon (AZ, č. 541/2004 Z. z.) s príslušnými vykonávacími vyhláškami a stavebný zákon (SZ, č. 50/1976 Zb.).

Úrad v súvislosti s uvádžaním jadrového zariadenia do prevádzky vydáva:

- povolenie na uvádžanie JZ do prevádzky (AZ § 5 ods. 3 písm. b); § 19 ods. 3)
- povolenie na nakladanie s RAO a VJP (AZ § 5 ods. 3 písm. f))
- povolenie na nakladanie JM (AZ § 5 ods. 3 písm. g))
- povolenie na predčasné užívanie stavby (SZ § 121 ods. 2, § 83)
- súhlas na jednotlivé etapy uvádžania JZ do prevádzky (AZ § 5 ods. 2 písm. b); § 19 ods. 4)
- povolenie na prevádzku JZ (AZ § 5 ods. 3 písm. c))
- súhlas na skúšobnú prevádzku (AZ § 5 ods. 2 písm. c); § 19 ods. 6)
- povolenie na dočasné užívanie stavby (SZ § 84 ods. 1, 2)
- povolenie užívania stavby na určený účel – kolaudačné rozhodnutie (SZ § 82)



Organizačná štruktúra úradu umožňuje systematickú kontrolu všetkých oblastí činnosti držiteľa povolenia. Na základe predloženej žiadosti je možné po kontrole a overení súladu s požiadavkami zákona a príslušných vyhlášok vydať požadované povolenie. Kontrolu úrad vykonáva prostredníctvom inšpekcií zameraných na oblasť, ktorá je predmetom žiadosti.

Vzhľadom na veľmi rozsiahly rozsah kontrolných činností a nutnosti vykonať ich plynule a dôsledne, úrad posilnil svoje permanentné zastúpenie na lokalite MO34. Na tejto lokalite má stále pracovisko päť lokalitných inšpektorov a externá technická podpora, pracujúca pre dozor na základe kontraktu.

Príkazom predsedníčky úradu bola zriadená špeciálna medziodborová skupina určená pre dozorovanie neaktívnych skúšok a spúšťania MO34. Skupina má maticový charakter. Stálymi členmi sú špecialisti pre stavbu, strojnú časť, reaktorovú fyziku, elektro, SKR, jadrové materiály a rádioaktívne odpady. V prípade potreby bola skupina doplnená o nestálych členov, špecialistov pre rôzne oblasti, napr.

havarijné plánovanie, bezpečnostné analýzy, prípravu personálu, legislatívu, komunikáciu, medzinárodné vzťahy. Súčasťou skupiny je i externá technická podpora úradu.

Pre potreby rýchlej operatívnej komunikácie medzi držiteľom povolenia a dozorom je zriadený denník operatívneho styku, umiestnený na lokalite. Umožňuje odovzdávať a prijímať potrebnú dokumentáciu s písomným potvrdením prevzatia, písomne deklarovať požiadavky dozoru a zároveň písomne uviesť ako bolo s požiadavkou naložené. Pracovné pozície, ktoré majú právo do denníka zapisovať, sú presne definované.

Inšpektori rutinnými inšpekciami kontrolujú priebeh výstavby, realizáciu testov, reagujú na externé podnety doručené na úrad a zúčastňujú sa tímových tematických inšpekcií otvorených na základe doručenej žiadosti o vydanie súhlasu, resp. povolenia. Ak sa počas rutinnej inšpekcie zistí vážny nedostatok, lokalitný inšpektor vydá príkaz na zastavenie prác. Pokračovať sa môže po adresovaní zisteného nedostatku a akceptovaní spôsobu jeho odstránenia.



Obr. 1 Predsedníčka SÚJB a tím ÚJD SR pri začiatku uvádzania MO3 do prevádzky (zdroj Slovenské elektrárne, a.s.)

ÚJD SR posudzuje dokumentáciu doručenu na úrad ako podklady k jednotlivým žiadostiam a zároveň na lokalite kontroluje skutočnosť uvedené držiteľom povolenia v žiadosti, resp. plnenie požiadaviek stanovených zákonom a vyhláškami. Prípadné zistené nedostatky úrad nariadi odstrániť príkazom inšpektora v protokole z inšpekcie.

Jednou s dôležitých priorít práce úradu je čo najvyššia miera transparentnosti. Vzhľadom na špecifiká povoľovacieho procesu a tiež pre podporu informovanosti a účasti domácej i zahraničnej verejnosti v rozhodovacom procese sú všetky dôležité kroky úradu a príslušné dokumenty, vrátane podkladov a návrhov rozhodnutí, zverejňované na špeciálnej podstránke webového sídla ÚJD SR. Prináša to síce mimoriadne veľký nápor práce pre úrad, najmä ak je potrebné z dokumentu eliminovať osobné údaje a citlivé informácie. Sú to informácie takého charakteru, ktoré by mohli byť zneužitú na zlovoľné konanie voči zariadeniu s cieľom ho poškodiť.

Počas svojej činnosti musí úrad na základe zákona reagovať na žiadosti o poskytnutie informácie podľa zákona o slobodnom prístupe k informáciám (č. 211/2000 Z. z.) a tento inštitút bol často využívaný aj v priebehu povoľovacieho konania. Zákon má navyše pomerne striktné a relatívne krátke lehoty na poskytnutie informácie, čo je tiež samozrejme náročné na vyčlenenie potrebnej časti pracovného času inšpektorov a ďalších zamestnancov úradu, ktorí majú uvedenú agendu v náplni práce.

Osobitnou kapitolou je práca úradu s podnetmi prichádzajúcimi zvonku. Okrem zistení inšpektorov, úrad získaval podnety aj od iných štátnych orgánov, právnických a fyzických osôb, mimovládnych organizácií, alebo boli podnety na úrad doručené anonymne. Všetkými podnetmi sa úrad podrobne zaoberal, bol alokovaný potrebný čas na identifikáciu signalizovaných problémov, preskúmanie stavu priamo na stavbe a na stanovenie potrebných nápravných opatrení. Štátnym orgánom sa poskytovala plynulá súčinnosť a spätná väzba, ako sa s podnetom naložilo a ako bol problém riešený.

Chronológia licenčného procesu (uvedené sú iba najdôležitejšie kroky):

Žiadosť o vydanie povolenia na uvádzanie JZ MO34 do prevádzky bola doručená na úrad v decembri 2016. Slovenské elektrárne, a.s. (SE, a.s.), zároveň požiadali o vydanie povolenia na predčasné užívanie stavby, vydanie povolenia na nakladanie s rádioaktívnymi odpadmi a vyhoreným jadrovým palivom a o povolenie na nakladanie s jadrovými materiálmi v jadrovom zariadení. Súčasťou predloženej žiadosti bolo 377 príloh.

Úrad preskúmal predloženú dokumentáciu a identifikoval nedostatky, ktoré bolo potrebné odstrániť. Zároveň skonštatoval, že dokumentáciu je potrebné doplniť. Stav pripravenosti jadrového zariadenia MO34 na vykonanie požadovaných skúšok, zdokumentovanie ich výsledkov a spomínané nedostatky podania vyústili k prerušeniu správneho konania v auguste 2017. Pokračovanie správneho konania bolo podmienené odstránením nedostatkov podania a preukázaním pripravenosti zariadenia na vykonanie testov studenej hydroskúšky. Nedostatky boli postupne odstraňované v termíne stanovenom úradom (t. j. skôr ako 15. 2. 2018). Studená hydroskúška bola následne realizovaná v období od decembra 2017 do augusta 2018. Jej program, priebeh a výsledky boli sledované úradom.

Pre potreby plynulého dokončovania stavby a následného uvádzania do prevádzky bolo tiež potrebné pripraviť uzol čerstvého paliva (UČP), aby bol umožnený dovoz a skladovanie paliva na lokalite. Preto bol UČP licencovaný samostatne. Po kontrole predloženej dokumentácie, na základe výsledkov inšpekcie a po získaní súhlasného stanoviska ostatných zúčastnených orgánov štátnej správy, úrad v októbri 2018 vydal rozhodnutím č. 277/2018 povolenie na nakladanie s jadrovými materiálmi a rozhodnutím č. 298/2018 povolenie na uvádzanie UČP do prevádzky podľa atómového zákona a zároveň povolil predčasné užívanie stavby.

Jeden z účastníkov konania (mimovládna organizácia Global 2000) podal voči týmto rozhodnutiam rozklad. Predsedníčka ÚJD SR

ako odvolací (druhostupňový) správny orgán ustanovila rozkladovú komisiu, ktorá preskúmala napadnuté rozhodnutia v celom rozsahu. Na základe návrhu komisie predsedníčka ÚJD SR v máji 2019 rozklad zamietla a potvrdila rozhodnutia, ktorými boli pôvodné povolenia vydané. Uzol čerstvého paliva tak bol pripravený na dovoz a skladovanie paliva v dostatočnom časovom predstihu pred jeho zavezením do reaktora.

Paralelne s licencovaním UČP a v nasledujúcom období prebiehali kľúčové činnosti na stavbe tretieho bloku EMO:

- august – december 2018 – malá revízia
- december 2018 – marec 2019 – horúca hydroskúška
- marec 2019 – rozšírená revízia

Inšpektori úradu počas celej horúcej hydroskúšky kontrolovali priamo na mieste vykonávanie testov zariadení a systémov a splnenie ich kritérií úspešnosti. Hydroskúška bola rozdelená na päť podetáp. Poddetaapy a celá hydroskúška boli bezprostredne po ukončení predbežne vyhodnocované, výsledky kontrolovali inšpektori úradu. Záverečnú správu predložila spoločnosť Slovenské elektrárne, a.s., úradu v prvej polovici júna 2019.

Počas rozšírenej revízie po horúcej hydroskúške sa 27. 11. 2019 uskutočnilo ústne pojednávanie spojené s miestnym zisťovaním. Miestne zisťovanie bolo v rozsahu objektov a zariadení pre prevádzku 3. bloku jadrovej elektrárne Mochovce a v rozsahu objektov a zariadení spoločných pre 3. a 4. blok slúžiacich k prevádzke 3. bloku v súvislosti so žiadosťou o vydanie povolenia na predčasné užívanie stavby. Účastníci konania mali počas ústneho pojednávania a pri ohliadke príslušných objektov a zariadení, ktoré sú predmetom konania, možnosť uplatniť svoje pripomienky a námety. Ústneho pojednávania, ktoré viedol ÚJD SR sa zúčastnili účastníci konania, zástupcovia SE, a.s., a zástupcovia dotknutých orgánov štátnej správy.

ÚJD SR zverejnil podklady pre rozhodnutie vo veci žiadosti SE, a.s., o vydanie povolenia na uvádzanie 3. bloku Mochovce do prevádz-



ky a súvisiacich povolení vo februári 2020. Súčasťou podkladov pre rozhodnutie bol návrh rozhodnutia vo veci a kapitola 13 Prevádzkovej bezpečnostnej správy (PpBS) MO34 – Vplyv MO34 na životné prostredie. Zverejnenie podkladov pre rozhodnutie oznámil úrad účastníkom konania písomne. Účastníci konania a verejnosť mali možnosť sa vyjadriť k podkladom pre rozhodnutie v termíne do 15. 4. 2020. Stojí za pripomenutie, že práce na stavbe, kontrolné činnosti, ako aj úkony správneho konania sa v tomto období významne komplikovali aj v dôsledku pandémie, ktorá tiež ovplyvnila tempo prác na stavbe. V súvislosti so zisteniami o použití nezhodných materiálov, ktoré boli iné ako deklarovali príslušné certifikáty a požadovali technické podmienky projektu, bolo potrebné vykonať rozsiahle dodatočné časovo náročné overenia a testy. Úrad využil aj externú podporu materiálových špecialistov zo strojníckej fakulty Žilinskej univerzity, ktorí poskytnutím potrebných analýz podporili rozhodovaciu činnosť úradu.

V záujme maximálnej transparentnosti a s ohľadom na väčší časový odstup od prvého zverejnenia sa úrad rozhodol opätovne zverejniť podklady pre rozhodnutie, ktoré ob-

↑
Obr. 2 Predsedníčka ÚJD SR podpisuje doložku právoplatnosti a vykonateľnosti rozhodnutia o povolení uvádzania 3. bloku JE Mochovce do prevádzky (zdroj Slovenské elektrárne, a.s.)



Obr. 3 Začiatok zavážania paliva do reaktora MO3 sledoval aj vtedajší premiér SR Eduard Heger (zdroj Slovenské elektrárne, a.s.)

sahovali aktualizovaný stav plnenia podmienok pre jeho vydanie. V novembri 2020 bola zverejnená PpBS a následne v januári 2021 bol zverejnený aj aktualizovaný návrh textu rozhodnutia. Zverejnením PpBS MO34 a návrhu rozhodnutia sa umožnila realizácia práva verejnosti na účasť v rozhodovacom procese najmä podľa Aarhuského dohovoru.

Po ukončení kontroly kvality materiálu potrubných dielov, vyhodnotení ich výsledku a po rozsiahlych kontrolách, ktoré potvrdili pripravenosť technológie, dokumentácie i personálu na uvádzanie 3. bloku Mochovce do prevádzky, vydal dňa 13. 5. 2021 úrad rozhodnutie č. 156/2021, ktorým povolil uvádzanie 3. bloku JE Mochovce do prevádzky, predčasné užívanie stavby, nakladanie s rádioaktívnymi odpadmi a vyhoretým jadrovým palivom a nakladanie s jadrovými materiálmi. Dňa 28. 5. 2021 bolo ÚJD SR elektronicky doručené odvolanie jedného z účastníkov konania (opäť Global 2000) proti rozhodnutiu ÚJD SR č. 156/2021, dňa

11. 6. 2021 ten istý účastník konania odvolanie ešte doplnil. Konanie bolo následne postúpené druhostupňovému správnomu orgánu, ktorým je predsedníčka ÚJD SR. Ako poradný orgán predsedníčky bola vymenovaná rozkladová komisia, poverená prípravou návrhu rozhodnutia predsedníčky o podanom rozklade.

Vo februári 2022 úrad otvoril inšpekciu, ktorej cieľom bolo skontrolovať stav pripravenosti 3. bloku na uvádzanie do prevádzky. Inšpektori kontrolovali tieto oblasti:

- kontrola podmienok prvostupňového rozhodnutia č. 156/2021
- kontrola ukončenia testov systémov strojuvne
- kontrola správy o pripravenosti objektov a systémov
- kontrola odstraňovania závad a nedorobkov
- kontrola splnenie Akčného plánu (opatrenia po havárii na JE Fukušima)
- kontrola programov riadeného starnutia

Inšpekcia nezistila žiadne nedostatky, ktoré by bránili spúšťaniu 3. bloku a v júli 2022 bola uzatvorená záznamom.

Po preskúmaní detailov podaného rozkladu a na základe odporúčania rozkladovej komisie dňa 25. 8. 2022 predsedníčka úradu ako druhostupňový správny orgán rozhodnutím č. 248/2022 P zamietla podaný rozklad a potvrdila rozhodnutie č. 156/2021, ktorým úrad vydal povolenie pre uvádzanie 3. bloku jadrovej elektrárne Mochovce do prevádzky. Druhostupňové rozhodnutie č. 248/2022 P nadobudlo právoplatnosť dňa 9. 9. 2022. Vzápätí držiteľ povolenia začal uvádzať zariadenie do prevádzky zavázaním paliva do reaktora.

Uvádzanie bloku do prevádzky je rozdelené na dve hlavné etapy – fyzikálne spúšťanie a energetické spúšťanie, z ktorých každá má podetapy dané detailným programom fyzikálneho a energetického spúšťania. Prechod na ďalší krok programu uvádzania do prevádzky je možný len po úspešnom realizovaní a vyhodnotení predošlého kroku. Úrad realizáciu programu spúšťania sleduje inšpekciou, počas ktorej sú predkladané výsledky vykonaných krokov programu. Takto má dozor možnosť kedykoľvek do programu vstúpiť, požadovať predloženie potrebnej dokumentácie, interpretáciu výsledkov testov a má samozrejme možnosť v odôvodnených prípadoch postup programu zastaviť, prípadne požiadať zopakovanie niektorého kroku. Ak je potrebné, úrad zrealizuje neplánovanú inšpekciu ako reakciu na neočakávanú udalosť na jadrovom zariadení.

Počas plánovanej inšpekcie zameranej na kontrolu realizácie fyzikálneho spúšťania boli o. i. predložené protokoly pripravenosti, na základe ich kontroly úrad nariadil opakovanie testov pre všetky redundancie RTS, DRTS, ESFAS a EXCORE. Minimálny kontrolovaný výkon reaktora bol na treťom bloku prvýkrát dosiahnutý 22. 10. 2022.

Berúc do úvahy priebeh a vyhodnotenie testov fyzikálneho spúšťania 3. bloku EMO, protokoly pripravenosti na etapu energetického spúšťania v zmysle etapového programu, stanovisko externej podpory úradu a predbežné závery z inšpekcie úradu zameranej na

kontrolu realizácie testov fyzikálneho spúšťania, vydal úrad dňa 13. 1. 2023 súhlas na prechod zariadenia do etapy energetického spúšťania. Táto etapa zahŕňa skúšky vykonávané postupne na určených výkonových hladinách reaktora až do dosiahnutia 100 % výkonu.

Začiatok dodávania elektrickej energie do siete nastáva pri dosiahnutí cca 20 % výkonu reaktora, tzv. prifázovanie prvého turbogenerátora k sieti na 3. bloku EMO, bol zaznamenaný 31. 1. 2023. V čase prípravy tohto článku na publikovanie (k 1. 6. 2023) sú na bloku vykonávané testy na výkonovej hladine do 55 % a zároveň sa na nejadrovej časti rieši technický problém s odvodom separátu na separátore a prehrievači pary oboch turbogenerátorov.

Po vyriešení technických problémov a realizovaní predpísaných testov na výkonových hladinách 55, 75, 90 a 100 % bude podľa projektu etapa energetického spúšťania ukončená tzv. 144-hodinovým preukazným chodom na plnom výkone.

Úrad na základe výsledkov rozsiahlych kontrol na stavbe 3. a 4. bloku a skúseností z neaktívneho vyskúšania 3. bloku odporučil držiteľovi povolenia, aby počas spúšťania boli aplikované v primeranej miere postupy denného a krátkodobého riadenia prevádzky, ktoré sa úspešne používajú na prevádzkovaných blokoch JE Mochovce (bloky 1 a 2). Tieto postupy sú podrobne rozpracované a týkajú sa plánovania prác a činností, rozvrhovania potrebných zdrojov (okrem iného i personálnych zdrojov, vrátane špecialistov dodávateľov, špecialistov útvaru spúšťania spoločnosti Slovenské elektrárne, a.s., skupiny vedecko-technickej podpory spúšťania a iných). ÚJD SR považuje aplikáciu týchto postupov na základe doterajšieho priebehu spúšťania 3. bloku za dobrú prax. Definitívne vyhodnotenie však bude vykonané až po ukončení spúšťania.

Z poznatkov inšpektorov ÚJD SR a špecialistov externej podpory úradu v Mochovciach, ktoré boli získané počas výkonu dozoru pri dostavbe MO34 a počas uvádzania MO3 do prevádzky, vyplývajú nasledovné skúsenosti: — Úrad nepovažuje za optimálne spájanie

- pozície investora (generálneho investora) a dodávateľa časti technologického zariadenia, resp. prác na projekte. Táto situácia v Mochovciach napríklad na nejadrovej časti (strojovňa) viedla k oslabeniu kontroly kvality prác počas montáže. Na základe kontrol ÚJD SR a útvaru prevádzky Mochovce bolo potrebné prijať rozsiahle opatrenia, vrátane výmeny niektorých komponentov a rozsiahlej kontroly dokumentácie kvality.
- Útvar budúcej správy zariadení nového jadrového bloku by mal byť vytvorený a primerane personálne obsadený najneskôr od začiatku etapy montáže zariadení. Zamestnanci tohto útvaru (budúci správcovia zariadení) by sa mali intenzívne podieľať na kontrolách a celkovom monitorovaní postupu montážnych prác. To by umožnilo:
 - zistiť niektoré nedostatky realizačného projektu a odstrániť ich už v etape montáže a nie až v etape preberania zariadenia alebo dokonca testovania,
 - identifikovať prípadné odchýlky realizácie/montáže zariadení od projektu a priebežne zabezpečovať nápravu,
 - poskytnúť budúcej správe rozsiahle skúsenosti so zariadením, ktoré bude v jej odbornej starostlivosti.
 - V etape neaktívneho testovania zariadení 3. bloku držiteľ povolenia v záujme urýchlenia prác využíval provizória – najmä v oblasti elektrického napájania, spolupracujúcich systémov (dodávka potrebných médií, systém ovládania zariadení a iné). Uvedená skutočnosť viedla k tomu, že časť testov sa musela zopakovať po odstránení provizórií. Podľa názoru úradu je potrebné testovať zariadenia až v pokročilom štádiu ich finalizácie (resp. po úplnom ukončení montáže – ak je to možné) a s minimom provizórií.
 - Držiteľ povolenia v etape preberania zariadenia z montáže do skúšok evidoval nadmerný počet závad a nedorobkov. Podľa poznatkov inšpektorov úradu sa



- držiteľ povolenia snažil dodržať termíny skúšok v súlade s harmonogramom. Dodržanie harmonogramov skúšok však v niektorých prípadoch uprednostnil pred dôsledným odstránením závad z montáže. Inšpektori úradu a špecialisti externej podpory na stavbe MO34 veľmi podrobne kontrolovali klasifikáciu závažnosti týchto nedorobkov a nedostatkov z pohľadu jadrovej bezpečnosti. Ich postupné odstraňovanie bolo časovo náročné a bolo jednou z príčin oneskorenia nábehu 3. bloku. Navyše, po odstránení niektorých závad a nedorobkov, bolo potrebné zopakovať časť neaktívnych skúšok. Úrad považuje snahu preberať zariadenie z montáže do skúšok s veľkým počtom závad za kontraproduktívnu a v konečnom dôsledku spôsobujúcu zdržanie postupu prác.
- Legislatíva formuluje mimoriadne náročné požiadavky na kvalitu zariadení jadrových blokov. Tieto požiadavky sú odstupňované podľa významu zariadení pre jadrovú bezpečnosť. Týkajú sa najmä etapy projektovania, výroby, montáže a testovania zariadení a dokladujú sa príslušnými certifikátmi/osvedčeniami, ktoré vydáva výrobca alebo oprávnená právnická osoba. Počet zariadení/dielov na jadrovom bloku je enormne vysoký a ukázalo sa, že dokladovanie ich kvality je citlivé na pozmeňovanie certifikátov, či už z dôvodu chyby alebo nekalého úmyslu, ktorým môže byť získanie



neoprávnenej ekonomickej výhody. Na projekte jadrového zariadenia 3. a 4. blok Mochovce bola takáto skutočnosť zistená u certifikátov potrubných dielov.

Spoločnosť Slovenské elektrárne, a.s. na základe tohto zistenia zaviedla rozsiahle vstupné kontroly kvality potrubných dielov na projekte Mochovce i na ostatných jadrových blokoch v SR. Z uvedeného vyplýva, že je potrebné významne posilniť vstupnú kontrolu kvality na stavbe jadrového zariadenia.

- V etape montáže je potrebné posilniť kontrolu kvality úplného dodržania postupov realizácie zvarových spojov – zo strany investora i dodávateľov. Kvalita zvarových spojov významne ovplyvňuje budúcu bezpečnú prevádzku jadrového zariadenia. Kultúra všetkých zväračov

a ostatných zúčastnených špecialistov musí vychádzať z tejto skutočnosti.

- Vo všetkých etapách prác (stavebné práce, montáž zariadenia, skúšky zariadení) je potrebné dbať na vysokú kvalitu protokolov, ktoré dokladujú výsledok uvedených činností. V úvodnej etape realizácie seizmického zodolnenia stavebných objektov 3. bloku neboli vystavené niektoré protokoly dostatočne presne. Tento nedostatok si vyžiadal opätovnú revíziu všetkých protokolov z tejto činnosti a v prípade pochybnosti i prepočet odolnosti nosných konštrukcií stavebných objektov. Celý proces prebiehal za priebežnej kontroly úradu, ktorý si pre účely nezávislého overenia výsledkov výpočtov obstaral nezávislú odbornú organizáciu.



Obr. 4 Panorama jadrovej elektrárne Mochovce zo západnej strany (zdroj Slovenské elektrárne, a.s.)

Poznámka redakcie: článok byl sepsaný ke dni 1. 6. 2023, některé informace v něm uvedené tudíž nezahrnují aktuální stav.



Ing. Peter Uhrík

peter.uhrík@ujd.gov.sk

Po ukončení Elektrotechnickej fakulty SVŠT v roku 1984 pracoval v prevádzke JE Bohunice ako operátor blokovej dozorne, zmenový inžinier a vedúci skupiny operatívneho riadenia opráv počas odstávok bloku. V roku 1999 začal pracovať na ÚJD SR v pozícii riaditeľa odboru jadrovej bezpečnosti. V roku 2005 bol vymenovaný za generálneho riaditeľa sekcie hodnotenia bezpečnosti a kontrolných činností. Počas pôsobenia na

úrade bol menovaný za člena Výboru bezpečnostnej rady SR pre energetickú bezpečnosť, bol členom Komisie MAAE pre bezpečnostné štandardy NUSCC a zúčastnil sa viacerých expertných misií MAAE. Od roku 2022 je na dôchodku.

Poradné vedecké konzílium a jeho činnosti pri spúšťaní MO3

Ing. Miloš Štěpanovský¹, Ing. Ľubomír Krenický², prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc.³, doc. Ing. Gabriel Farkas, PhD.³

¹Ex-ČEZ, a. s., závod Dukovany, ²Ex- SE, a.s., závod Mochovce, ³Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva FEI STU

Článok popisuje aktivity a prínosy Poradného vedeckého konzília v procese spúšťania 3. bloku JE Mochovce.

The paper describes activities and contributions of Consultation and scientific consilium during commissioning of NPP Mochovce 3. unit.

Poradné vedecké konzílium (PVK) bolo zriadené rozhodnutím riaditeľa úseku JE spoločnosti Slovenské elektrárne, a.s. (SE, a.s.) Ing. Miroslavom Tokárom na jeseň 2021. Jeho členmi boli menovaní: Ing. Miloš Štěpanovský, Ing. Ľubomír Krenický, Prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc. a doc. Ing. Gabriel Farkas, PhD. Kým prví dvaja majú bohaté skúsenosti s prevádzkou blokov VVER-440 V-213 na rôznych úrovniach riadenia, druhí dvaja zastupujú akademickú obec najmä v oblasti jadrovej a neutrónovej fyziky a životnosti vybraných materiálov i komponentov JE. Cieľom založenia tohoto konzília je efektívna podpora manažmentu SE, a.s. pre prípravu a uvedenie 3. bloku elektrárne Mochovce do prevádzky prostredníctvom nezávislého pohľadu, širokých medzinárodných skúseností a hlbších vedomostí v jadrovej a neutrónovej fyzike, ale aj v riadení reálnych technologických procesov. Výhodou je aj skutočnosť, že členovia konzília nie sú zaťažení každodennou operatívnou a môžu niektoré problémy analyzovať z väčšieho nadhľadu.

Činnosť PVK je možné rozdeliť do 3 oblastí:

1. Analyzovať a zovšeobecniť skúsenosti a problémy so spúšťaním jadrových blokov vo svete s dôrazom na problémy v Olkiluote (EPR, Fínsko) a vo Flamanville (EPR, Fran-

cúzsko) a formulovať poučenia pre dostavbu 3. bloku v Mochovciach.

2. Vykonať riadené rozhovory s kľúčovými pracovníkmi SE, a.s. podieľajúcimi sa na dostavbe s cieľom jasne vyšpecifikovať „slabé miesta“ v nastavení činností, kompetencií a zodpovedností počas spúšťania bloku.
3. Pravidelne konzultovať a analyzovať problémy, ktoré sa vyskytnú počas fyzikálneho a energetického spúšťania 3. bloku.

Analýza súčasného stavu v spúšťaní jadrových blokov do siete a zovšeobecnenie skúseností a problémov so spúšťaním jadrových blokov vo svete s dôrazom na problémy v Olkiluote a vo Flamanville bola prezentovaná nielen vedeniu spoločnosti, ale aj širšiemu okruhu pracovníkov SE, a.s. a dodávateľských organizácii na pracovnom workshope 29. marca 2022 v Mochovciach.

Dôraz v prezentáciách a následných diskusiách bol kladený najmä na management skúsenosti a poučení sa chýb zo spúšťania elektrární v zahraničí, ale aj EMO1,2 pre plynulú dostavbu 3. bloku v Mochovciach.

Ukázalo sa, že napriek všeobecnej a úprimnej snahe sa plánované termíny posúvali a oneskorenia narastali. Pre porovnanie uvádzam nasledovnej tabuľke míľniky spúšťania EMO1,2 a 3. bloku.



EMO	1. blok	2. blok	3. blok
FL – začiatok (Zavezenie 1. PK)	27. 4. 1998	4. 10. 1999	9. 9. 2022
Koniec FS (Začiatok ES)	24. 6. 1998	14. 12. 1999	7. 1. 2023
Prvé fázovanie (TG11/TG22)	4. 7. 1998	20. 12. 1999	31. 1. 2023
Trial run (144 hod preukazný chod)	7.–13. 10. 1998	13.–19. 3. 2000	
Začiatok 3 mes. skúšobnej prevádzky	29. 10. 1998	11. 4. 2000	
Začiatok trvalej prevádzky	29. 1. 1999	11. 7. 2000	



Obr. 1: Jaderná elektrárna Mochovce

**Poučenia zo spúšťania blokov VVER-440
boli sformulované do nasledujúcich bodov:**

- Je potrebné používať aktuálnu a zrevidovanú dokumentáciu so zapracovaním všetkých zmien a opráv počas spúšťania.
- Pri signalizovaní nehodnoverných údajov meracích aparatúr počas komplexných skúšok je nutné dodržiavať zásady konzervatívneho rozhodovania.
- Počas testov FS a ES majú byť hlavné regulátory parametrov bloku v automatickom režime, pokiaľ nevyžaduje test iný režim.
- Nepripúšťať provizórne riešenia, ktoré majú tendenciu k zlyhaniu a zvyšujú riziko poruchy (napríklad provizórne riešenie budenia generátora).
- Pre simulácie a blokovanie signálov, ochrán a automatík je potrebné používať schválený, jednoznačný a presný postup, vrátane uvedenia zariadenia do pôvodného stavu.
- Jasné a jednoznačné definovanie kompetencií a zodpovednosti pri skúškach a testoch.
- Zabezpečiť efektívnu komunikáciu všetkých, ktorá pripravujú, realizujú a vyhodnocujú jednotlivé testy.
- Anticipovať, že počas testov ES sa odhalia skryté chyby na zariadeniach a test nemusí byť úspešný na prvý krát. Venovať pozornosť sprievodným poruchovým signalizáciám.
- Kontinuálne monitorovať parametre bloku a pravidelne vyhodnocovať odchýlky od očakávaných parametrov.
- Vykonávať dôslednú kontrolu a diagnostiku prúdových spojov na elektro zariadeniach počas ich postupného zaťažovania, čím sa dá predísť poruchám a požiaru z dôvodu nedostatočne utiahnutých spojov a kontaktov elektrických rozvodov.
- Organizovať pravidelné brífingy najlepšie v čase T-48, resp. T-24 s cieľom precíznej prípravy testov a to najmä pokiaľ sa vykonáva po prvýkrát.

- Otvorene, promptne, proaktívne a efektívne komunikovať s Úradom jadrového dozoru SR.

V prvom polroku činnosti PVK vykonal riadené rozhovory s kľúčovými pracovníkmi SE, a.s. podieľajúcimi sa na dostavbe s cieľom jasne vyšpecifikovať možné nedostatky v činnosti, kompetenciách a zodpovednostiach počas spúšťania bloku. Odporúčania PVK v tejto oblasti pred uvedením EMO3 do prevádzky boli nasledovné:

- Aktualizovať servisné zmluvy a zabezpečiť všestrannú inžiniersku podporu hlavne pre zariadenia odlišné od EMO1,2.
- Zistiť prevádzkové skúsenosti z iných VVER blokov pre kritické zariadenia, odlišné od EMO1,2.
- Nastaviť správne „work-flow“ a presne definovať úlohy pri príprave, realizácii a vyhodnocovaní testov.
- Evidovať aktuálny stav technológie ako podporu pre efektívne plánovanie a rozhodovanie.
- Sumarizovať a archivovať skúsenosti a osvedčené postupy pre nábeh 4. bloku.
- Vzhľadom na vekovú štruktúru a ľudský potenciál zachovávať kritické vedomosti do nasledujúceho obdobia.
- Doplniť systém riadenia rizík najmä so zameraním na riziká, ktoré vyplývajú z inštalácie nových komponentov a zariadení kde nie sú k dispozícii prevádzkové skúsenosti, resp. nedostupná inžinierska podpora.

V rámci efektívneho riadenia činností počas spúšťania boli zavedené:

- Porada o 7:00 hodine v miestnosti 3310 za BD s cieľom kontroly priebehu FS/ES za uplynulých 24 hodín a spresnenia činností v rámci denného plánu.
- Denný plán o 12:00 hodine (členovia PVK zúčastnení cez MS Teams) s cieľom aktualizovať plán činností na nasledujúcich 24 hodín.

Konzultačná činnosť PVK bola zameraná najmä na:

- oblasť neutrónovo-fyzikálnych charakteristík počas fyzikálneho spúšťania bloku: jedným z analyzovaných problémov bolo riešenie nesúládov medzi rekonštruovaným rozložením výkonu AZ štandardným monitorovacím systémom INCORE a teoreticky vypočítaným rozložením výkonu AZ počas určovania deformácií výkonového poľa pri nesprávnej polohe kazety HRK na výkone reaktora 35 % N_{nom} ,
- analýzy odozvy bezpečnostných systémov najmä pre nízke výkonové hladiny,
- správnosť a rýchlosť spracovania údajov z ex-core detektorov: najviac sledovaným problémom bolo meranie periódy a reaktivity reaktora v priebehu dosahovania kritického stavu VBR a MBR,

ako aj meranie periódy počas overovania dynamických vlastností systému merania neutrónového toku na výkonovej hladine 35 % N_{nom} ,

- pripomienkovanie technickej správy z vyhodnotenia testov energetického spúšťania a návrh odporúčaní zameraných na podrobnejšiu a komplexnejšiu interpretáciu výsledkov testov energetického spúšťania,
- návrhy na úpravu procesu vytvárania správy s vyhodnotením jednotlivých testov,
- podpora pri riešení technologických problémov vyplývajúcich z postupov uvádzania bloku do prevádzky.

Sme radi, že sme svojou činnosťou aspoň trochu mohli prispieť k spusteniu tohto bloku.



Prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc.

vladimir.slugen@stuba.sk

V roku 1985 ukončil medziodborové štúdium Jadrová energetika na Elektrotechnickej fakulte SVŠT v Bratislave. Je autorom 6 kníh, 12 vysokoškolských skrípt a vyše 500 vedeckých a odborných prác (H-index 17). Bol zodpovedným riešiteľom 14 medzinárodných vedeckých projektov v oblasti jadrového paliva, materiálového výskumu a jadrovej bezpečnosti. Od roku 2005 je riadnym profesorom v odbore jadrová

energetika (DrSc. 2010). V roku 2015 založil v Bratislave European Decommissioning Academy. Od roku 2004 je predsedom SNUS a v rokoch 2009–2011 bol prezidentom ENS so sídlom v Bruseli. Od 2009 je členom predsedníctva World Nuclear Council. V rokoch 2011–2015 bol prvým riaditeľom Ústavu jadrového a fyzikálneho inžinierstva FEI STU. Od roku 2007 je podpredsedom Rady správcov Národného jadrového fondu SR, kde zastupuje Ministerstvo financií SR.

Vedecko-technická podpora spúšťania 3. bloku JE Mochovce

Ing. Martin Prachár
VUJE, a.s.

Príspevok popisuje činnosti „Skupiny vedecko-technickej podpory spúšťania MO34“ počas prípravy, realizácie a vyhodnotenia spúšťania na 3. bloku JE Mochovce. Uvádza dôvody na vytvorenie tejto skupiny, jej hlavné úlohy počas prípravy, realizácie a vyhodnotenia spúšťania a tiež jej organizačnú štruktúru.

The paper describes the activities of the “MO34 Commissioning Scientific and Technical Support Group” during the Mochovce NPP Unit 3 commissioning preparation, performance and evaluation. It lists the reasons for the creation of this group, its main tasks during the commissioning preparation, performance and evaluation, as well as its organizational chart.

Úvod

Pri spúšťaní 3. bloku JE Mochovce pokračuje dobrá prax zo spúšťania blokov s reaktormi VVER-440 a VVER-1000 v bývalom Československu a na Slovensku, keď dohľad nad dodržiavaním princípov jadrovej bezpečnosti a nad vedecko-technickou úrovňou dokumentácie spúšťania počas prípravy, realizácie a vyhodnotenia spúšťania je vykonávaný aj skupinou expertov nezávislou od prevádzkovateľa JE a realizátorov skúšok spúšťania. V minulosti sa táto skupina volala „Vedecké vedenie spúšťania“, dnes má inovovaný názov „Vedecko-technická podpora spúšťania“. Skupina vedecko-technickej podpory spúšťania MO34 (SVTPS) bola vytvorená v roku 2009 na základe zmluvy uzavretej medzi SE, a.s. a VUJE, a.s. v rámci projektu „Dostavba 3. a 4. bloku JE Mochovce (MO34)“. SVTPS sa riadi štatútom a jej činnosť a právomoci sú uvedené v samostatnej kapitole licenčného dokumentu „Program uvádzania 3. bloku JE Mochovce do prevádzky členený na etapy.“

Program uvádzania 3. bloku JE Mochovce do prevádzky je členený na dve hlavné etapy nasledovne:

- I. Fyzikálne spúšťanie (FS) – záväzka paliva (ZP), dosahovanie 1. kritického stavu reaktora (KS) a realizácia skúšok na výkone reaktora do 2 % N_{nom} .
- II. Energetické spúšťanie (ES) – realizácia skúšok na výkonových hladinách (VH) do 5, 20, 35, 55, 75, 90 a 100 % N_{nom} .

Spúšťaniu predchádzajú neaktívne skúšky (NaS) a po ukončení spúšťania nasleduje skúšobná prevádzka 3. bloku až do ukončenia prvej kampane.

1. Hlavné činnosti SVTPS počas prípravy neaktívnych skúšok a prípravy spúšťania 3. bloku

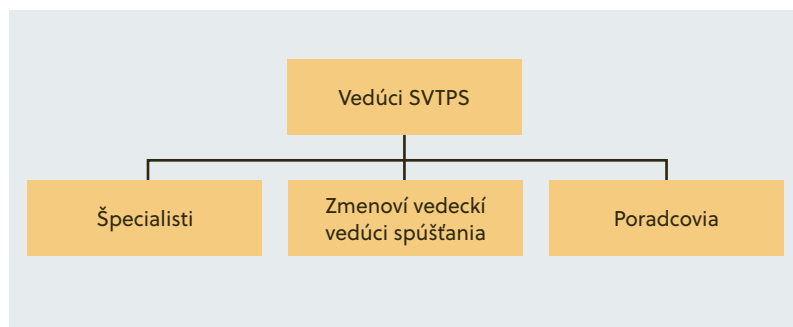
SVTPS počas prípravy neaktívnych skúšok a spúšťania 3. bloku posudzovala a odporúčala na schválenie programy skúšok NaS zariadení a systémov bloku dôležitých

z hľadiska jadrovej bezpečnosti, teda všetky bezpečnostné systémy, najdôležitejšie systémy so vzťahom bezpečnosti a systém ASFES, ktorý slúži na zber dát počas spúšťania. Tím SVTPS posudzoval a odporúčal na schválenie všetky programy skúšok FS a ES a formou stanovísk sa vyjadroval k problémom vzniknutým počas prípravy spúšťania.

2. Hlavné činnosti SVTPS počas realizácie spúšťania 3. bloku

SVTPS počas realizácie spúšťania posudzuje a odporúča na schválenie dočasné operatívne programy skúšok FS a ES, odporúča prípadné opakovanie, vypustenie, resp. doplnenie programu prác FS a ES, vydáva stanoviská k pripravenosti 3. bloku na zahájenie jednotlivých etáp spúšťania a posudzuje protokoly predbežného vyhodnotenia skúšok FS a ES z hľadiska komplexnosti, kvality prevedenia a splnenia kritérií úspešnosti.

Ďalej prostredníctvom nepretržitej zmenovej služby „Vedeckých vedúcich spúšťania“ (VVS) na blokovej dozorni (BD) kontroluje dodržiavanie zásad a pravidiel jadrovej bez-



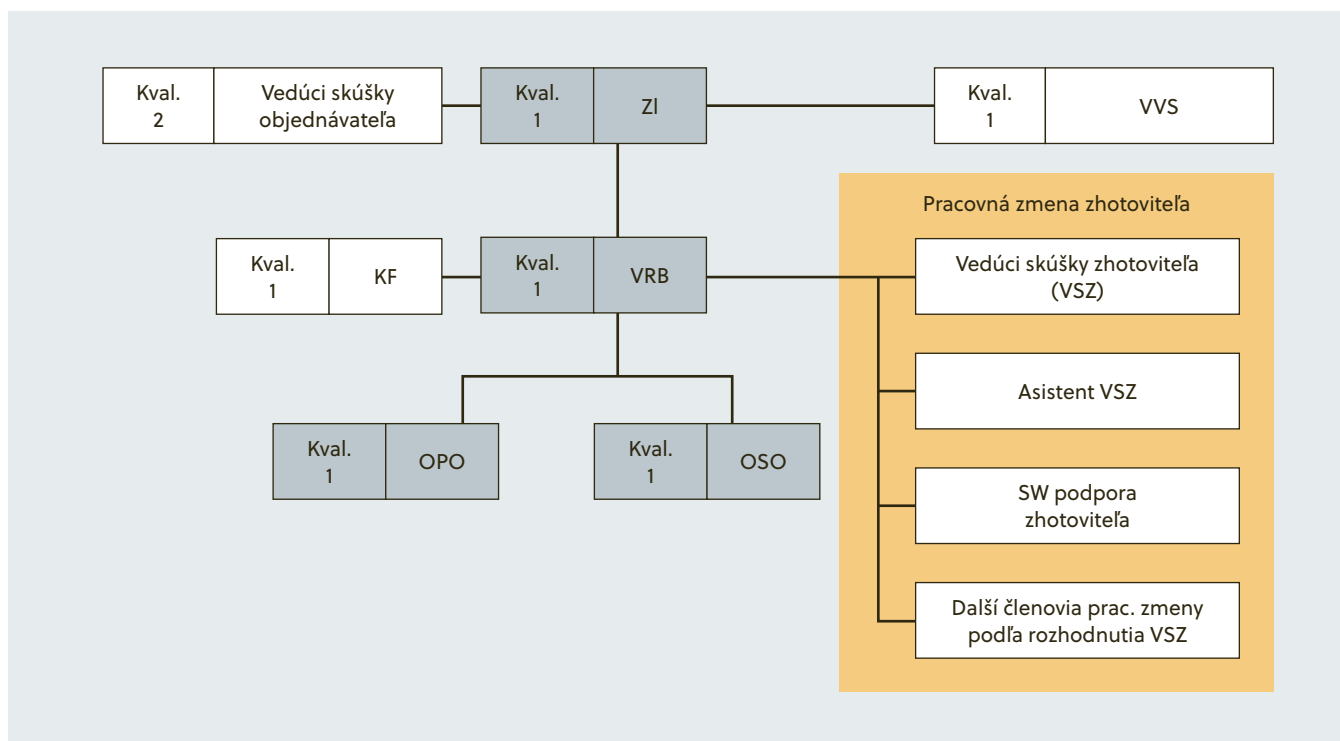
pečnosti (JB) vrátane dodržiavania limít a podmienok bezpečnej prevádzky (LaP) počas FS a ES, kontroluje poradie vykonávaných skúšok FS a ES v zmysle platného HMG spúšťania, kontroluje správne nastavenie východzieho stavu skúšok FS a ES a kontroluje realizáciu skúšok FS a ES podľa schválených programov skúšok.

3. Hlavné činnosti SVTPS počas vyhodnotenia neaktívnych skúšok a spúšťania 3. bloku

Počas vyhodnotenia neaktívnych skúšok a spúšťania 3. bloku SVTPS vypracováva nezávislé súhrnné zhodnotenie skúšok zariadení a systé-

↑
Obr. 1 Organizačná štruktúra SVTPS MO34

↓
Obr. 2 Začlenenie VVS do organizačnej štruktúry riadenia zmeny 3. bloku MO34





Obr. 3 Odovzdávanie/
preberanie zmeny VVS
na BD3 pred dosiahnutím
1. KS reaktora

mov bloku dôležitých z hľadiska jadrovej bezpečnosti, vypracováva nezávislé zhodnotenie etapy FS, nezávislé zhodnotenia jednotlivých výkonových hladín ES a vypracováva nezávislé súhrnné zhodnotenie etáp FS a ES.

4. Organizačná štruktúra SVTPS

Organizačná štruktúra SVTPS je na Obrázku 1.

Vedúci SVTPS (v minulosti „Vedecký vedúci spúšťania“) je zodpovedný za celkové riadenie činnosti SVTPS. Špecialisti SVTPS sú zodpovední za posudzovanie programov skúšok, kontrolu protokolov zo skúšok, vypracovanie stanovísk SVTPS a nezávislých zhodnotení SVTPS. Poradcovia SVTPS sú zodpovední za kontrolu a pripomienkovanie dokumentov vydávaných SVTPS a za podporu pri riešení problémov vzniknutých počas spúšťania. Vedeckí vedúci spúšťania (v minulosti „Zmenoví vedeckí vedúci spúšťania“) sú zodpovední za priamu kontrolu priebehu spúšťania na blokovej dozorni. Atómový zákon zaraďuje funkciu VVS medzi vybraných zamestnancov. Preto sa na ich kvalifikáciu vzťahujú obdobné podmienky ako na operátora sekundárneho okruhu (OSO), operátora primárneho okruhu (OPO), zmenového inžiniera (ZI) a kontrolného fyzika (KF). Pre výkon svojej funkcie musia byť držiteľmi „Preukazu o odbornej spôsobilosti“ vydaného ÚJD SR a „Poverenia na výkon pra-

covnej činnosti“ vydaného VUJE, a.s. Taktiež musia absolvovať predpísanú periodickú prípravu. Počas zmenovej služby na BD sa riadia funkčnými povinnosťami vydanými SE, a.s. Zaradenie funkcie VVS do organizačnej štruktúry riadenia zmeny na BD je na Obrázku 2.

Členmi SVTPS v pozíciách vedúci SVTPS, špecialisti a poradcovia sú ľudia s dlhoročnými skúsenosťami so spúšťaním resp. prevádzkou blokov VVER-440 a VVER-1000 v bývalom Československu a na Slovensku. Členmi SVTPS v pozícii VVS sú bývalí operátori z JE V1 a JE EMO12.

5. Teraz trošku histórie

- Vedeckým vedúcim spúšťania JE EBO V1 (1978–1980) bol Ing. A. T. Gucalov z Kurčatovského inštitútu (KI) z bývalého Sovietskeho zväzu,
- Vedeckým vedúcim spúšťania JE EBO V2 (1984–85) bol za československú skupinu Ing. Š. Rohár (VUJE Trnava) a za sovietsku skupinu A. T. Gucalov (KI Moskva),
- Vedeckým vedúcim spúšťania JE EDU (1985–1987) bol za československú skupinu Ing. Š. Rohár (VUJE Trnava) a za sovietsku skupinu Ing. G. Cygankov (KI Moskva)
- Vedeckým vedúcim spúšťania JE EMO12 (1998–2000) bol Ing. I. Šarvaic

- (VUJE Trnava),
- Vedeckým vedúcim spúšťania JE ETE (2000–2003) bol Ing. Č. Svoboda (ÚJV Řež),
 - Vedeckým vedúcim spúšťania JE MO34 (od r. 2022) je Ing. J. Kurek (VUJE Trnava).

6. A jedna zaujímavosť na záver

Vzhľadom na veľmi nízku hustotu neutrónového toku počas dosahovania prvého kritického stavu reaktora bol ako dodatočné bezpečnostné opatrenie použitý neštandardný merací kanál (NMK) neutrónového toku. NMK využil sovietsku citlivú ionizačnú ko-

moru SNM-18, ktorá zostala uložená v EMO od spúšťania 1. a 2. bloku a zostala funkčná. Pôvodná vyhodnocovacia elektronika už funkčná nebola, takže VUJE zostrojilo novú a odskúšalo NMK najprv na školskom reaktore VR-1 (patriacemu ČVUT v Prahe) a potom priamo na 3. bloku spolu so štandardným systémom merania neutrónového toku EXCORE. NMK počas dosahovania prvého kritického stavu reaktora zaregistroval zvyšovanie neutrónového toku skôr ako štandardný systém EXCORE, a tak prispel k zvýšeniu jadrovej bezpečnosti.



Ing. Martin Prachár

martin.prachar@vuje.sk

Inžinierske štúdium absolvoval na Elektrotechnickej fakulte STU v Bratislave (1993) v odbore Elektrotechnológia. V rokoch 1994 až 2009 pracoval na JE V1 ako operátor sekundárneho okruhu a neskôr operátor primárneho okruhu. Od roku 2009 pracuje vo firme VUJE, a.s. V súčasnosti je vedeckým vedúcim spúšťania v Oddelení spúšťania JE na Divízii jadrovej bezpečnosti, výskumu a vývoja. Od začiatku pôsobenia vo VUJE sa venuje predovšetkým projektu „Dostavba 3. a 4. bloku JE Mochovce“ – časť vedecko-technická podpora spúšťania MO34. Popri tom sa zúčastňoval ako riešiteľ a zodpovedný riešiteľ aj na ďalších projektoch VUJE: „Dostavba 3. a 4. bloku JE Mochovce“ – časť Licenčná dokumentácia MO34, „Technická podpora ÚJD SR“, „Dlhodobá prevádzka JE V2“ (LTO V2) – hodnotenie systému prevádzkových kontrol, „Vyradovanie JE V1“ – etapa D4.2 Demontáž veľkorozmerných komponentov primárneho okruhu, „Periodické hodnotenie jadrovej bezpečnosti JZ Medzisklad vyhoreného paliva“ (MSVP JAVYS) – hodnotenie systému prevádzkových predpisov a „Zadávacía bezpečnostná správa nového jadrového zdroja J. Bohunice“ (ZBS NJZ) – oblasť spúšťania JE. V súčasnosti je ako zástupca vedúceho Skupiny vedecko-technickej podpory spúšťania MO34 zodpovedný za riadenie zmenovej služby vedeckých vedúcich spúšťania na 3. bloku JE Mochovce.

Historie JE Mochovce

Bc. Lukáš Lorenc

ÚJV Řež, a. s., Divize ENERGOPROJEKT PRAHA

Článek popisuje průběh realizace projektu jaderné elektrárny Mochovce od 70. let dvacátého století, kdy byla zahájena výstavba prvních bloků, až po spuštění 3. bloku v roce 2022. Popis se věnuje průběhu výstavby, původnímu harmonogramu a výzám jak v projektové, tak realizační fázi. V rámci realizační fáze je popsán dodavatelský model aplikovaný na dostavbu 3. a 4. bloku.

The subject of the article is description of the nuclear power plant Mochovce construction since the 70's of 20th century, when construction of first units begun, to the commissioning of the 3rd unit at 2022. Description is focused on construction phase, original time schedule and difficulties during the design and construction phase. As a part of the construction description is also suppliers model applied on the completion of 3rd and 4th unit.

Dostavba 3. a 4. bloku jaderné elektrárny Mochovce dospěla v září roku 2022 k zásadnímu milníku – došlo k zavedení jaderného paliva na 3. blok. Od tohoto momentu lze tedy o 3. bloku hovořit jako o jaderném zařízení. Tento významný okamžik v životním cyklu jaderné elektrárny nabízí příležitost zrekapitulovat historii a vývoj projektu od počátku až do dnešních dní. Na jeho realizaci se výraznou měrou podílela i společnost ÚJV Řež.

Příprava a realizace projektu výstavby jaderné elektrárny Mochovce byly v 70. letech minulého století provázeny nejrůznějšími specifickými problémy. Neobvyklý rozsah jaderně-energetických staveb vyžadoval obrovské náklady, některé speciální podmínky legislativy určovaly také zvláštní podmínky výstavby těchto děl. Pro zajímavost – například hrubá příprava pozemku pro stavbu byla v 70. letech považována za největší zemní úpravy na území tehdejšího Československa.

Pro ilustraci problémů, které se řešily při přípravě JE Mochovce v oblasti úvodních projektů, dobře poslouží příklad úvodního projektu stavby 1. a 2. bloku, při jehož přípravě se zkoncentrovaly nejrůznější komplikace, které výstavbu JE Mochovce provází.

V roce 1974 byly zpracovány první studie, byl zahájen hydrogeologický průzkum, byl také zahájen sociologický průzkum v rámci přípravy výkupu nemovitostí v obci Mochovce. Přípravné a projektové práce řídil a zajišťoval tehdejší ENERGOPROJEKT, dnes ÚJV Řež, divize ENERGOPROJEKT PRAHA (ÚJV-EGP).

V roce 1978 byl usnesením federální vlády schválen investiční záměr a byly zahájeny intenzivní přípravné práce na JE Mochovce.

Jedním z prvních významných problémů bylo v roce 1979 přehodnocení umístění staveniště (v rámci několik let probíhajícího výběru umístění stavby) z hlediska seismicity (rozhodnutí o použití zásad projektování seismicky odolných jaderných zařízení podle normy VSN 15-78). Definitivně pak bylo rozhodnuto o umístění hlavního výrobního bloku na skalnaté podloží mezi Malou Vápennou a Kohoutí vrch.

Dalším milníkem byl rok 1981, kdy byl zpracován návrh projektového úkolu pro stavbu 1. a 2. bloku a z důvodu zajištění plynulosti výstavby bylo plnění rozděleno na dvě etapy. První etapa zahrnující přípravné práce v konečné podobě obsahovala 7 samostatných provozních souborů, 7 částí provozních souborů z 2. etapy, nezbytných pro zabudování



do stavby a 116 stavebních objektů. Druhá etapa – 1. a 2. blok – pak obsahovala 85 provozních souborů a 152 stavebních objektů.

Následujícím milníkem se pak stal rok 1984, na jehož konci byl po intenzivním jednávání schválen úvodní projekt pro 1. a 2. blok.

V průběhu zpracování úvodního projektu pro 1. a 2. blok docházelo ke změnám v koncepci elektrárny, zejména:

- dopadů z dopracovaného sovětského technického projektu na řešení antiseismických úprav
- změny koncepce ASŘTP
- změny koncepce dochlazování
- Automatizovaný komplex bezpečnostní ochrany jaderné elektrárny (AKOBOJE)

Výstavba prvních dvou bloků Mochovců byla zahájena již v roce 1982, o pět let později pak byla zahájena výstavba i třetího a čtvrtého bloku.

Na úvodní projekt pro 1. a 2. blok navazovalo zpracování úvodního projektu pro 3. a 4. blok. Úvodní projekt 3. a 4. bloku pak v podstatě opakoval řešení použité pro první dva bloky a díky tomu byl průběh jeho zpracování jednodušší. I přes tuto skutečnost ale bylo rovněž nutné řešit některé problémy zásadnějšího charakteru.

V rámci plánu organizace výstavby byl prvotní plán uvádění jednotlivých bloků do provozu mezi roky 1988 (1. blok) a 1990 (4. blok). Po připomínkách dodavatelů a dalších dotčených skupin byl vývoj termínů v dokumentaci plánu organizace výstavby velmi složitý a po aktualizaci byly stanoveny nové lhůty uvádění jednotlivých bloků do zkušebního provozu:

1. blok — 08/1989
2. blok — 08/1990
3. blok — 08/1991
4. blok — 05/1992

Průběžná lhůta výstavby 1. bloku od zahájení prací na základové desce po uvedení 1. bloku do zkušebního provozu byla v době zpracování úvodního projektu stanovena na 60 měsíců.

Vzhledem k událostem v roce 1989 byla výstavba přerušena zejména z důvodu financování a zajišťování možných finančních prostředků prostřednictvím EBRD. Proběhly mezinárodní audity, byla zpracována studie „zvýšení bezpečnosti JE Mochovce na evropskou úroveň“.

V roce 1995 byl předložen alternativní návrh financování dostavby 1. a 2. bloku (firma ŠKODA Praha a české finanční instituce). Po jeho prostudování a odsouhlasení bylo rozhodnuto o modelu financování dostavby a dokončení realizace s původními smluvními dodavateli – HDS Bratislava, ŠKODA Praha, EGP Praha a EZ Bratislava s tím, že bezpečnostní opatření zabezpečí EUCOM (konsorcium SIEMENS/FRAMATOME), ŠKODA Praha, VUJE, ATOMENERGOEXPORT a EdF v roli poradce SE EMO.

Pro každé bezpečnostní opatření byla stanovena pracovní skupina a po jejich realizacích, které byly rozdělené do několika fází, byl v roce 1998 zahájen provoz 1. bloku (licenci od ÚJD SR obdržel 29. 10. 1998). 2. blok byl poprvé spuštěn v roce 1999, licenci získal v dubnu roku 2000.

Mezi lety 2004 a 2005 byly zahájeny přípravné fáze dostavby 3. a 4. bloku, kdy ÚJV-EGP poskytoval poradenskou a konzultační činnost, technickou pomoc a nabízel i výkon funkce generálního projektanta pro dostavbu.

Pro dostavbu Mochovců byl zvolen dodavatelský model označovaný jako multi-contract. Celá stavba tedy byla ze strany Slovenských elektrární rozdělena mezi cca 100 dodavatelů. Úkolem společnosti Slovenské elektrárne byl pak jejich výběr, kontrola a koordinace.

Model multi-contract má řadu výhod, mezi které dle MAAE lze zařadit například lepší kontrolu bezpečnosti na stavbě, vyšší kontrolu kvality, dodržování harmonogramu a rozpočtu, optimalizaci projektu z pohledu investora, či využívání lokálních kontraktorů. Takto nastavený dodavatelský model ale zároveň klade na organizaci investora velké nároky, protože jakékoliv podcenění nebo zanedbání se projeví narušením harmonogramu a nabíháním vícenákladů.

Po vyhotovení aktualizace úvodního projektu, kterou zpracoval ÚJV-EGP, byla v roce 2008 zahájena dostavba 3. a 4. bloku. ÚJV-EGP jako autor úvodního projektu zajišťuje po celou dobu funkci autorského dozoru dokumentace i přímo na stavbě. Podílí se na vyhodnocování změn a vypracovává dodatky úvodního projektu.

Realizace takto rozsáhlého investičního celku přináší obecně velké výzvy na koordinaci a respektování požadavků úvodního projektu. Vzhledem k nastavenému dodavatelskému modelu a zapojení nových dodavatelů bylo v rámci vývoje projektu v průběhu realizace nutné zpracovat k úvodnímu projektu přes 160 dodatků, řešících významné dopady do projektu. Schválení dodatků podléhá ÚJD SR.

Další z událostí, která významně ovlivnila dostavbu elektrárny, byla havárie v JE Fukušima v roce 2011. Z důvodů nově požadovaných zvýšených nároků na bezpečnost jaderných elektráren bylo potřeba odpovídajícím způsobem upravit i příslušné projekty. Proto byly původní termíny spuštění – rok 2012, resp. 2013 – posunuté o cca 12 měsíců. Zpracování stress-testových opatření přispívajících ke zvý-

šení bezpečnosti 3. a 4. bloku zajišťoval v rámci dodatků úvodního projektu ÚJV-EGP.

Po překonání všech peripetií bylo v září roku 2022 konečně zavezeno do reaktoru 3. bloku jaderné palivo. V říjnu 2022 bylo v jaderném reaktoru poprvé dosaženo kritického stavu, tedy minimálního kontrolovaného výkonu. Třetí blok slovenské jaderné elektrárny Mochovce začal v rámci svého spuštění připojením prvního ze dvou turbogenerátorů poprvé dodávat elektřinu do sítě 1. února 2023, a to při 20 % výkonu reaktoru. Po úspěšném prověření zařízení na určených výkonových hladinách bylo na konci září 2023 dosaženo plného výkonu bloku. Po absolvování všech potřebných zkoušek na 100 % výkonu čeká blok 144hodinový provozní test, po jehož úspěšném splnění přejde do plného provozu.

Dalším významným milníkem, který jadernou elektrárnu Mochovce čeká, je dokončení montáže zařízení 4. bloku, následně individuální funkční zkoušky završené zavezením paliva. Aktuálně již v ÚJV-EGP pracujeme na dodatcích pro 4. blok a jsme připraveni dále podporovat investora až do úspěšného naje-
tí 4. bloku.



Bc. Lukáš Lorenc

lukas.lorenc@ujv.cz

Absolvent bakalářského studia na technické fakultě České zemědělské univerzity v Praze pracuje od roku 2010 v divizi ENERGOPROJEKT PRAHA společnosti ÚJV Řež, a. s. Od roku 2021 zde na pozici Hlavní inženýr projektu řídí spolupráci na výkonu autorského dozoru pro dostavbu 3. a 4. bloku jaderné elektrárny Mochovce.

EMO34 Transport tlakové nádoby reaktoru a související úpravy konstrukcí

Ing. Radek Pazdera, Ing. Libor Gášek
ÚJV Řež, a. s., divize ENERGOPROJEKT PRAHA

Článek je zaměřen na průběh a související úpravy konstrukcí, které se týkaly transportu tlakové nádoby reaktoru a budoucích transportů kontejnerů s jaderným palivem při jeho výměně. Úpravy byly zaměřeny na zásadní zvýšení jaderné bezpečnosti a spolehlivosti při manipulaci.

The article is focused on performance and additional modifications of structures of pressure vessel transport and future transport of containers with nuclear fuel during refueling. The modifications were focused on significant improvement of nuclear safety and reliability during the manipulation.

Úvod

Dostavba 3. a 4. bloku jaderné elektrárny Mochovce probíhala atypicky s cca 15letým přerušením. Projektové činnosti i vlastní realizaci stavby bylo nutno těmto skutečnostem přizpůsobit. Současně probíhaly změny v technologii s cílem výrazného zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti jak realizace, tak zejména bezpečnosti provozu. Tyto změny značně ovlivnily postupy realizace, vyvolaly nutnost návrhu odlišných a nových konstrukcí s využitím neobvyklých technických řešení.

Článek je zaměřen na průběh a související úpravy konstrukcí, které se týkaly transportu tlakové nádoby reaktoru a budoucích transportů kontejnerů s jaderným palivem při jeho výměně. Byly zaměřeny na zásadní zvýšení jaderné bezpečnosti a spolehlivosti při manipulaci.

Transport tlakové nádoby

Tlaková nádoba reaktoru je vlastně srdce jaderné elektrárny. Je to ocelová silnostěnná válcová nádoba o průměru 4 200 mm a hmot-

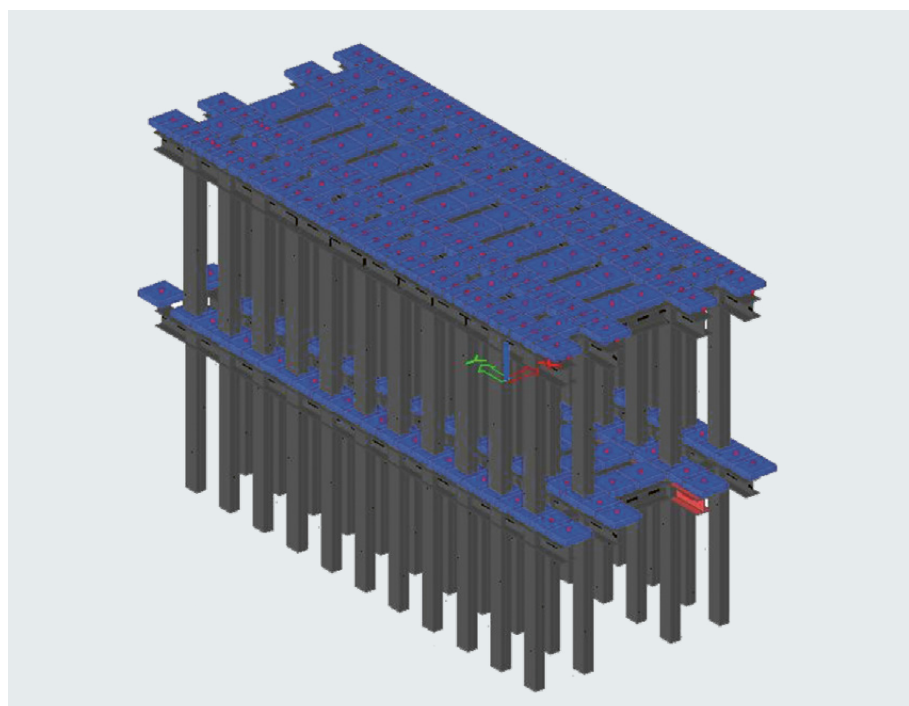
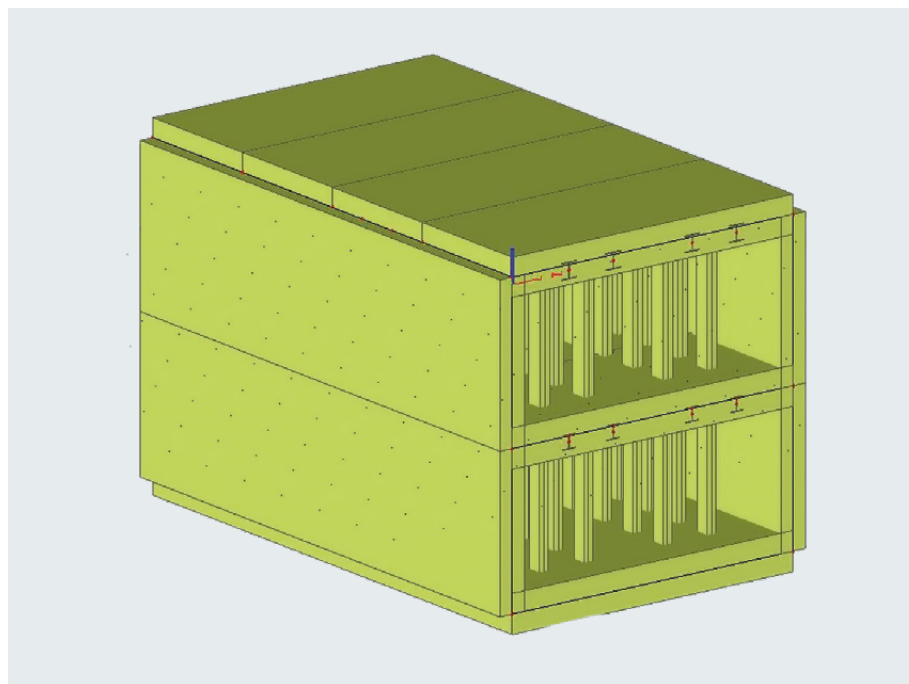
nosti 220 tun. Atypicky bylo nutno transportovat nádobu včetně vnějších nátrubků, které zvětšily celkové rozměry. Proto musel být zvolen odlišný způsob transportu oproti původnímu na železničním vagónu, a to na automobilovém podvalníku, který umožnil průjezd ve velmi stísněném transportním koridoru, zejména výškově. Z těchto důvodů nemohla být plně dokončena nosná železobetonová konstrukce stropu, zejména horní spřahovací deska tloušťky 200 mm. Pro přenos zatížení během transportu mohly být využity pouze železobetonové stropní panely tloušťky 500 mm nekompletně dokončené stropní konstrukce, jejichž únosnost nebyla pro potřeby transportu dostatečná. Byla navržena ocelová nosná konstrukce pro dočasné podepření pojížděné stropní konstrukce. Tato konstrukce musela být realizována přes dvě podzemní podlaží a zakotvena až na úrovni hlavní železobetonové základové desky. Ocelová konstrukce byla tvořena nosníky profilu 2 × U240 v podélném směru, které byly spřaženy s že-

↓
Obr. 1 Vizualizace výpočtového modelu konstrukce pro zachycení pádu kontejneru

lezobetonovými panely. Účinky od ocelových nosníků byly přenášeny ocelovými sloupy do stropní konstrukce na úrovni minus 2,80 m a následně až na úroveň základové desky, kde byly kotveny. Před vlastním transportem tlakové nádoby proběhl transport zkušebního břemena pro úřední zatěžovací zkoušku jeřábu. Jednalo se o atypickou železobetonovou konstrukci z prefa dílců o celkové hmotnosti 315 tun, která tvarem a hmotností simulovala tlakovou nádobu včetně požadované rezervy v hmotnosti. S tímto břemenem následně proběhly obdobné manipulace jako s vlastní tlakovou nádobou včetně pohybů se zavěšeným břemenem na hlavním mostovém jeřábu na reaktorovém sále. Pro zkoušku jeřábu s nosností 250 tun byla předepsána minimální hmotnost zkušebního břemena 315 tun. Tím se ověřila požadovaná rezerva v únosnosti jeřábu a nosných konstrukcích vynášejících vlastní jeřábovou dráhu. Před vjezdem podvalníku do transportního koridoru byly na nosnou konstrukci dočasně podepření instalovány měřicí body, pomocí kterých se během transportu průběžně monitorovala odezva nosné konstrukce. Vyhodnocování výsledků, včetně průběžné kontroly na místě, prováděli pracovníci Energoprojektu jako autoři konstrukce. Transport tlakové nádoby proběhl bez problému za účasti inspektorů z Úradu jadrového dozoru SR.

Transport a manipulace s kontejnery s jaderným palivem

Další z důležitých manipulací, které se odehrávají v transportním koridoru jaderné elektrárny, jsou manipulace s kontejnery s jaderným palivem. Jedná se o kontejnery zajišťující bezpečnost vlastního paliva v nich umístěného. Kontejnery jsou odolné i proti pádu z deklarované výšky. Jejich hmotnost je 90 tun. Do transportního koridoru se zavážejí na speciálním vagónu vnitřní železniční vlečky. Dále se s nimi manipuluje pomocí hlavního mostového jeřábu s nosností 250 tun. Právě proces manipulace při zvedání kontejneru z transportního vagónu je z hlediska jaderné bezpečnosti rozhodující. Pro zajištění maximální



spolehlivosti a bezpečnosti byl kontejner posuzován i na stavy při hypotetickém pádu z jeřábu a ověřovány odolnosti nosných stavebních konstrukcí. Vlastní kontejner musí odolat bez porušení jeho hermetičnosti netlumenému pádu z výšky 5 m a tlumenému pádu z výšky 19 m. Manipulace s kontejnerem probíhá tak, že se z transportního vagónu zvedne do výšky 5 m, transportní vagón odjíždí z ko-

↑
Obr. 2 Vizualizace „odkrytého“ modelu ocelové konstrukce pro zachycení pádu kontejneru



↑
Obr. 3 Realizované ocelové konstrukce

ridoru a na jeho místo najíždí speciální tlumicí vagón, který nese soustavu zpevněných dřevěných hranolů speciálně navrženou pro tlumení při hypotetickém pádu kontejneru. Teprve až nad tlumicím vagónem probíhá další zvedání kontejneru do výšky úrovně reaktorového sálu, která činí asi 19 m. Vlastní odolnost kontejneru s palivem při pádu byla ověřena dynamickými výpočty na výpočtových

modelech v SW ANSYS, kde byly simulovány účinky pádu. Výpočty probíhaly za úzké spolupráce se specialisty z ČVUT Praha, zejména prof. Čihákem a doc. Fajmanem. Výsledky simulací pádu na prostorových modelech prokázaly požadovanou odolnost a zajištění integrity vlastního kontejneru s palivem. Dále byly stanoveny zatěžovací účinky na stavební konstrukce v podobě časových průběhů intenzity kontaktního zatížení, resp. napětí v úrovni stropní konstrukce pro oba případy tlumeného i netlumeného hypotetického pádu kontejneru o hmotnosti 90 tun. Jako rozhodující pro posouzení stavebních konstrukcí vyšly účinky netlumeného pádu z výšky 5 m. Hodnota amplitudy časového průběhu zatížení odpovídala asi 105násobku vlastní tíhy kontejneru na dopadovou plochu. Jednalo se o hodnotu intenzity 2 360 tun na metr čtvereční při celkové velikosti dopadové plochy 4 m². Statickým posouzením železobetonové stropní konstrukce bylo konstatováno, že pro přenos této obrovské intenzity krátkodobého zatížení, je nutné masivní zodolnění stropních konstrukcí. Je to dáno tím, že od doby původního projektu došlo k výrazným změnám v požadovaných odolnostech konstrukcí, které mají zvýšit jadernou bezpečnost. Proto byly navrženy varianty ze-

→
Obr. 4 Přeprava tlakové nádoby reaktoru na podvalníku



sílení stávajících železobetonových konstrukcí. Po vyhodnocení byla vybrána varianta vložené masivní ocelové nosné konstrukce do obou podlaží pod stropem transportního koridoru, aby zatížení bylo spolehlivě přeneseno až do masivní železobetonové základové desky. Ocelová konstrukce byla tvořena válcovanými nosníky s profily HEA 280 a HEA 300, které byly podporovány soustavou sloupů z profilů 2 × U300 v půdorysných roztečích 600 × 800 mm. Celková hmotnost instalované konstrukce činila asi 58 tun, což odpovídá plošné hmotnosti konstrukce 880 kg/m². Všechny prvky ocelové konstrukce byly navrženy z oceli

třídy S355. Pod stropní desku na úrovni transportního koridoru byly v souladu s výpočty vloženy tlumicí prvky v podobě dřevěných trámů, jejichž tlumicí vlastnosti se na základě výpočtů ukázaly jako nejvhodnější.

Závěr

Realizací navržených technických opatření v prostorech transportního koridoru došlo k výraznému zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti stavebních konstrukcí jaderné elektrárny EMO34, která tím splňuje přísné, v současnosti požadované standardy.



Ing. Radek Pazdera

radek.pazdera@ujv.cz

Inženýrský titul získal na stavební fakultě Vysokého učení technického v Brně. Svou praxi statika zahájil v projektových organizacích v Uherském Hradišti a ve Zlíně, kde se v začátcích věnoval zejména projektům výstavby areálů pro automotive průmysl. Zakázkám pro klasickou i jadernou energetiku se jako hlavní statik věnuje cca od roku 2010. Aktuálně působí na pozici Vedoucí projektant-statik v divizi ENERGOPROJEKT PRAHA společnosti ÚJV Řež, a. s.



Ing. Libor Gášek

libor.gasek@ujv.cz

Je absolventem stavební fakulty Vysokého učení technického v Brně. Od roku 2010 působil na pozici Projektant-statik ve společnosti EGP INVEST Uherský Brod, od roku 2017 v této funkci pracuje v divizi ENERGOPROJEKT PRAHA ÚJV Řež, a. s. V rámci své praxe se podílel na dlouhé řadě projektů pro jaderné elektrárny, zejména v souvislosti se seismickým zodolňováním konstrukcí. Mezi hlavní reference jeho dosavadní kariéry patří práce na JE Mochovce a JE Dukovany.

TES s.r.o a jeho úloha ve vědeckotechnické podpoře ÚJD SR při spouštění EMO34.

Ing. Jiří Pulec
TES s.r.o

Příspěvek stručně představuje firmu TES s.r.o. od jejího založení až do současnosti, kdy realizuje zakázku „Vědecko-technická podpora ÚJD SR při neaktivním a aktivním spouštění 3. a 4. bloku Jaderné elektrárny Mochovce“. Tuto zakázku TES vysoutěžil spolu s ÚJV Řež a VÚJE a v příspěvku je krátce popsán soubor činností, které TES nebo tato skupina pro podporu ÚJD SR do současnosti prováděly.

The post briefly presents the TES company from its foundation to the present, when it implements the contract: “Scientific and Technical Support of ÚJD SR for inactive/active start-up of Unit 3 and 4 of the Mochovce Nuclear Power Plant”. This contract was awarded to three companies: TES, ÚJV Řež, and VÚJE, and this post briefly describes set of activities that only TES or this group of companies have carried out together to support the ÚJD SR to this date.



Společnost TES s.r.o. je česká společnost, založená bývalými pracovníky VÚJE Dukovany (VÚJE), která se od roku 1992 specializuje na inženýrské služby a technickou podporu zejména v oblasti jaderné energetiky. Je spolehlivým dodavatelem energetické společnosti ČEZ, a. s., jejích partnerů i zahraničních zákazníků. Prováděním specializovaných činností podporuje bezpečnost provozu na jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín a ve spolupráci se zahraničními partnery nebo samostatně poskytuje odborné inženýrské služby pro jaderné elektrárny nebo dozorné orgány v zahraničí.

Společnost TES se kromě podpory provozu v lokalitách EDU a ETE také významně podílela při realizaci celé řady projektů, a to od spouštění bloků VVER-1000 v ETE, zvyšování výkonu (využití projektových rezerv) v EDU a ETE až po

spouštění bloků po záměně NT dílů v těchto lokalitách. Disponuje tedy mnohaletými zkušenostmi v této oblasti.

Jedním z klíčových projektů, který započal úspěchem TES ve výběrovém řízení vypsaném v roce 2015 Úřadem jaderného dozoru SR (ÚJD SR), je vědecko-technická podpora dozoru při neaktivním a aktivním spouštění 3. a 4. bloku Jaderné elektrárny Mochovce (EMO). Výběrové řízení bylo vypsáno jednak na neaktivní spouštění, kde byl spoludodavatelem TES VÚJE a subdodavatelem ÚJV Řež, a na aktivní spouštění, kde byl spoludodavatelem TES ÚJV Řež a subdodavatelem VÚJE.

Vedení tohoto projektu zajišťovala sekce „Podpora spouštění a provozu JE¹“ (externí podpora) firmy TES, resp. její vedoucí.

Výkonní pracovníci spolu s pracovníky spoludodavatelů resp. subdodavatelů, kteří byli

na pozicích klíčových expertů, museli splňovat požadovanou kvalifikaci a praxi a museli být schváleni ředitelem pro jadernou bezpečnost ÚJD SR.

Činnost v počátcích této vědeckotechnické podpory byla zaměřena na posuzování programů neaktivního a aktivního spouštění a vybraných provozních předpisů. Od května 2017 pak bylo zřízeno pracoviště v lokalitě EMO34, a k posuzovacím činnostem se přidaly i činnosti kontrolní. Rámcem těchto činností byly inspekce ÚJD SR zaměřené na ukončování montáže, kontroly shody, kontroly průběhu čisticích operací a funkční zkoušky včetně programů neaktivního spouštění.

K specifickým činnostem patřila kontrola připravenosti 3. bloku k horké hydrozkoušce a kontrola jejího průběhu. V tomto období byli pracovníci externí podpory ÚJD SR přítomni během ranních a odpoledních směn na blokové dozorně 3. bloku. Vzhledem k řadě nedostatků a nesplnění cílů horké hydrozkoušky byl realizován po částečné etapě revize tzv. opětovný náhřev, a po jeho realizaci byly požadavky a cíle HHZ splněny. Na kontrole průběhu opakovaného náhřevu a kontrole realizace opakovaných testů se pracovníci externí podpory rovněž podíleli.

Vzhledem k stálému zpoždění spouštění byl termín pro realizaci tendru daný výběrovým řízením překročen a také finanční prostředky na něj plánované byly vyčerpány, proto ÚJD SR vypsalo nové výběrové řízení.

V tomto novém výběrovém řízení výše uvedené organizace opět uspěly a vědeckotechnická pomoc mohla pokračovat v již zahájeném složení. TENDR byl vypsán na aktivní spouštění 3. bloku a neaktivní a aktivní spouštění 4. bloku. Jeho realizace započala po podpisu smlouvy dne 15. 10. 2021, resp. první objednávkou na aktivní spouštění 3. bloku od 1. 11. 2021.

V tomto období pracovníci externí podpory spolu s lokalitními inspektory prováděli kontrolu jednotlivých objektů a místností 3. bloku MO34 se zaměřením na pořádek, čistotu, udržování zařízení (včetně jeho označení), dodržování režimu vstupu a prováděných prací.



Specifickými činnostmi bylo posuzování metodiky k ověřování kvality dodávek hutních polotovarů použitých na vybraných zařízeních 3. a 4. bloku EMO a Metodiky pro vyloučení záměny přídatného svařovacího materiálu měřením odtrhové síly.

V průběhu roku 2022 se začínalo s kontrolou připravenosti k zavážce paliva. Jednotliví pracovníci externí podpory podle jim přidělených systémů a zařízení posuzovali, do k tomu vytvořených šablon, připravenost systémů jednak na základě ukončených programů předkomplexního vyzkoušení, ale také fyzických kontrol na pozicích a popřípadě, pokud již příslušné systémy byly předány do předčasného užívání, i informací z jejich provozu.

Zavezení první kazety do aktivní zóny proběhlo 9. 9. 2022 ráno. V tomto období prováděli pracovníci EP opět kontrolní činnost na blokové dozorně, a to klíčoví experti s kvalifikací „Odborník na režimy JZ a bezpečnostné systémy“ resp. „Odborník na fyziku jadrového reaktora“.

Kontrola připravenosti k minimálnímu kontrolovanému výkonu navazovala na připravenost k zavážce paliva a byla prováděna obdobným způsobem. Jednotliví pracovníci EP podle jim přidělených programů NaS aktualizovali příslušné šablony v souladu se stavem ukončovacích protokolů příslušných programů, kontrol plnění limitů a podmínek,



Obr. 1 Postament třetího bloku jaderné elektrárny Mochovce



↑
Obr. 2 Staveniště při výstavbě 3. a 4. bloku Jaderné elektrárny Mochovce

provozních kontrol vedených směnou spolu s doplněnými informacemi z hlášení směnového inženýra.

Dosažení minimálního kontrolovaného výkonu proběhlo 22. 10. 2022 večer.

Hlavní náplní kontrolní činnosti externí podpory během realizace testů fyzikálního spouštění byla přítomnost klíčových expertů č. 6 (Odborník na režimy jadrového zariadenia a bezpečnostné systémy) a č. 7 (Odborník na fyziku jadrového reaktora) na blokové dozorně 3. bloku. Při této činnosti se řídili následujícími dokumenty:

- Náplň služby externí podpory ÚJD SR a blokové dozorně 3. bloku EMO při fyzikálním spouštění,
- Kodex služby externí podpory na blokové dozorně 3. bloku EMO,
- Etapový program fyzikálního spouštění 3F001,
- Programy fyzikálního spouštění.

Testy fyzikálního spouštění 3. bloku EMO byly ukončeny 7. 1. 2023. Slovenské elektrárne předložily souhrnné vyhodnocení, které pracovníci externí podpory rovněž posuzovali a předkládali stanovisko ÚJD SR.

Dne 14. 1. 2023 bylo na základě rozhodnutí ÚJD SR započato s první etapou energetického spouštění do 5 % N_{NOM} .

Doposud proběhly etapy do 20 % N_{NOM} a 35 % N_{NOM} . Etapa do 55 % N_{NOM} probíhá.

Hlavní náplní kontrolní činnosti EP během realizace testů energetického spouštění byla opět přítomnost klíčových expertů č. 6 (Odborník na režimy jadrového zariadenia a bezpečnostné systémy) a č. 7 (Odborník na fyziku jadrového reaktora) na blokové dozorně 3. bloku. Při této činnosti se řídili obdobnými dokumenty jak při fyzikálním spouštění s tím, že se jednalo o Etapový program energetického spouštění 3E001 a programy energetického spouštění.

Procesně, během celého období obou výběrových řízení, probíhalo plnění týmu expertů externí podpory nejen formou předkládání záznamů, stanovisek a dílčích zpráv na základě příslušných objednávek, ve kterých byly specifikovány jednak úkoly, ale také klíčoví experti, kteří se na plnění mají podílet, ale také účastí a podpoře ÚJD SR na jednáních se zástupci společnosti Slovenské elektrárne, kterých zejména během etapy fyzikálního spouštění a podetap energetického spouštění byla celá řada.

Úlohou EP bylo a bude po každé ukončené etapě, resp. podetapě, posoudit provedené

testy co do úplnosti, splnění kritérií a způsobu dokladování a vydat stanovisko pro ÚJD SR.

Během realizace horké hydrozkoušky, fyzikálního spouštění i energetického spouštění je pracovníky externí podpory pro ÚJD SR rovněž zpracovávána časová osa průběhu hlavních činností na 3. bloku EMO a vedení elektronické evidence vad a nedodělků z programů a zkoušek.

Po uvedení 3. bloku EMO do zkušebního provozu se budou pracovníci externí podpory ÚJD SR věnovat připravenosti 4. bloku EMO ke studeným zkouškám.

Reference:

[1] Činnost sekce spočívá především v podpoře spouštění jaderných bloků, což je například uvádění jaderných bloků do provozu po jejich modernizaci. Poskytování technické podpory a dozor nad spouštěním nezávisle na provozovateli jaderného zařízení či operátorovi (např. SÚJB). Cílem je především dosažení co nejvyšší technické úrovně, a hlavně nejvyšší možné bezpečnosti jaderného zařízení při udělování licence pro provozování jaderného zařízení.



Ing. Jiří Pulec

pulec@tes.eu

V roce 1979 absolvoval Vysoké učení technické v Brně, katedru tepelně energetických strojů a zařízení se specializací na turbíny. Po ukončení vysoké školy jeho profesní život a práce sestávaly z další přípravy na spouštění jaderných elektráren. Absolvoval státní zkoušku pro provoz a řízení jaderných bloků a pracoval jako vedoucí reaktorového bloku pro spouštění ve společnosti VÚJE. Od roku 1996 pracoval na přípravě a realizaci spouštění

JE Temelín jako zástupce vědeckého vedoucího spouštění a vedl tým pracovníků vědeckého vedení u společnosti TES s.r.o. V roce 2007 se zúčastnil mezinárodních misí MAAE v Iránu a Bulharsku, které se zabývaly předáváním zkušeností ze spouštění jaderných elektráren v ČR. V roce 2009–2013 vedl týmy pro přípravu a realizaci zkoušek po záměně systému kontroly řízení v JE Dukovany a využití projektových rezerv výkonu v JE Dukovany a JE Temelín. Od roku 2015 vede tým klíčových expertů vědeckotechnické podpory ÚJD SR pro spouštění JE Mochovce (EMO34) na Slovensku.

3D model: Jadrová elektrárň VVER-440/V-213

Mgr. Róbert Holý
Slovenské elektrárne, a.s.

Slovenské elektrárne v priebehu dostavby 3. a 4. bloku AE Mochovce postupne spracovávali reálny 3D model elektrárne VVER 440. Pri uvádzaní nového bloku do prevádzky si dali z tohto modelu spracovať dva krátke videofilmy pre lepšie pochopenie princípu výroby elektriny a funkcie bezpečnostných systémov. Tento 3D model elektrárne sa v budúcnosti bude dať využiť aj na virtuálne školenia a iné užitočné aplikácie.

Slovenské elektrárne step-by-step created a real 3D model of the VVER-440 power plant during the Mochovce NPP Units 3&4 completion. When commissioning the new unit, the Company had two short videos developed from this model in order to better understand the principle of electricity generation and the function of safety systems. This 3D power plant model can also be used in the future for virtual training and other useful applications.

Pre lepšie pochopenie princípu výroby elektriny v jadrovej elektrárni Slovenské elektrárne pri príležitosti uvádzania nového mochovského bloku do prevádzky pripravili 3D model elektrárne VVER-440/V-213, určený pre laickú i odbornú verejnosť. Takýto typ jadrových elektrární je v prevádzke na Slovensku – v Mochovciach aj Bohuniciach, ale aj v Česku, Maďarsku, na Ukrajine a vo Fínsku.

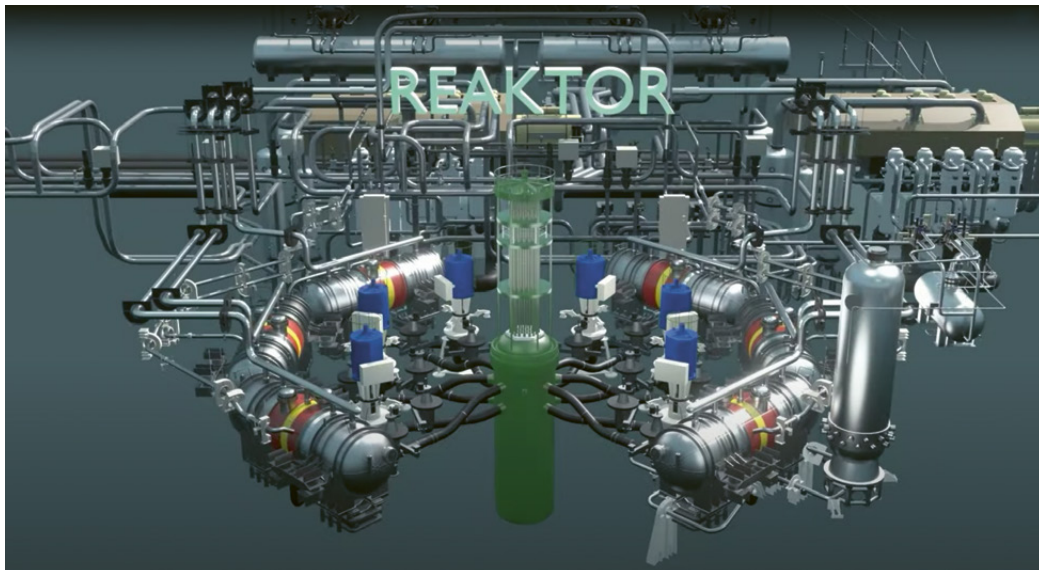
Tlakovodné reaktory VVER-440 sa od svojich typických súrodencov líšia nielen nižším výkonom, ale najmä odlišným dispozičným riešením primárneho okruhu so šiestimi chladiacimi slučkami a ochrannou železobetónovou ochrannou obálkou – kontajmentom so systémom na znižovanie tlaku – vákuo-barbotážnym systémom.

Pri dosiahnutí minimálneho kontrolovaného výkonu 3. bloku Atómových elektrární Mochovce sme vypublikovali video¹, ktoré zobrazuje špecifické dizajnové črty „štyristoštyridsiatky“ a zároveň popisuje základné pro-

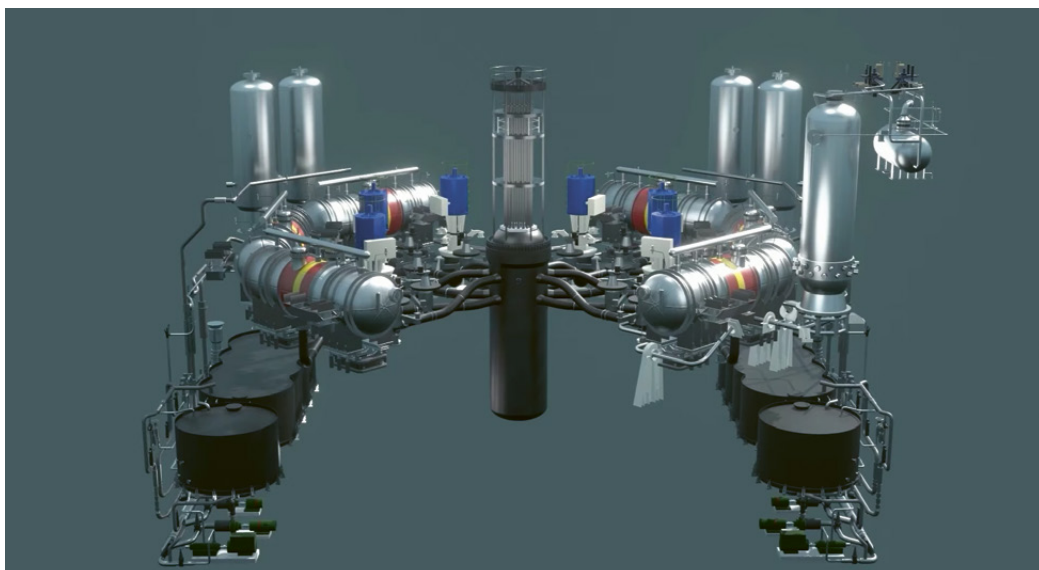
cesy jadrovej elektrárne. Dozviete sa v ňom všetko podstatné o výrobnom procese od štiepenia jadier uránu v jadrovom palive až po odpar vody z chladiacej veže. Video vás prevedie primárnym okruhom s reaktorom cez parogenerátory až do turbogenerátorov, ktoré vyrábajú elektrinu; a ďalej z kondenzátorov až do chladiacich veží, ktoré sú potrebné na chladenie pary vystupujúcej z turbogenerátorov a jej spätnú premenu na kvapalné skupenstvo.

Druhé video², ktoré sme zverejnili pri príležitosti dosiahnutia 55% výkonu reaktoru 3. bloku Mochovce, zase popisuje činnosť bezpečnostných systémov elektrárne pri roztrhnutí primárneho potrubia. Zahŕňa automatické odstavenie reaktora, doplňovanie chladiva z vysoko a nízkotlakového aktívneho systému a pasívnych systémov – hydroakumulátorov, ako aj činnosť vákuo-barbotážnej veže.

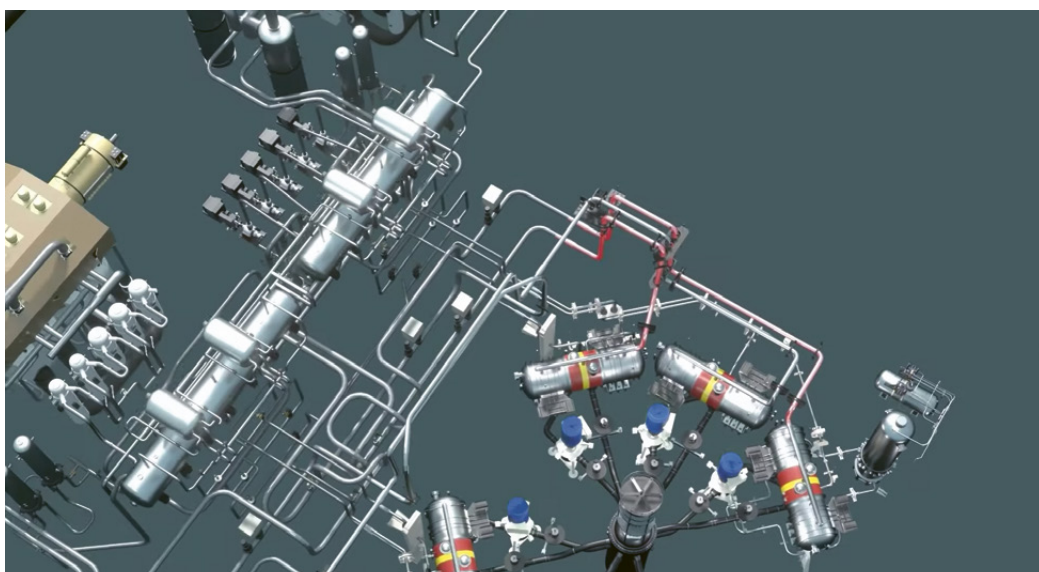
V rokoch 2021–2022 bola trojrozmerné detailne naskenovaná hermetická zóna nového



←
Obr. 1 3D model
VVER-440 – reaktor



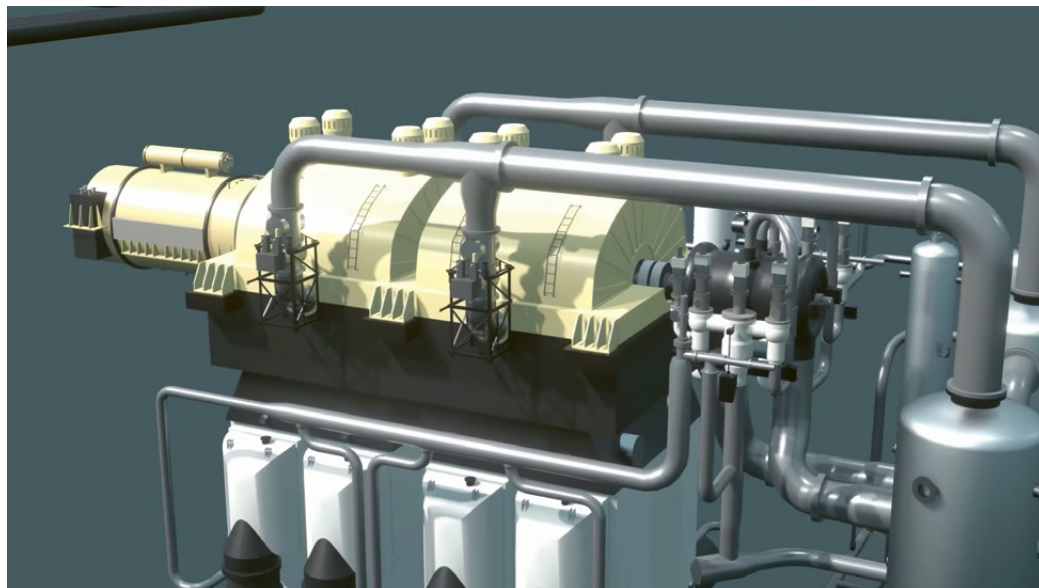
←
Obr. 2 3D model
VVER-440 – primární
okruh, havarijné
systémy



←
Obr. 3 3D model
VVER-440 – sekundární
okruh



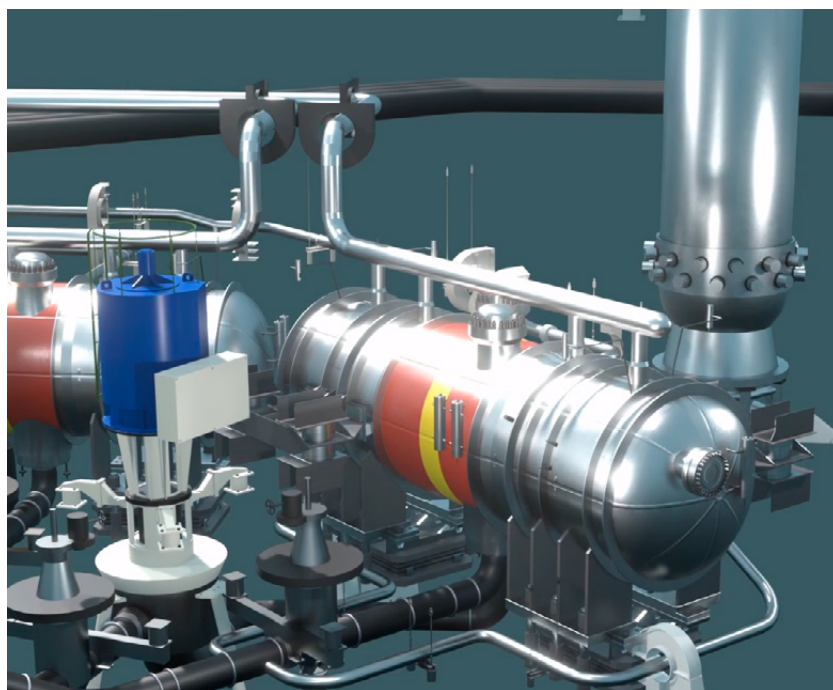
Obr. 4 3D model
VVER-440 – turbína



Obr. 5 3D model
VVER-440 –
kontejner bloku



Obr. 6 3D model
VVER-440 –
parogenerátor a hlavní
cirkulační čerpadlo



bloku elektrárne Mochovce a na tvorbu videa sa využil aj 3D počítačový model 4. bloku elektrárne, z ktorého bolo potrebné odfiltrovať nepotrebné dáta pre účely oboch video produktov. Obrovské množstvá dát následne prešli čistením, textúrovaním komponentov, kreslením ich vnútorných častí a animovaním funkcionality, aby sme „vyrenderovaním“ finálneho videa predstavili verejnosti 3D mo-

dely, ktoré ukazujú naše technológie oveľa detailnejšie.

V rámci stratégie digitalizácie Slovenských elektrární plánujeme v nadchádzajúcich rokoch do digitálneho sveta premietnuť objekty a zariadenia aj ďalších, nielen jadrových elektrární, ktoré bude možné v budúcnosti využiť aj na iné účely, napr. virtuálne praktické školenia personálu prevádzky alebo údržby.

Reference:



[1] špecifické dizajnové črty VVER-440
<https://energoland.sk/multimedia/>



[2] činnosť bezpečnostných systémov elektrárne pri roztrhnutí primárneho potrubia
www.youtube.com/watch?v=94kfCfRjzY



Mgr. Robert Holý

robert.holy@seas.sk

V roku 1992 absolvoval štúdium na Univerzite Komenského, odb. Tv–Anglický jazyk. Od ukončenia univerzity pracuje v Slovenských elektrárnach – najprv ako tlmočník a prekladateľ, a od roku 1996 ako vedúci informačného centra AE Mochovce. Neskôr pracoval ako vedúci oddelenia komunikácie EMO a následne ako vedúci komunikácie oboch jadrových elektrární. Pod jeho vedením vzniklo v Mochovciach interaktívne

informačné centrum Energoland, ktoré ocenila aj Európska nukleárna spoločnosť v roku 2017 cenou Komunikačný projekt roka. Aktívne pracuje v SNUS ako vedúci sekcie komunikácie. Dlhé roky je zástupcom Slovenských elektrární v pracovných skupinách FORATOM-u a od roku 2022 je predsedom Výboru pre komunikáciu a obhajobu jadra v Nucleareurope.

Nuclear Power in France and its Contribution to Reaching EU's Climate Objectives: Yesterday, Today and Tomorrow

Part 1

Jan Barták, Noël Camarcat
NucAdvisor

V první části tohoto článku uvádíme stručný přehled francouzského jaderného programu, který byl realizován v posledních třech desetiletích 20. století, čímž se Francie stala světovým lídrem v podílu jaderné energie ve svém energetickém mixu. Poté vylíčíme historii evolučního reaktoru generace III+ – EPR – a analyzujeme dosavadní výsledky, výzvy, obtíže a ponaučení od raných fází projektu přes výstavbu až po uvedení reaktorů EPR do provozu ve Francii, Finsku, Číně a Velké Británii. V části II nastíníme nedávno oznámený program výstavby nových jaderných elektráren ve Francii s reaktory typu EPR2, což je upravená verze EPR integrující dosavadní zkušenosti z výstavby reaktorů EPR v různých zemích. Program zahrnuje také zahájení výstavby prvního prototypu SMR do roku 2030 a zmiňuje několik exportních příležitostí.

In Part I of this paper we provide a brief overview of the French nuclear program that was implemented in the last three decades of the 20th century, making France the world leader in the share of nuclear power in its energy mix. We then recount the history of the evolutionary Generation III+ reactor – the EPR – and analyse the track record, challenges, difficulties, and lessons learnt from the early design stages through construction and up to commissioning of the different EPR projects in France, Finland, China and the UK. In Part II, we will outline the recently announced nuclear new build program in France that will deploy the EPR2 reactor, an evolution of EPR integrating the experience feedback from the construction of EPR reactors worldwide. The program also plans the construction the first SMR prototype by 2030, and several export opportunities are being developed.

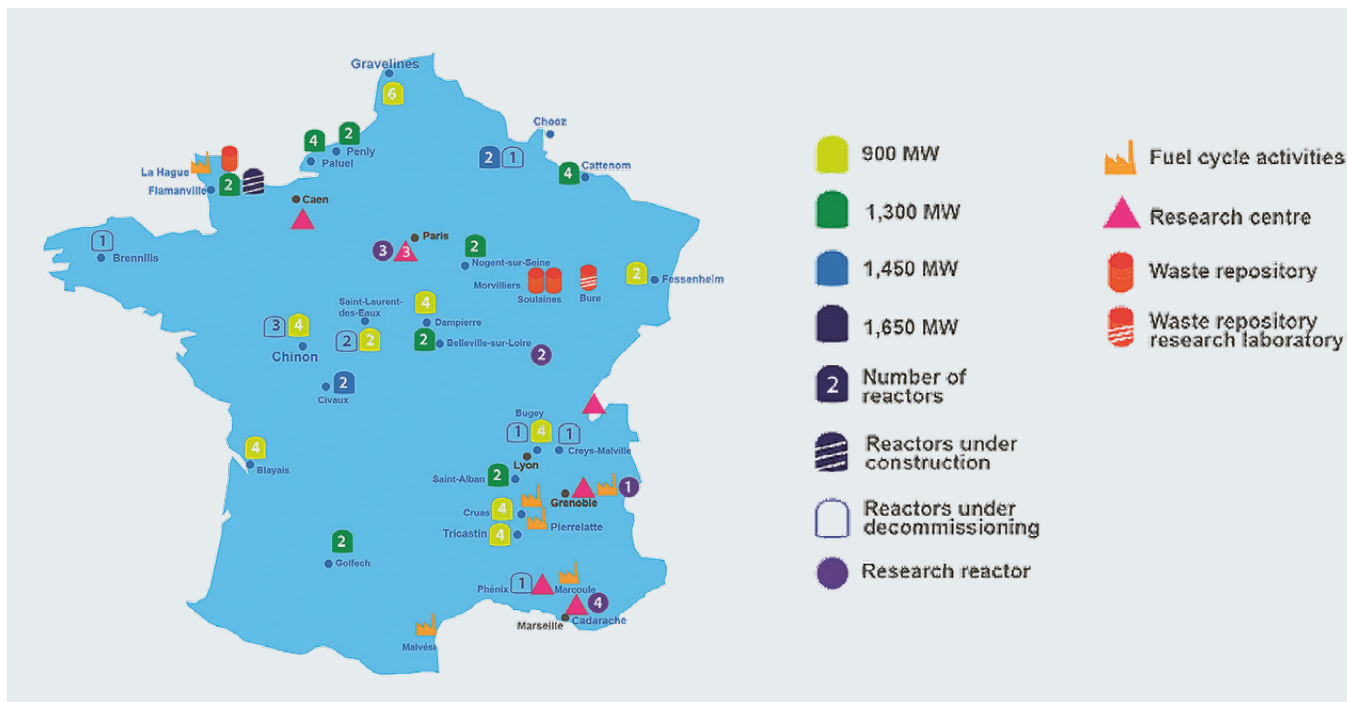
1. The success and glory of the French nuclear industry – a brief history

It is a common and well-known fact that France generates about 75% of its electricity from nuclear power and has now 56 nuclear power plants in operation (2 units of 900 MW each were permanently shut down in 2020 for political reasons). With another 15% generated by hydro power plants, France has one of the lowest GHG-emitting electricity systems in Europe and indeed in the world.

The launch of this unique feat in the history of energy transitions was triggered by the first oil shock in 1973. The sudden multiplication by four of oil prices revealed the level of France's dependence on imported oil and on foreign powers. In March 1974, the Prime Minister Pierre Messmer announced the launch of an ambitious nuclear development program accompanied by a series of energy sobriety measures – a kind of green deal more than 45 years ahead of time. The Prime Minis-



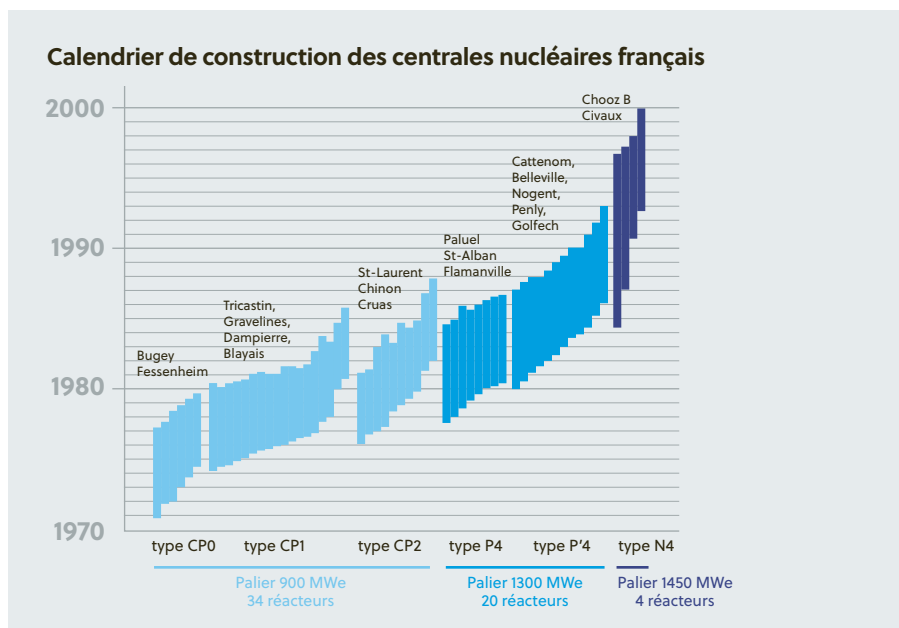
Fig. 1: NPPs and other nuclear facilities in France (the two units at Fessenheim are no longer in operation since 2020)



ter stated: "It is true that France has not been very favoured by nature in terms of energy resources. We have almost no oil on our territory, we have much less coal than England and Germany, and less gas than Holland. Our great chance is our electrical energy of nuclear origin".

The initial "Messmer" plan included the construction of thirteen 900 MW reactors, it was later complemented by another plan, altogether 34 units of 3-loop 900 MW reactors were built. In April 1977, the first PWR Fessenheim 1 was connected to the electricity grid. Power plants with a unit capacity of 1,300 MW were built starting from 1979 (20 units). The construction effort continued until the end of the century, the fourth and last N4-type reactor with a unit capacity of 1,450 MW was connected to the grid in 1999. By then, three-quarters of the electricity produced in France was of nuclear origin. Fifty-eight reactors were in operation in 19 power plants.

Obviously, it would not have been possible to launch and develop successfully such an ambitious program without having the necessary skills and capabilities already in place at the outset of the program. Immediately after the end of World War II, under the leadership



of General de Gaulle, France started developing its nuclear defence program and, transferring the accumulated know-how to the civil sector, developed a multitude of nuclear power technologies: the most important one was the gas-cooled, graphite-moderated technology using natural uranium. Nine such reactors were built. But there was also one heavy-water reactor, one PWR and two fast neutron sodium cooled reactors constructed by 1973.



Fig. 2: The schedule of construction of the French reactor fleet

It is interesting to note that once France decided to abandon the graphite-gas reactor technology the intention was to develop an industrial policy based on both PWR (Westinghouse) and BWR (General Electric) technologies, creating competition and maintaining the independence of choice. Two orders were placed for BWRs, but the project was finally abandoned in July 1975, EDF then turning officially and only to PWRs, Westinghouse's licensed technology carried out and progressively indigenised by the "Franco-American atomic constructions" – Framatome. Hence the new program took benefit of the competitiveness and maturity of the American PWR technology and was supported by the construction of a uranium enrichment facility in France, enriched uranium being indispensable for light water reactors.

The speed of construction of the NPPs within this program remains unparalleled in the world, even China has not (so far at least) achieved the pace of construction that was achieved in France in the 1980s. In the sole year of 1981, 8 units were connected to the grid.

In parallel with the development of its domestic nuclear program, France also had several successes in exporting the Framatome-designed 3-loop 900 MW reactors. Two units were commissioned in 1984 at Koeberg in South Africa, two units in 1988-89 at Hanul (previously Ulchin) in South Korea. France stood at the cradle of the Chinese nuclear program and made a major contribution to the training and development of first generation of Chinese nuclear specialists. Many of these are now at the helm of the Chinese nuclear industry and institutions. Two 900 MW units were built at Daya Bay in the Guangdong province, commissioned respectively in 1993 and 1994, and two more units at Ling Ao, just 1 km north of Daya Bay, commissioned in 2002. The two additional units at Ling Ao use the indigenised design CPR-1000, they were constructed in conjunction with Areva and are based on the French 3-loop design.

2. The genesis of the EPR and the projects in France, Finland, China and the UK

In 1989 Framatome and Siemens created a joint company called Nuclear Power International (NPI). Its main purpose is to develop the EPR, a Generation III+ reactor which complies with both French and German nuclear regulations. The initial goal was to work hand in hand between the French and German operators (EDF and a consortium of German utilities), regulators and the industries of the two countries, and build the EPR in France and in Germany. The main design objectives were increased safety while providing enhanced economic competitiveness through improvements to the previous generation of PWR designs scaled up to an electrical power output of around 1,650 MWe with thermal power of about 4,500 MW. The EPR is the evolutionary descendant of the Framatome N4 and Siemens "Konvoi" reactors, with the objective to extract the best of the two designs and to have the design licensed both by French and German safety authorities.

In 2001 the nuclear activities of Framatome and Siemens merged into a new company called Framatome ANP, the same year the AREVA Group was created by a merger of Framatome, Cogema (fuel cycle front end and back end) and Technicatome (nuclear propulsion systems). The branch AREVA NP where Siemens had a participation, was in charge of the EPR design.

Unfortunately, the EPR development did not have the necessary political support in the post-Chernobyl period, opposition against nuclear power was growing in France and even more so in Germany. Electricity generation from nuclear in Germany started to decrease from 2006 – well before Fukushima. Siemens withdrew from AREVA NP in 2009 and following the decision of Angela Merkel to phase-out nuclear power in the wake of the Fukushima accident, definitively ceased its nuclear activities in 2011. The Franco-German EPR design was thus left fully in the hands of the French, with multiple design features emanating from the German Konvoi concept. Some of them,

Parameter	Value	Comment
Thermal Power	4,300 MW _t	Increased to above 4,500 MW _t at Taishan
Number of loops	4	
Number of fuel assemblies	241	UO ₂
Primary circuit operating pressure	155 bar	Similar to N4 units
Operations lifetime	60 years	
Number of safety trains	4	Allows maintenance during reactor operation
Containment characteristics	Double wall with internal liner	Severe accident design pressure 5.5 bar

←
Tab. 1 Main technical data of the FLA3 EPR reactor [1]

like the pressuriser relief valves, required more than 10 years to be qualified according to the French regulations. Difficulties were also encountered for the in-core instrumentation, previously developed for the Konvoi reactors.

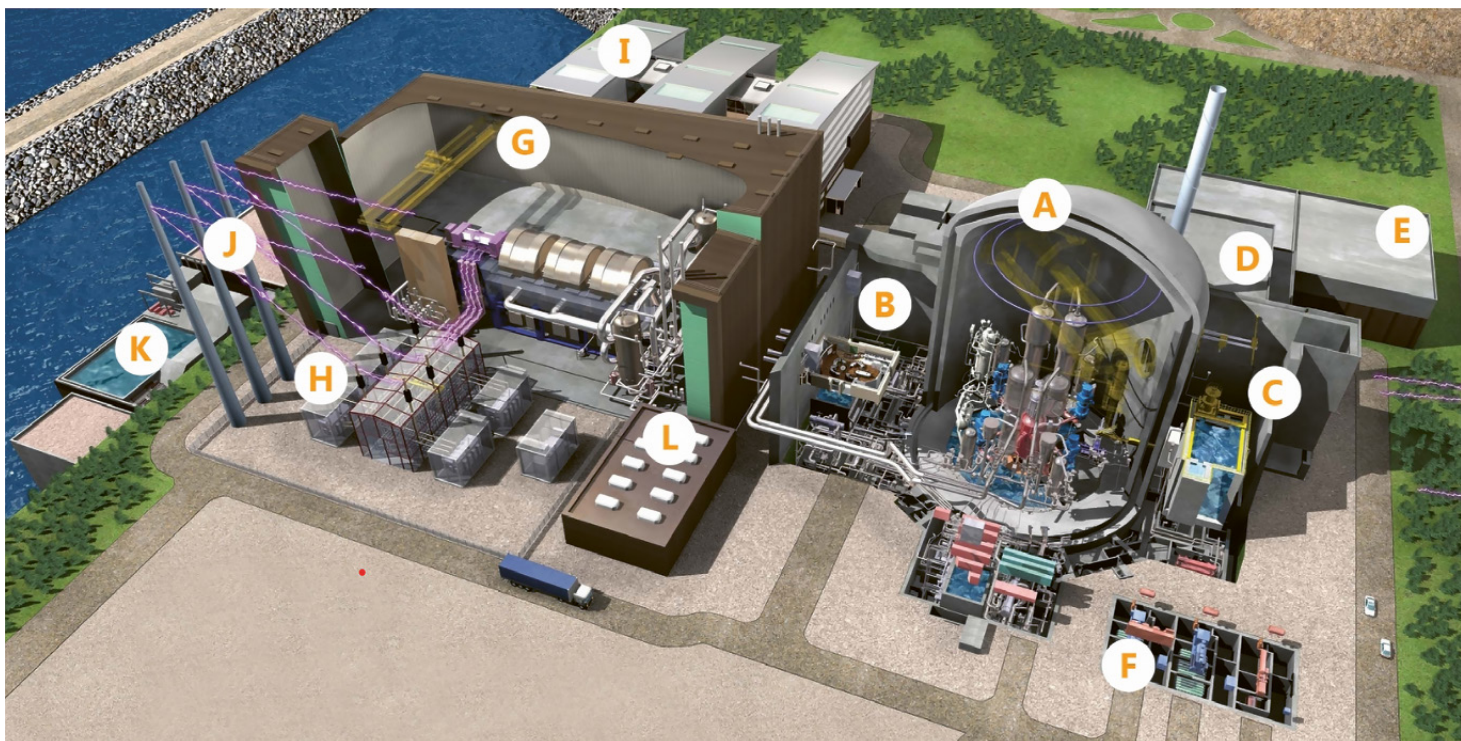
In 2003, after a long “nuclear winter” following the Chernobyl accident, Finland was the first European country to decide the construction of a new nuclear unit. AREVA, in consortium with Siemens, wished to benefit from a first mover advantage in the nuclear new-build market, bid a low price and signed a turnkey contract with TVO to build an EPR at Olkiluoto in 48 months for 3 billion euros.

In 2004 EDF decided to launch an EPR project in France, with a target commissioning

date in 2012, to be followed starting in 2015 by a serial construction of several EPRs expected to be operational from 2020 onwards – at a time when the first units of the Messmer program would reach 40 years of operation. In 2006 the EDF Board made the final investment decision to build the EPR as a 3rd unit at the Flamanville site in Normandy, where two 1,300 MW units were already in operation, with an anticipated budget of 3.3 billion euro and a construction time of 54 months. The main suppliers were AREVA NP for the nuclear island, Bouygues for the civil works and Alstom for the turbine island.

A second EPR was planned at the Penly site, early developments were also started in

↓
Fig. 3: The EPR reactor:
 A – reactor building
 B – 4 safeguard bldgs
 C – fuel bldg
 D – nuclear auxiliary bldg
 E – radwaste processing bldg
 F – emergency diesel bldg
 G – turbine bldg
 H – power transmission platform
 I – operator bldg
 J – pumphouse bldg
 K – outfall structure
 L – conventional electrical bldg



southern France for the construction of an AT-MEA1 reactor. These projects were abandoned in 2012 on political grounds, under increasing anti-nuclear pressure and a lack of a rational long-term energy policy.

2.1. The first EPRs: what went wrong and why

It is an ambitious task to detail all the teething troubles, problems and hurdles that occurred during the construction of the different EPRs in general, and the FLA3 EPR in particular. A compilation of the most significant ones has been performed in the Folz report commissioned by EDF's CEO and published in 2019. We describe them in Table 2, stressing those which offer the most useful lessons for the future.

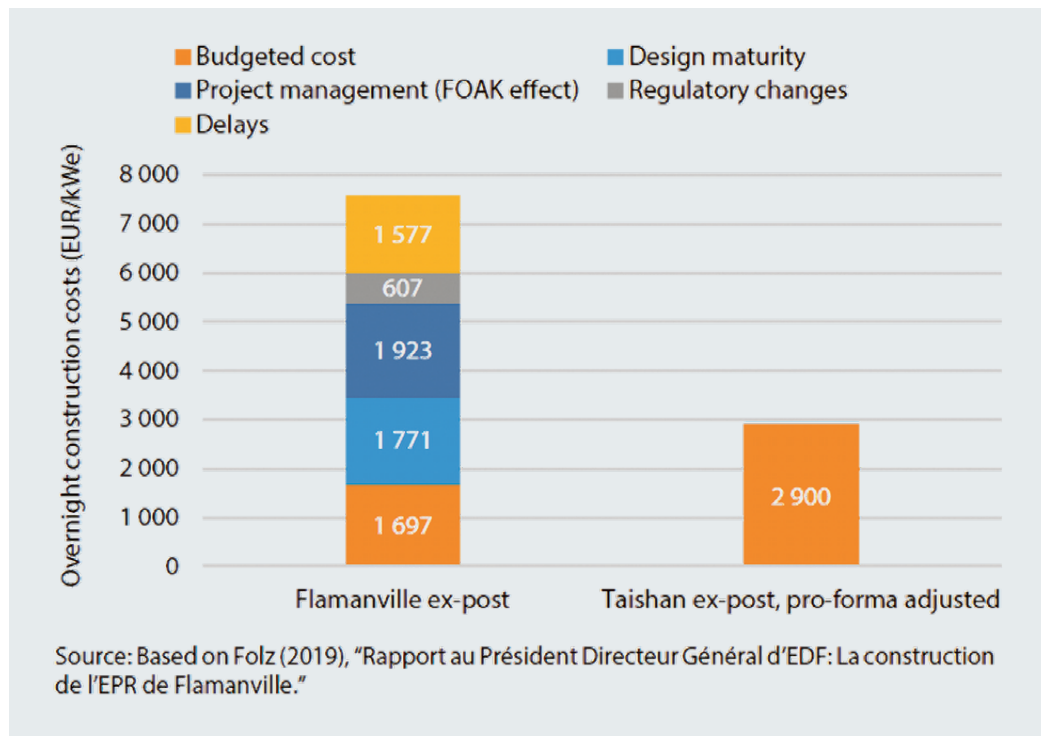
The OL3 EPR was the FOAK EPR reactor and AREVA NP was the turnkey vendor. For FLA3, which started two years later, EDF was the owner and architect-engineer and AREVA NP was the designer and supplier of the nuclear island. Even though a joint engineering platform was established, partly because the two companies were competing on international markets, partly due to difficult relationships between the top managers of the two companies, the collaboration was far from

smooth and the benefit of experience feedback from OL3 to FLA3 remained low.

The Taishan EPR in China (1st concrete in 2009, i.e. 4 years after OL3 and 2 years after FLA3), could benefit from the lessons learnt from its two predecessors in the early stages of construction. The integration of this experience feedback, combined with Chinese NPP construction experience and easy and fast access to qualified resources, enabled the Taishan construction to overtake both OL3 and FLA3. The flow of experience feedback reversed, allowing OL3 and FLA3 to benefit from the experience of Taishan in erection and commissioning activities. Consequently, the three projects were in many respects closely interrelated. On the other hand, since they were built in different countries with different regulatory frameworks resulting in differences in design, with different ownership and contractual structures, the experience feedback was not always directly transposable. The large differences in the regulatory environment and the lack of a stable proven detail design while the projects were progressing in parallel make each of them a FOAK, to a certain extent at least. We will therefore focus on



Fig. 4: Main drivers and amounts of FLA3 cost overruns (OECD-NEA, 2020)



General Cause	Examples	Nature of cost overruns	Comment
Optimism bias – unrealistic initial estimates	Poor assessment of the increase of complexity between N4 and EPR (4 safety trains, double containment etc.) resulted in totally unrealistic initial estimates of cost and schedule Competition with other vendor projects and overnight costs announced by them	1, 3, 4	This is a FOAK of a Gen III+ reactor: increased safety, improved economics, simplified maintenance Peer pressure between competing engineering teams
Project size and complexity	Design complexity: dual containment, two-room concept, 4 safety trains	4	
	Design concepts originating from “Konvoi” new to EDF and French safety authority	2, 3, 4	Pressuriser relief valves difficult to qualify according to French regulations. Novel design of in-core instrumentation with respect to French design.
	Constructability issues resulting from attempts to minimize the size (and cost) of certain buildings or rooms → made erection and installation works more complex to organise, coordinate and implement	1, 3	The criterion of concrete volume and iron mass minimisation used for the N4 units was no longer valid when applied to EPR nuclear islands. It induced very difficult building constraints when the walls of different levels were misaligned in the reactor building. The EPR2 civil works teams no longer used the N4 criterion, realigned the various containment walls and arrived at a slightly larger footprint for the EPR2 nuclear island. This phase in the conceptual redesign is called in French “réalignement des voiles du HR”.
	Building a single unit is risky and expensive – prefer twin units	3	The two-unit plant at Taishan clearly demonstrated the interest of having two units: experience feedback and access to “spare” parts
Poor project management and governance	Project governance No clear separation of roles and responsibilities between owner, architect-engineer No clear assignment of “project director” and of a clear chain of command reflecting the financial, strategic, technical and reputational challenges of the project	3	It was only in 2015 that a full-time project director had been nominated and positioned as N-2 with respect to the CEO (Folz report)
	Project management tools and methods Limited implementation of systems engineering principles, latest digital tools and platforms Design tools and schedule tools not shared with the supply chain Excessive external pressure (media, anti-nuclear sentiment in society) did not favour transparency, detection of weak signals, early warnings Late move of project management teams to the construction site	3, 4	The poor integration of the various engineering tools resulted in difficulties and delays in the installation of electro-mechanical equipment The safety authority (ASN) rigorously performed its watchdog function
	Complex organisation of engineering activities – multiple sites, multiple interfaces, difficult coordination	3, 4	

LEGEND TO TABLE 2

Nature of cost overruns: 1: Quantities and scope evolutions (lack of design maturity), 2: Regulatory changes unknown at project start, 3: Schedule extensions, 4: FOAK-specific (engineering or manufacturing, project management)



Tab. 2 A summary of the main difficulties of the FLA3 EPR construction (tab. cont. on next page)



Tab. 2 A summary of the main difficulties of the FLA3 EPR construction

General Cause	Examples	Nature of cost overruns	Comment
Low level of completion of detail design	Only 40% of detailed design completed at 1st nuclear island concrete Low design maturity resulted in modifications being done late in the process resulting in significant rework (engineering, construction, erection)	1, 3, 4	Required design engineering hours after the first concrete had to be multiplied by a factor 7 between the initial forecast and actual rework 4500 design modifications, 8 design configurations, while a "normal" project of this size and complexity should require only 3 or 4 configurations
Evolution of regulatory requirements	Fukushima	2	A crisis centre common to the three reactors on the site was built, the hard-core concept of safety equipment was applied for FLA 3 but this required only minor changes to the existing design
	Manufacturing quality controls	2, 3	Inspections revealed numerous deficiencies in the fabrication and quality control of forged ingots and parts
	Evolution of ESPN regulation – the RPV and RPV head issues	2, 3	Regulation for pressurised vessels and other equipment underwent considerable changes between 2005 and 2018. New requirements were issued over a large time frame for technical qualifications, fabrication processes and controls, welding processes, non-destructive and destructive testing and controls, transient stress calculations and validations. The reader is invited to read the consequences of this "continuous evolution of the regulatory framework" for the FLA3 pressure vessel, its lower and upper heads in [1]
	Break preclusion safety demonstration	2, 3	In 2017, it was revealed that the high-quality requirements for welds on the secondary circuit main steam pipes were not achieved. This was a breach of the "break preclusion" safety requirements and about 50 welds had to be redone. This was particularly challenging for 8 of them which traverse the two containment walls.
Poor relations with the supply chain	Numerous contract amendments resulting from design changes, scope and quantities evolutions resulting in multiple contract amendments and re-negotiations	1, 3	
	Contractual framework lacking incentives Multiple levels of sub-contracting Delegation of responsibility	3	
General loss of competences and skills	Within EDF – time since last project Retirement of the previous generation of experienced specialists "Over-engineering" and "over-specification" – loss of understanding of industrial and construction field realities	3, 4	
	Within the supply chain: Loss of competences due to decades of no visibility, no investment Loss of competencies for equipment qualification while at the same time the regulations were strongly reinforced	3, 4	Too much stress is put on documentary control while neglecting the quality of the technical performance and individual skills
	Welding	3	Shortage of highly qualified welders, lack of anticipation, training
LEGEND TO TABLE 2			
Nature of cost overruns: 1: Quantities and scope evolutions (lack of design maturity), 2: Regulatory changes unknown at project start, 3: Schedule extensions, 4: FOAK-specific (engineering or manufacturing, project management)			

the FLA3 project where EDF is the owner and future operator, and the architect-engineer of the entire project.

As of today, the two units at Taishan have been commissioned and demonstrate the pertinence of the design. Unit 1 ran quite smoothly for such a novel design during its 18-month first cycle. An increase of the primary circuit's activity was reported during the second half of 2021. The activity increase was within the plant's technical specifications, and the operator shut the reactor down to investigate the possible causes. Details appeared in the French media in November 2021. Fuel vibrations due to unexpected transverse thermohydraulic flows in the bottom part of the reactor vessel caused unwanted rod vibrations. Those in turn induced cladding erosion and leaks on a limited number of fuel assemblies. A similar problem was encountered as early as 2001 on the French 1,300 MW units, using 14 feet fuel assemblies. The remedy at that time was to add a supplementary grid at the bottom of the assemblies to stiffen the mechanical structure and reduce the unwanted vibrations (fretting). It is expected that similar solutions will be adopted on EPR units.

The OL3 EPR was first connected to the grid on 12 March 2022. After unfortunate delays in the scheduled power ramp-up due to a metallic object found in the separator-reheater, followed by cracks observed in the impellers of all four main feedwater pumps necessitating their replacement, the reactor finally started commercial operation on 16 April 2023. Since then, OL3 has been supplying about 14% of Finnish electricity.

For the FLA3 EPR the detected faults in the finishing standards of some of the pipe welding have now been repaired, hot testing is progressing. An additional program of hot testing, called Overall qualification tests, will be conducted in autumn 2023. The regulator launched a public consultation prior to commercial operation, which took place from 5 June to 15 September 2023. Commercial operation is now foreseen in the first half of 2024.

An overview of the cost increase resulting from the main 4 categories of cost overruns is presented in Figure 4 below, together with a comparison with the as-built overnight cost of the Taishan EPR1.

2.2. The Hinkley Point C EPR project in the UK

EDF purchased British Energy, now EDF Energy Nuclear Generation Ltd, in 2009 with the clear objective to participate in the UK new nuclear build program. In September 2008, EDF announced plans to build a twin-unit EPR at Hinkley Point (Hinkley Point C – HPC), at a site where two gas-cooled reactors were built (Hinkley Point B Advanced Gas-cooled Reactor is still in operation, Hinkley Point A Magnox reactor is being decommissioned). For this purpose, a subsidiary – Nuclear New Build Generation Company (NNB) was created in 2009 to build and then operate the twin-EPR unit at HPC and possibly a second one at Sizewell. At the end of 2012, EDF (jointly with AREVA) completed the UK's generic design assessment (GDA) process with the UK Safety authority (ONR) and were awarded the "Design Acceptance Confirmation" from the ONR and a "Statement of Design Acceptability" (SoDA) from the Environment Agency. In the same year EDF finalised the negotiation with the UK government of the "strike price" for electricity from HPC under the "Contract for Difference" (CfD) framework. The agreed strike price was £92.50/MWh (in 2012 prices), to be adjusted to inflation (£106/MWh by 2021) during the construction period and over the subsequent 35 years tariff period. The base strike price could fall to £89.50/MWh if a new plant at Sizewell was also approved. In 2014 the European Commission approved the project, i.e. confirmed that no state aid rules were breached. Long and difficult negotiations ensued related to completing the investor roundtable. Ultimately, the UK government agreed that Chinese CGN would take a one-third stake in the project. The Board of EDF made the final investment decision in 2016.



Fig. 5 The Penly NPP in Normandy with two 1300 MW reactors. Next to them, two EPR2 units will be built (source EDF)

The first concrete of the NI was poured in the end of 2018. After the announcement of a 12-month delay in February 2021, partly attributable to the COVID pandemic, the Commercial Operation Date is currently scheduled in mid-2027.

The HPC project benefits from the lessons learnt from the previous projects, albeit with some limitations. It faces its own lot of specific risks like the legal and political risks related to the agreements signed with the UK government and with the Chinese partner, exchange rate risk, or the risk of the still immature supply chains. The complexity of project organisation and governance, involving UK and French entities is being streamlined only progressively. The project schedule was constructed using a top-down approach and was excessively optimistic.

Two main reasons are at the origin of schedule and cost overruns (15 months for the first unit, 9 months for the second unit and 1 billion £ respectively) announced in 2019:

- The nature of the soils and the changes in the design of the buildings have led to a much higher volume of earthworks than had been calculated, for an additional cost of approximately £450 million.
- The requirement of the ONR to duplicate the digital safety control system with an analogue system led to a major revision of the design of the EPR. The need to run

large numbers of cables, ensuring the evacuation of the heat they generate, installing dedicated control equipment necessitated a review of the architecture of the control buildings, their ventilation and their integration into the overall architecture.

As mentioned above, the NNB Generating Company prepares the construction of a second twin-EPR power station at Sizewell. Negotiations are ongoing with the UK government on the financing of the project, which will be different from HPC, with a stronger involvement and risk-taking by the government, which should lead to a lower price of electricity – this is the so-called Regulated Asset Base model, previously used to finance large public infrastructure projects. In terms of design, all efforts are being made to minimize the changes to those made strictly necessary by the new site, to maximise the experience feedback and re-use of methods, tools, project organisation and the supply chain.

Reference:

[1] The cost comparison with Taishan is not quite representative due to the large differences in labour costs as well as the costs of the of equipment and bulk materials for the Conventional Island and Balance of Plant, which were to a large extent procured locally in China

**Jan Barták**

jan.bartak@nucadvisor.com

MSc in nuclear engineering, PhD in nuclear reactor thermal Hydraulics, Jan Bartak has a track record of more than thirty-five years of work in the power industry, power engineering, nuclear safety analysis, thermal hydraulic modelling, simulation and training.

Extensive experience in international projects and business development activities (worked in Central and Eastern Europe, India, Thailand, Indonesia, Turkey), in the management of international teams.

Over the last 15 years Jan worked on the development and construction of large infrastructure projects including nuclear new build, covering a broad range of development activities: project structuring and organization, partnerships, economics, financing, preparation and negotiation of large contracts. Jan has experience of working with governments, international organisations and financial institutions. He served as board member in several energy companies and has considerable executive management experience. He joined NucAdvisor in 2019 as partner expert and in 2021 was elected Chairman of the Bord.

**Noël Camarcat**

noel.camarcat@nucadvisor.com

From 1979 to 2006 he worked as researcher and then as manager of R&D teams, programs and facilities at CEA. He was Fuel Cycle Director from 1994 to 2000, and later Nuclear Weapons Director at CEA/DAM Île-de-France and deputy Director of Laser MégaJoule (LMJ).

In 2007, he joined EDF's Generation and Engineering Directorate (DPI) and in 2015 he was appointed Director in charge of R&D relationships in the Division for Nuclear New Build (DIPNN). He has served as customer for nuclear R&D programs inside EDF and outside. He was EDF's project sponsor of the lifetime extension program of the Kozloduy 5 unit in Bulgaria, carried out in partnership with Rosatom Group.

After retiring from EDF in 2020, he took up the position of Senior Professor of Nuclear New Build at École des mines de Paris University where he created courses on EPR2, multirecycling in PWRs and in SMRs. He joined NucAdvisor as an expert partner in January 2021.

Z knihy **Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností.**

13. část

Ze vzpomínek Zdeňka Kříže, díl třináctý

Tak, jak se od poloviny padesátých let vyvíjely jaderné technologie, vyvíjel se i názor na bezpečnost a zejména pravidla v tomto novém odvětví. Prvotní linie byla zaměřena především na nešíření jaderných zbraní, vznikla Mezinárodní atomová agentura (MAAE), ale začínaly se formovat i národní dozory. V Československu vznikla Československá atomová komise (ČSKAE) a skupinka jaderných inženýrů kolem Ing. Jiřího Beránka a Ing. Zdeňka Kříže začala formulovat první pravidla jaderné bezpečnosti.

O počátcích jaderného dozoru v Československu poutavě píše Ing. Zdeněk Kříž, z jehož knihy „Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností Československé komise pro atomovou energii (1970–1992)“, vám přinášíme některé vzpomínky na začátky tohoto mladého, ale dynamicky se rozvíjejícího odvětví.

Umístování jaderných elektráren

Umístování jaderných elektráren bylo od počátku rozvoje jaderné energetiky považováno za významný pasivní prostředek k zajištění jaderné bezpečnosti, resp. snížení radiačních následků normálního provozu, ale hlavně radiačních havárií na okolní obyvatelstvo a životní prostředí. Původním požadavkem umístování jaderných elektráren byla velká vzdálenost od velkých populačních center a možnost vytvoření tzv. ochranného pásma bez trvalého osídlení obyvatelstva.

Časem se ukázalo, že tyto požadavky v řadě menších zemí s hustým osídlením v Evropě nelze zcela splnit, a proto ztratily na původním významu. To samozřejmě kladlo nároky na zvýšení jaderné bezpečnosti technickými prostředky. Před stanovením bezpečnostních požadavků byla pro výběr lokalit jaderných elektráren používána hlavně energetická kritéria, jako jsou potřeby rozvodné sítě, náročnost vyvedení výkonu, dostupnost

potřebné chladicí vody, dobré geologické podmínky pro zakládání staveb a rovný terén s dobrým odvětráváním provozních výpustí a podobně.

Problematika umístování jaderně energetických zařízení byla u nás poprvé zpracována do bezpečnostních požadavků ve výnosu ČSKAE č. 4/1979 o umístování jaderně energetických zařízení z hlediska jaderné bezpečnosti, o kterém je zmínka na jiném místě. Byl zaveden soubor asi čtyřiceti vylučovacích a podmíněně vylučovacích kritérií. První z nich byla kritéria absolutní a bylo nutné je bezpodmínečně dodržet, druhý typ kritérií bylo možné kompenzovat různými opatřeními v projektu (např. zvýšení seizmické odolnosti). Mezi kritérii v původním předpisu byly a jsou i v současně platné vyhlášce SÚJB č. 215/2004 charakteristiky lokalit, které jsou považovány za nejvíce rizikové pro bezpečnost jaderné elektrárny, jako je seizmicita, pád letadla, povodně a extrémní počasí (tornáda apod.),

možnosti výbuchů a požárů v okolí jaderné elektrárny a další extrémní jevy.

Výběr prvních dvou lokalit pro jaderné elektrárny Jaslovské Bohunice a Dukovany bezpečnostní kritéria pro výběr jejich lokalit ovlivnila jen málo. Zejména lokalita Jaslovské Bohunice byla vybrána na počátku 60. let. V důsledku toho má lokalita Jaslovské Bohunice vyšší seizmicitu s frekvencí 10-4/rok, která je způsobená zdroji zemětřesení v Rakousku. Dozor ČSKAE na tento problém vytrvale upozorňoval a k jeho řešení bylo přistoupeno v prvních letech provozu obou jaderných elektráren na lokalitě. Bloky byly postupně seizmicky z odolněny a seizmické otřesy byly zavedeny do havarijního řetězce pro odstavení provozu bloků (systém SIAZ).

Obecným problémem výběru lokalit byla nutnost vytvoření 3km ochranného pásma, které vyplývalo z tehdejších požadavků sovětské strany. Na základě toho bylo nutné vysídlit obyvatele z nejbližších vesnic, neboť lokality, které nemají trvalé osídlení do vzdálenosti 3 kilometrů, byly již tenkrát u nás ojedinělé. U Dukovan bylo dále např. nutno řešit dostupnost chladicí vody, a proto byly vybudovány přehrady Dalešice a Mohelno, a vyhodnotit riziko blízkosti vojenského letiště v Náměšti nad Oslavou. Ke snížení rizika pádu letadel na jadernou elektrárnu byla nad všemi lokalitami vytvořena zakázaná pásma pro letecký provoz ve tvaru válce, která měla již tak nízké riziko dále snížit.

V plné míře byly bezpečnostní požadavky na umístění jaderných elektráren uplatněny až při výběru lokalit pro JE Mochovce a Temelín. Postup výběru lokalit spočíval v tom, že v zájmovém regionu pro umístění jaderné elektrárny vytipovaly specializované organizace Terplan a Urbion více lokalit, které stanoveným kritériím vyhovují. Na základě detailního průzkumu a vyhodnocení, které provedl generální projektant – EGP –, byly vybrány dvě nejlepší lokality, které šly do užšího podrobnějšího průzkumu a posouzení. Jedna z lokalit byla hlavní a druhá záložní. Tyto dvě byly pak předloženy společně československo-sovětské expertize, která byla závazná

a kde ruská strana jako autor projektu měla rozhodující slovo.

V případech Mochovců a Temelína bylo toto rozhodující slovo uplatněno ve směru zvýšení bezpečnosti hlediska seizmicity. Požadavky na výběr lokalit ovlivnilo zemětřesení v Karpatech (Vrancea) v roce 1977, které zasáhlo svými otřesy jadernou elektrárnu s reaktory VVER-440 v Kozloduji v Bulharsku. Elektrárna v Kozloduji zemětřesení přestála bez úhony, tj. reaktor se automaticky odstavit a žádné zařízení nebylo vážně poškozeno. Bylo rozhodnuto všechna důležitá zařízení zkontrolovat a posílit antiseizmické vybavení bloků a zavést seizmické otřesy do havarijní ochrany reaktorů. Poté byl provoz bloků v lokalitě Kozloduj obnoven.

Sovětský generální projektant po této události podstatně zpřísnil požadavky na seizmicitu při výběru lokalit. Proto bylo rozhodnuto původní lokalitu v Mochovcích o několik set metrů posunout na skalní podloží. V praxi to znamenalo odtěžit zeminu kopce Malá Vápenná, což byly největší zemní práce v tehdejší Československu a znamenalo to odsun termínu spouštění o 1–2 roky. To byla nutná daň za vyšší jadernou bezpečnost. K obdobné situaci došlo později i v jižních Čechách. Při společné československo-sovětské expertize v roce 1981 sovětská strana požadovala použít pro výstavbu v té době záložní lokalitu Temelín místo hlavní varianty – Malovice. To byla nečekaná změna, protože u záložní varianty nebyla vyhlášena stavební uzávěra a mohlo se zde stavět (rodinné domky, kulturní dům apod.) bez omezení. V této souvislosti došlo v té době k ojedinělé situaci. V první polovině 80. let několik set občanů tohoto mikroregionu napsalo otevřený dopis tehdejšímu ministrovi resortu energetiky FMPE, kde vyjádřilo nesouhlas se změnami v umístění jaderné elektrárny a nutnosti vysídlit některé obce (Březí, Podhájí, Křtěnov, Temelín a Temelínec). Ministr musel zástupce obyvatel přijmout a vysvětlit jim důvody změny a přislíbil výhodné finanční kompenzace těm, kteří se budou muset přestěhovat. V 80. a 90. letech probíhal poměrně intenzivně rovněž průzkum

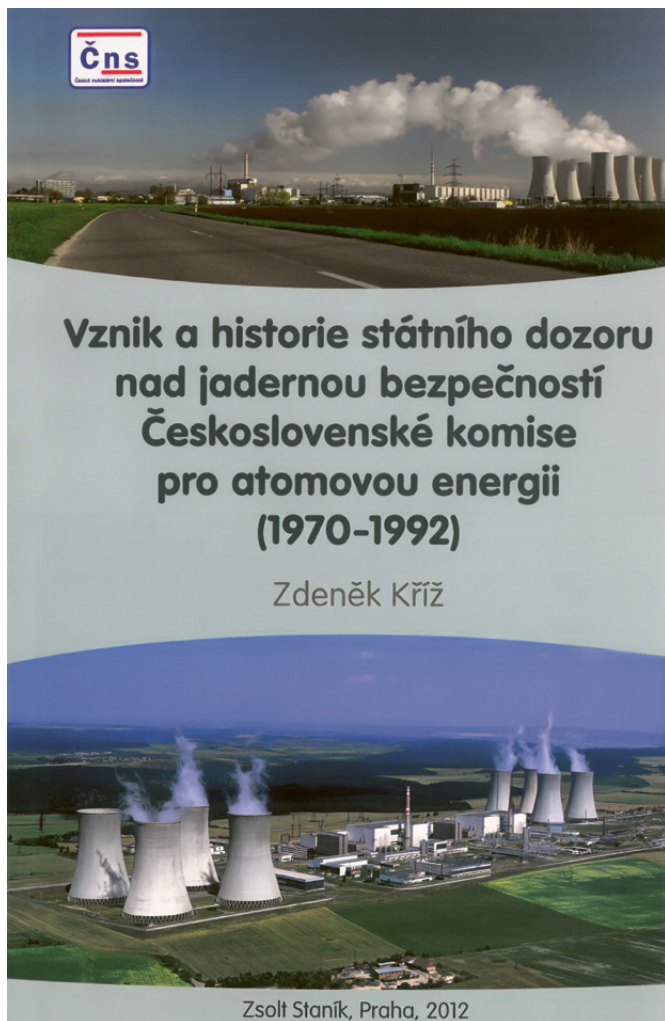
dalších vhodných lokalit pro jaderné elektrárny: Opatovice, Blahutovice v ČR a Kecerovce v SR. Usnesením vlády č. 18/1988 o komplexním porovnání lokalit jaderných elektráren východní Slovensko, východní Čechy a severní Morava a optimálním pořadí jejich výstavby bylo stanoveno jejich pořadí Kecerovce, Blahutovice, zatímco v případě východních Čech lokalita nebyla ještě specifikována a práce na jejím výběru nadále pokračovaly.

Na lokalitách Kecerovce a Blahutovice se plánovala výstavba bloků VVER-1000 a bylo stanoveno uzavřít v blízké době se sovětskou stranou příslušnou mezinárodní dohodu o spolupráci při výstavbě těchto JE. Pro Kecerovce byl vydán investiční záměr v roce 1988 a pro Blahutovice v roce 1989. Toto další plánované extenzivní pokračování čs. jaderného programu by samozřejmě vyžadovalo další posílení dozoru ČSKAE. Na ČSKAE se výběrem lokalit a jejich hodnocením zabýval dlouhodobě Ladislav Náměstek. Tyto extenzivní plány rozvoje čs. jaderného programu nebyly realizovány a v případě již schválené JE Temelín bylo vládou na počátku 90. let rozhodnuto realizovat jen dva bloky místo původních čtyř. Uvedené lokality zůstanou však zřejmě dlouhou dobu v záloze. Většina zemí plánuje nové bloky umístit na dosavadních lokalitách. To je případ i u nás, protože ČEZ plánuje pro výstavbu dalších bloků rozšíření jaderných elektráren v Temelíně a Dukovanech. Jsou pro to dva důvody. První, že tyto lokality byly již dříve schváleny, a je proto nutné pouze aktualizovat existující informace o lokalitě a jejím okolí a existující změny posoudit z hlediska bezpečnosti. Druhým důvodem je, že obě lokality mají dostatečnou chladicí kapacitu pro další bloky, což je v případě Temelína evidentní, neboť původně zde měly být vybudovány čtyři bloky.

Lokalizace JE byla u nás ovlivněna také plány na využití tepla pro vytápění okolních měst. V tom byla československá jaderná energetika jednou z výjimek ve světě, protože se pro všechny lokality plánovalo vyvedení tepla pro vytápění okolních měst: z Jaslovských Bohunic do Trnavy a Hlohovce, z Dukovan do Třebíče a Brna, z Mochovců do Levic

a z Temelína do Týna nad Vltavou a Českých Budějovic. Většina těchto projektů však nebyla realizována z ekonomických důvodů. Realizováno bylo pouze vyvedení tepla z JE V-2 v Jaslovských Bohunicích do Trnavy a Hlohovce (240 MWt), které patří mezi jeden z největších projektů vyvedení tepla pro vytápění měst realizovaných na světě. V provozu je ještě menší projekt vyvedení tepla z Temelína (50 MWt) do Týna nad Vltavou. Zde existuje poměrně velký potenciál jaderné energetiky pro řešení současného nedostatku fosilních paliv pro vytápění měst.

Z hlediska jaderné bezpečnosti vydala ČSKAE ve spolupráci s EGP v ediční řadě Bezpečnost jaderných zařízení bezpečnostní návod č. 2/1990 pro schvalovací řízení a požadavky jaderné bezpečnosti pro vyvedení tepla z jaderných elektráren. Je velmi pravděpodobné, že to byl ojedinělý dokument tohoto druhu na světě.



Ing. Zdeněk Kříž

Ukončil s vyznamenáním v roce 1964 studium na Fakultě technické a jaderné fyziky ČVUT jako jaderný inženýr. Po ukončení studia nastoupil do Ústavu jaderného výzkumu v Řeži (ÚJV Řež), kde pracoval jako výzkumný pracovník v úseku jaderné energetiky. V roce 1970 přešel do nově vzniklého oddělení jaderné bezpečnosti a záruk Československé komise pro atomovou energii (ČSKAE). Zde se aktivně podílel na rozvoji a prosazování státního dozoru nad jadernou bezpečností. Postupně prošel různými funkcemi až po funkci hlavního inspektora jaderné bezpečnosti (1989–1992). V roce 1993 přijal nabídku pracovat v Mezinárodní agentuře pro atomovou energii (MAAE) ve Vídni. Zde jeho hlavními úkoly bylo využívání provozních zkušeností prostřednictvím systému IRS a podpora činnosti orgánů dozoru v jaderné energetice. Podílel se na přípravě několika doporučení a účastnil se řady misí MAAE. Kromě několika výzkumných zpráv je autorem asi čtyřiceti prezentací, článků a publikací věnovaných dozorčí činnosti. Po návratu z MAAE v roce 2001 nastoupil opět do ÚJV Řež jako vedoucí vědeckého sekretariátu. V období 2001–2011 byl předsedou Poradního výboru pro jadernou bezpečnost předsedkyně SÚJB Dany Drábové a od roku 2004 externím členem Výboru pro bezpečnost jaderných zařízení ČEZ, a. s.

Jaderné zdroje energie pro vesmír

6. díl

Využití antihmoty

RNDr. Vladimír Wagner, CSc.
Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i.

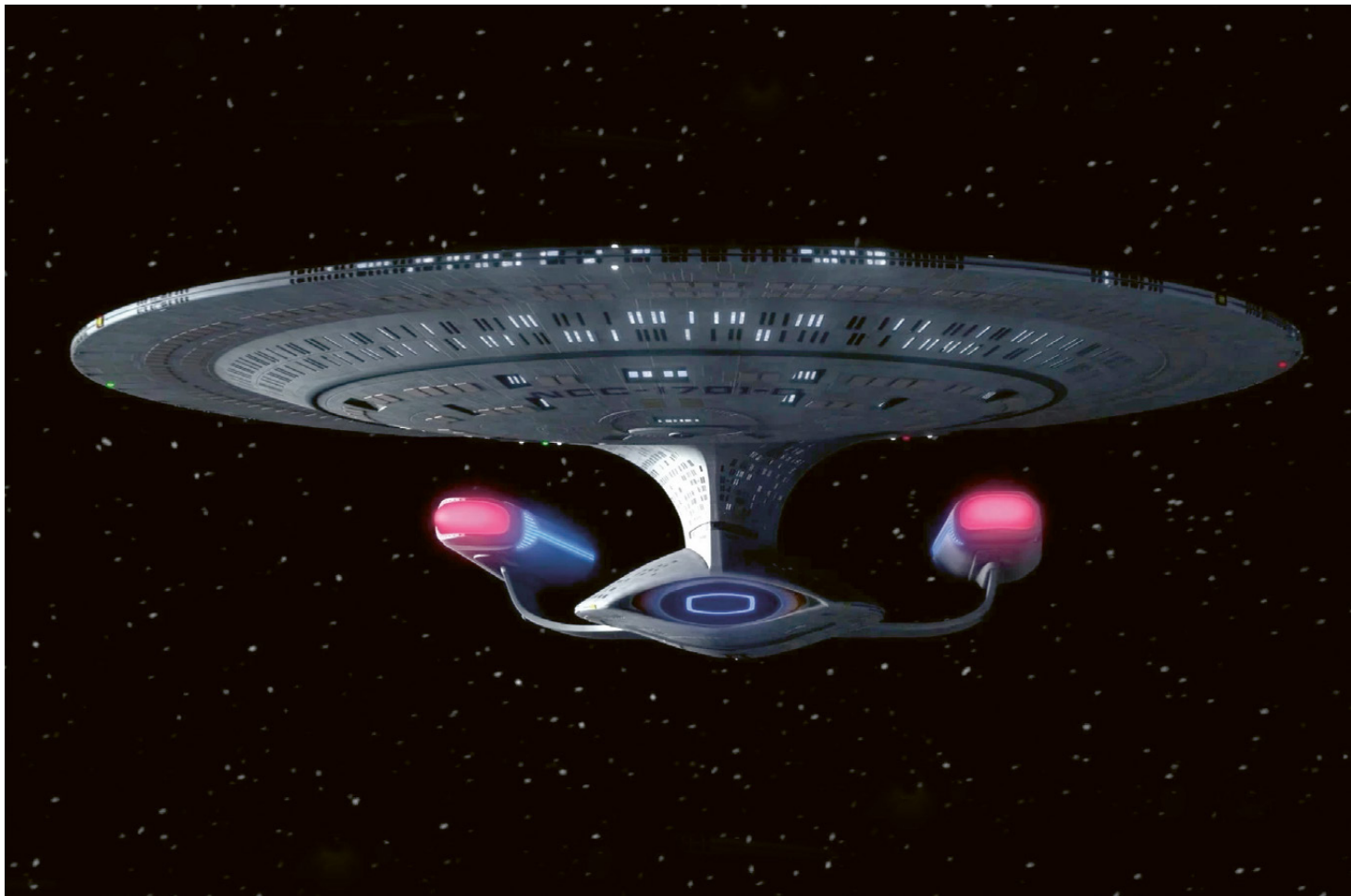
V této části seriálu se podíváme na nejefektivnější zdroj jaderné energie. Zatímco energii rozpadu jader a štěpnou řetězovou reakci už i ve vesmíru využíváme a k využití termojaderné fúze se již blížíme, s použitím antihmoty se zatím setkáváme pouze v seriálu Star Trek nebo jiné vědecké fantastice.

Základní vlastnosti antihmoty

Každá částice, ze které se skládá náš svět, má svého symetrického partnera – antičástici. Ta má stejnou hmotnost, velikost elektrického náboje, magnetického dipólového momentu, spinu a v případě, že není stabilní, i dobu života. Liší se ve znaménku elektrického náboje, magnetického dipólového momentu i v méně známých vnitřních fyzikálních veličinách, jako jsou baryonové či leptonové číslo, podivnost a další. V případě, že je částice neutrální a má hodnotu magnetického dipólového momentu a dalších zmíněných vnitř-

ních fyzikálních veličin nulovou, je antičástice totožná s částicí. Týká se to například fotonu, neutrálního mezonu pí nebo Z^0 bosonu. Existuje tak antičástice elektronu, která dostala název pozitron. U všech ostatních se přidá předpona anti, známe tak třeba anti-proton a antineutron, tedy antičástice k protonu a neutronu.

Pokud se částice potká s antičásticí, dochází k anihilaci, při které se klidová energie anihilujících částic z dominantní části přemění na energii kinetickou. Nejznámější je proces anihilace elektronu a pozitronu, kdy dojde k jejich přeměně na dvojici fotonů. V tomto případě se přemění na kinetickou energii veškerá klidová energie skrytá ve dvojici elektronu a pozitronu. V dominujícím počtu případů dochází nejdříve ionizací k zastavení pozitronu a jeho anihilaci v klidu. Dva vyzářené fotony tak mají stejnou energii rovnou klidové energii elektronu, tedy 0,511 MeV.



V případě anihilace protonu a antiprotonu vzniká několik mezonů pí. Neutrální pí mezony se dominantně rozpadají na dva fotony gama, s malou pravděpodobností na různé kombinace dvojici elektronu a pozitronu a fotonů gama. Nabité pí mezony se rozpadají na miony a neutrina. Miony se pak následně rozpadají na elektrony (pozitrony) a neutrina. Elektrony a pozitrony pak anihilují popsáním způsobem. Na konci anihilace hmoty tak je pole fotonů a neutrin, které mají pouze zanedbatelnou klidovou energii. Anihilace tak vede k celkové přeměně klidové energie na kinetickou. Ovšem neutrina, která interagují pouze slabou interakcí, odnesou část energie bez interakce, a ta se tak nedá využít.

V rozpadech jader, které se využívají v radionuklidových generátorech, se v případě rozpadu alfa transuranů uvolňuje okolo 0,0025 % energie skryté v klidové energii původního jádra. Při štěpení je to okolo 0,09 %

a při fúzi až okolo 0,4 %. V případě využití antihmoty pak až 100 %. Je vidět, že tak jde o extrémně koncentrovaný a efektivní zdroj energie, a i to je důvod, proč se tak často objevuje jako zdroj energie pro pohon mezihvězdných lodí v různých sci-fi dílech.

Jak získat antičástice

Hlavním problémem pro využití antihmoty je, že v našem vesmíru nejsou nikde zásoby paliva pro takový zdroj energie. To je rozdíl od radionuklidových zdrojů a štěpných i fúzních reaktorů, kde můžeme palivo nalézt v přírodě, případně je z přírodních materiálů poměrně energeticky nepříliš náročným způsobem připravit.

Kvantová fyzika umožňuje přeměnu kinetické energie na klidovou energii nových částic, tedy přeměnu energie na hmotu, která je popsána známým Einsteinovým vztahem $E = mc^2$. Pro přípravu antičástic při ní musí-

↑
Obr. 1 Hvězdná loď USS Enterprise (NCC-1701-D) z filmové série Star Trek (zdroj: CBS Studios/ Paramount Pictures)



↑
Obr. 2 Terč pro produkci antiprotonů v laboratoři CERN. Dopadají na něj protony s energií 26 GeV z protonového synchrotronu PS (zdroj: Photographic Service CERN PhotoLab)

me odpovídající množství kinetické energie přeměnit na jejich klidovou energii. Využívají se k tomu srážky částic urychlených na relativistické energie, jejichž kinetická energie je násobkem jejich energie klidové. Aby byly splněny zákony zachování náboje a dalších vnitřních fyzikálních veličin, produkují se částice a antičástice ve dvojicích. Pokud tak například chceme získat antiproton, musíme mít dostatek kinetické energie pro vznik dvojice protonu a antiprotonu. Výjimku tvoří lehké pozitrony, které vznikají i při rozpadu beta plus vhodných radionuklidů.

V přírodě vznikají antičástice ve srážkách protonů či těžších jader kosmického záření s extrémními energiemi s atomovými jádry mezihvězdné hmoty. V laboratoři je můžeme připravit pomocí velkých urychlovačů, které umožňují urychlovat částice na relativistické energie. Pokud budeme získaný svazek relativistických protonů srážet s terčem v klidu, bude potřebná kinetická energie násobně větší než klidová energie produkovaného páru protonu a antiprotonu. Velká část kinetické energie, ta, která je spojená s pohybem těžiště, se totiž pro produkci nových částic využít nedá.

Takto se podařilo připravit a potvrdit existenci antičástic ke všem doposud objeveným

částicím. Zároveň je to metoda, jak masivně produkovat antiprotony a antineutrony pro další výzkum. Problémem je, že tyto antinukleony vznikají při relativistických energiích a letí v různém směru, což ztěžuje další manipulaci a jejich využití. Při jejich produkci ve srážkách urychlených jader s jádrem pevného terče se vlivem kinematiky preferuje let vzniklých antiprotonů i dalších jader ve směru původního letu svazku urychlených jader a jejich sběr je snadnější.

S využitím elektrických a magnetických polí lze vybrat ze vzniklých částic právě antiprotony a jejich svazek zformovat a fokusovat. V současné době se pro sběr vzniklých antiprotonů využívá systém magnetických čoček typu magnetický roh. Lze tak získat svazek antiprotonů, který se dá poslat do shromažďovacího prstence, urychlovače nebo zpomalovače, podle toho, k čemu chceme antiprotony následně využít. Svazek relativistických antiprotonů se například využíval pro získání vstřícných svazků protonů a antiprotonů na urychlovači SPS. Využívalo se toho, že v opačném směru letící identické částice s opačnými znaménky náboje mohou být urychlovány ve stejném magnetickém poli. Získaný proton-antiprotonový srážecí umožnil objevit intermediální bosony W^+ , W^- a Z^0 stojící za slabou interakcí. Antiprotonový zpomalovač pak lze využít pro přípravu pomalých antiprotonů potřebných pro efektivní produkci neutrálních antiatomů.

Než se podrobněji podíváme na vytváření antiatomů, popišme si, jak se dají produkovat antijádra těžší než lehký vodík. V takovém případě se využívá srážecí a vstřícné svazky urychlených těžkých jader s velmi vysokými ultrarelativistickými energiemi. Vznikají tak desítky až stovky tisíc nových částic a mezi nimi i velké množství antinukleonů – tedy antiprotonů a antineutronů. K tomu, aby se spojily do těžšího jádra, musí mít téměř totožnou polohu a jejich vzájemná rychlost musí být oproti rychlosti jejich letu při vzniku zanedbatelná. Nesmí být od sebe vzdáleny více, než je dosah silné interakce, tedy okolo jednoho femtometru, a jejich vzájemná relativní rych-

lost nesmí přesahovat hodnotu, kdy kinetická energie přesahuje tu vazebnou pro dané jádro. V tomto případě jde o jednotky megaelektronvoltů. Musí tak ležet ve fázovém prostoru (šestirozměrný prostor se třemi prostorovým souřadnicemi a třemi hybnostními) téměř v jednom místě.

Pravděpodobnost toho, že k tomu dojde, je velmi malá. A to i v případě, že srážíme dva svazky velmi těžkých jader, například olova. Pravděpodobnost vzniku antideuteronu je o více než tři řády nižší, než je pravděpodobnost vzniku antiprotonu či antineutronu. Každý další přidání antinukleonů pak znamená další snížení pravděpodobnosti slepení těžšího jádra o další více než tři řády. To je důvod, proč je zatím nejtěžším antijádrem, které se podařilo experimentálně vytvořit a pozorovat, antihélium 4. Podařilo se to při srážkách jader olova na největším urychlovači LHC v laboratoři CERN. Urychlovač pracoval řadu týdnů, přesto se podařilo identifikovat pouze desítky antihélií 4. Další krok k těžším jádrům by potřeboval zlepšit efektivitu produkce antinukleonů o více než šest řádů, protože všechna jádra s pěti nukleony mají dobu života příliš krátkou. Dalším možným antijádrem je

až antilithium 6. Zatím však není představa, jak by se dalo na našich zařízeních vyprodukovat.

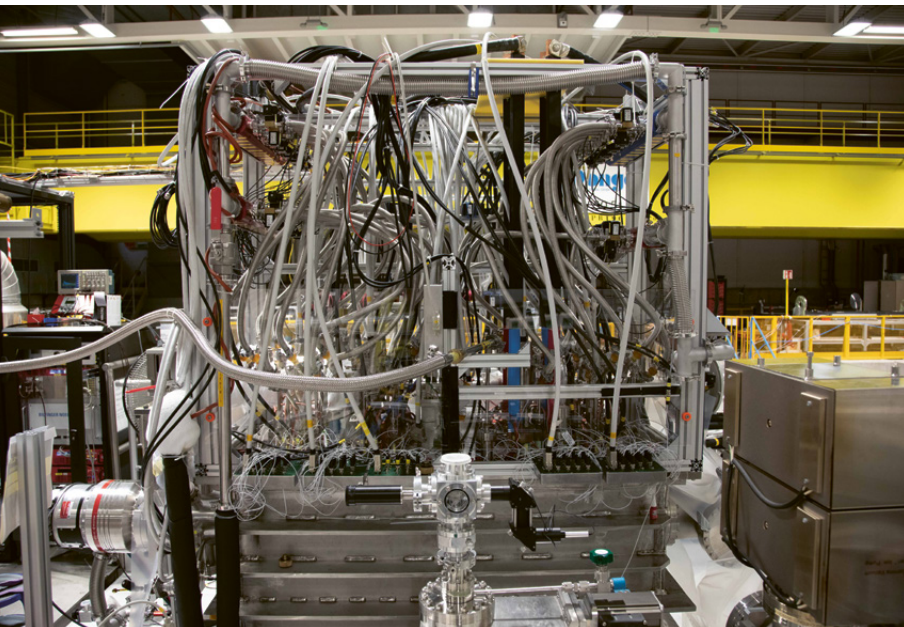
Jak získat antiatomy

Abychom získali antiatom, potřebujeme zajistit, aby byly antiproton a pozitron v jednom místě, vzdálenost musí být srovnatelná s rozměrem atomu, tedy zlomek nanometru. Jejich vzájemná rychlost nesmí vést ke kinetické energii přesahující vazebnou energii elektronu v atomu vodíku. První antivodíky se podařilo vyprodukovat experimentu PS210 v roce 1996 v laboratoři CERN.

V tomto případě se využilo jevu, při kterém si pozitron vyprodukuje sám antiproton. Tím je automaticky zajištěno, že jsou antiproton a pozitron v jednom místě. Využilo se toho, že nabitá částice při pohybu se zrychlením v elektrickém poli atomového jádra produkuje elektromagnetické záření. To se může realizovat jednak vyzářením fotonu s energií v oblasti záření gama, ale s jistou (i když velmi malou) pravděpodobností také vyzářením páru elektron a pozitron. S velmi malou pravděpodobností se pak může stát, že relativní rychlost pozitronu vůči antiprotonu bude ex-

↓
Obr. 3 Panoramatický snímek prostoru s experimenty studujícími antihmotu v laboratoři CERN (zdroj: Maximilien Brice, CERN)





Obr. 4 Experiment ALPHA při experimentování v roce 2021 (zdroj: CERN)

trémně malá a nepřekoná vazebnou energii pozitronu v antivodíku.

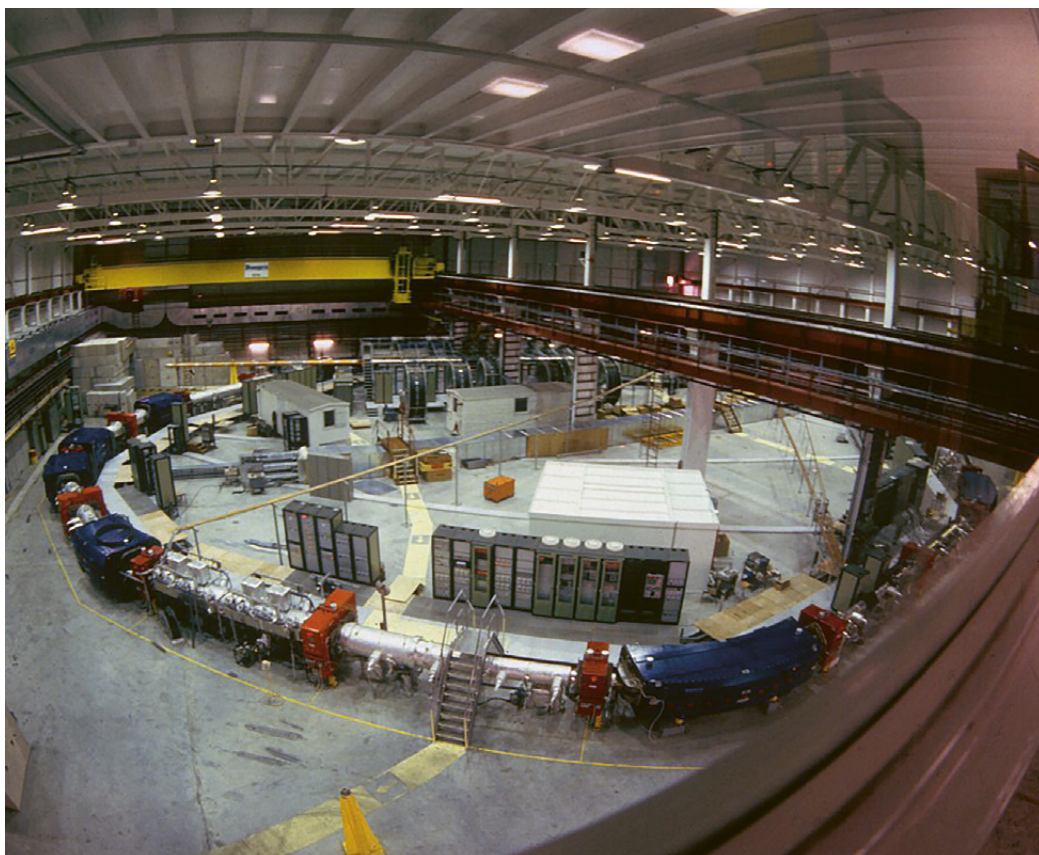
Antiprotony vyprodukované pomocí svazku protonů z urychlovače PS dopadajícího na pevný terč z těžkého kovu se přiváděly napřed do systému, který vytvářel fokusovaný svazek antiprotonů s danou energií. Ten pak dlouhodobě obíhal ve shromažďovacím prstenci, ve kterém po rovném úseku následovaly magnety, které jejich dráhu zahnulý. V jednom z rovných úseků se do cesty svazku antiprotonů foukal sodíkový obláček. Právě při průletu antiprotonu v elektrickém poli sodíkového jádra se mohl vyprodukovat i pár elektronu a pozitronu. S extrémně malou pravděpodobností se pak dokonce mohlo stát i to, že antiproton zachytil vzniklý pozitron a vznikl atom antivodíku.

Identifikace antivodíku byla založena na tom, že let neutrálního atomu už nebyl odkloněn magnetem a nepokračoval v obíhání ve shromažďovacím prstenci. Letěl rovně k připravené detekční sestavě, která dokázala identifikovat dvě kvanta gama z anihilace pozitronu a elektronu i antiproton, případně mezony pí vznikající při jeho anihilaci. Za několik měsíců experimentu se podařilo identifikovat vznik devíti antivodíků. Opakování experimentu v americké laboratoři Fermilab s vyšší efektivitou umožnilo vyprodukovat až stovku antivodíků.

Jednotky i stovky antivodíků za řadu týdnů, které mají navíc vysokou rychlost pohybu, jsou nedostatečné a neumožňují zkoumat vlastnosti antivodíku a srovnávat antivodík s vodíkem. Akumulace většího počtu antivodíků a hlavně možnost jeho zachycení v magnetické pasti a zkoumání například pomocí laserů potřebuje úplně jinou metodiku. Kvůli tomu se v laboratoři CERN vybudoval zpomalovač antiprotonů AD (Antiproton Decelerator), který vyprodukovaný svazek antiprotonů dokáže zpomalit. Pomalé antiprotony se pak vstříknou do magnetických pastí jednotlivých experimentů. V tomto případě jde o tzv. Penningovy pasti, které využívají kombinaci magnetických a elektrických polí.

V těchto magnetických pastích se k antiprotonům přidávají zpomalené pozitrony vznikající v rozpadu beta sodíku 22. Ve vzniklém plazmatu pak antiprotony zachycují pozitrony, stávají se neutrálními, unikají z magnetického pole a při setkání s hmotou anihilují. Informaci o jejich existenci nesou vznikající fotony z anihilace pozitronu a elektronu a mezony pí vznikající při anihilaci antiprotonu. Už v prvním běhu experimentu ATHENA v roce 2002 se podařilo vyprodukovat okolo 50 000 antivodíků. Postupně se dařilo metodiku a experimentální zařízení vylepšovat. V roce 2006 na experiment ATHENA navázal experiment ALPHA a dařilo se produkovat milióny antivodíkových atomů.

Pro možnost zkoumání však bylo nutné také neutrální atomy antivodíku zachytit a udržet v nějaké magnetické pasti. U nabíjených částic, antiprotonů a pozitronů, můžeme využít náboj k zachycení magnetickým polem. Atom antivodíku je neutrální, ale má magnetický dipólový moment, který jej umožňuje zachytit v magnetickém poli. Antivodík tak musí být při svém vzniku v této další magnetické pasti, tentokrát jde o past s konfigurací Ioffeho-Pritcharda. Pole však musí mít daleko vyšší intenzitu, magnetická indukce je okolo 1 T, a specifický tvar. Intenzita roste ve všech směrech a do vytvořeného „dolíku“ spadnou vzniklé „magnetky“ antivodíku. Ty však musí mít, aby z pasti neunikly, velmi malou rych-



←
Obr. 5 Antiprotonový zpomalovač AD v laboratoři CERN (zdroj CERN)

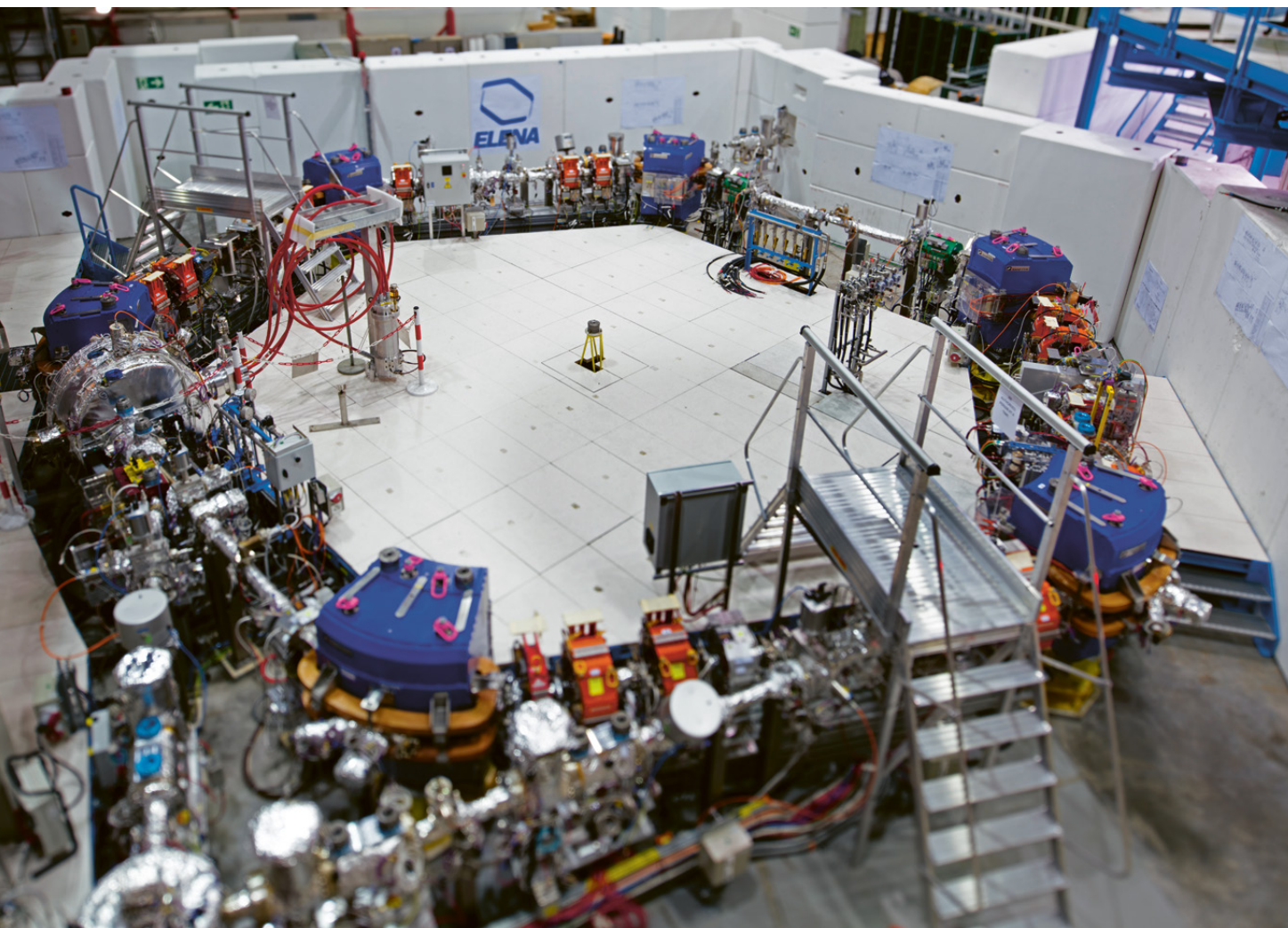
lost. Antivodík je tak potřeba ochladit na teploty pod jednotky Kelvinů.

První neutrální atomy se v nové magnetické pasti podařilo dlouhodoběji udržet v roce 2010, bylo to 38 atomů antivodíku, které byly udrženy až 170 ms. Parametry transportu antivodíku do pasti pro ně i její parametry se postupně zlepšovaly a již v roce 2011 se podařilo zachytit v pasti 309 antivodíků a 19 z nich se podařilo udržet až 1 000 s. V roce 2012 se podařilo změřit první přechod. Jde o známou čáru s vlnovou délkou 21 cm hyperjemného přechodu 1S, který nastává mezi paralelními a antiparalelními orientacemi spinu antiprotonu a pozitronu. V roce 2017 se pak podařilo změřit první optický přechod. Doposud byly měřeny přechody 1S–2S a 1S–2P (Lyman alfa). V experimentu ALPHA se dařilo získávat 20 antivodíků každé čtyři minuty a akumulovat až sto antivodíků.

Kromě experimentu ALPHA využívaly antiprotonový zpomalovač i experimenty ASACUSA a AEGLIS. Připomeňme, že intenzivní magnetické pole snímá degeneraci hladin

v elektronovém obalu antivodíku. Energie čar v magnetickém poli se liší od těch bez něho. Hlavním úkolem experimentů je porovnat vlastnosti vodíku a antivodíku. V tom případě by bylo nejlépe, kdyby se měřily vodík a antivodík společně ve stejném magnetickém poli. A právě o to se pokoušel experiment ASACUSA. Experiment AEGLIS se zaměřuje na zkoumání pádu antivodíku v gravitačním poli Země. Měl by dosáhnout přesnosti určení tíhového zrychlení antihmoty až 1 %.

V posledních letech se ke zpomalovači AD přidal ještě další, který zpomaluje antiprotony ještě více. Zařízení ELENA (Extra Low ENergy Antiproton) s obvodem 30 m zpomalí antiprotony ještě více, z energie 5,3 MeV, kterou mají na konci zpomalovače AD, na 0,1 MeV. Zároveň se pomocí elektronového chlazení zvýší hustota svazku. Dramaticky se tím zvyšuje efektivita zachycování antiprotonů v magnetických pastech jednotlivých experimentů, a to o jeden až dva řády. Počet zachycených antiprotonů a tím i produkovaných antivodíků tak dramaticky roste. Například experiment



↑
Obr. 6 Zařízení ELENA, které zpomaluje antiprotony z antiprotonového zpomalovače AD na ještě nižší energie (zdroj: Maximilien Brice, CERN)

ASACUSA dokáže s využitím dodatečného zpomalení získat okolo desítky milionů antiprotonů z porce, kterou každých sto sekund dodává zpomalovač AD. Pokud se alespoň 15 % z nich, jako je tomu u experimentu ALPHA, podaří přeměnit na neutrální antivodíky, pak optimistické předpovědi pro jejich zachycení a udržení vedou k podílu pouze okolo 1 %. Z jednoho pulsu pak můžeme získat až stovku tisíc zachycených antivodíků pro zkoumání. Přesné hodnoty opravdu silně závisí na konstrukci konkrétních experimentů.

Zařízení ELENA využívá nyní pět experimentů zaměřených na studium antihmoty. Již zmíněné tři – ALPHA, ASACUSA a AEGIS a dva další – BASE a GBAR. Ty by měly s vysokou efektivitou zkoumat základní fyzikální symetrie. Porovnávají vlastnosti hmoty a antihmoty, částic a antičástic, zda se neliší velikost jejich

hmotnosti, náboje, magnetického dipólového momentu či velikosti tíhového zrychlení, které na ně působí. Jejich přispěním bychom mohli v budoucnu zodpovědět jednu z klíčových kosmologických otázek. Tou je průběh největší anihilace, která se uskutečnila na počátku našeho vesmíru a stojí za vznikem reliktního záření. Právě rozdíl ve vlastnostech hmoty a antihmoty způsobil, že ve velmi raném vývoji vesmíru vznikl jistý, byť extrémně malý, přebytek hmoty. Ten pak zůstal po zmíněné kolosální anihilaci a jen díky němu existují galaxie, hvězdy, planety i my.

Práce zpomalovače ELENA i zmíněných experimentů nám zároveň umožňuje vylepšovat naše metodiky produkce antiprotonů i neutrální antihmoty a jejich zachycování do magnetických pastí, což je klíčové i pro její využití ve hvězdných korábech. A magnetick-

ké pasti budou nejspíše klíčové i pro vyřešení dalšího problému využívání antihmoty jako zdroje energie.

Jak antihmotu skladovat

Tímto velkým problémem je skladování antihmoty. Zde je nutné ji totálně oddělit od hmoty, aby se zabránilo anihilaci. Pokud potřebujeme akumulovat a skladovat větší objemy antihmoty, musí být efektivita udržení antičástic extrémně vysoká. Při obrovské energetické hustotě uvolňované během anihilace stačí opravdu i velmi malý podíl uniklých antiprotonů pro katastrofickou destrukci skladovacího zařízení.

Snadnější je magnetické udržení nabitých částic – plazmatu. Zde máme velké praktické zkušenosti s uchováním nabitých svazků pomocí shromažďovacích prstenců i využití široké škály magnetických pastí. Problémem je ovšem extrémně nízká hustota plazmatu. Pokud jde o nabitě plazma, jako je tomu v případě zmíněných shromažďovacích prstenců, musíme se vypořádat s odpuzováním částic se stejným znaménkem náboje. V tomto případě přináší výhodu neutrální plazma, ovšem i zde je třeba řešit celou řadu problémů, které jsou v případě antihmoty a nutnosti zamezit jakémukoliv jejímu kontaktu s hmotou ještě ostřejší. Zároveň je třeba mít ve všech částech, kde se pracuje s antičásticemi, velmi vysoké vakuum. Nesmí tam být částice hmoty.

Pro představu, o jaké hustoty částic se v případě současných pastí jedná, lze uvést několik čísel. Hustota plazmatu v současných magnetických Penningových pastech v laboratoři CERN jsou okolo 10^{15} částic na kubický metr. Jsou schopny udržovat antiprotony hodiny. Nejsou pochopitelně optimalizované na co nejvyšší možné hustoty a velmi dlouhé doby udržení, takže je poměrně velký potenciál pro zlepšení. Pokud se podíváme na hustoty plazmatu v současných tokamacích a dalších magnetických pastech využívaných při studiu fúze, jde o hodnoty okolo 10^{20} částic na kubický metr. I zde je potenciál pro zlepšování. Výhodou při skladování neutrálního plazmatu složeného z antiprotonů a pozitro-

nů je, že by šlo o studené plazma. Nevýhodou je, že by se musely dramaticky snížit možnosti úniku částic z pasti. Vyšší hustoty lze v principu docílit u neutrálního antivodíku. Pasti, které se využívají při studiu Bose-Einsteinova kondenzátu složeného z vodíku, dosahují hustot 10^{21} atomů na kubický metr. Ovšem při nich se zkoumá jen extrémně malé množství (zhruba miliarda atomů) a teplota vodíku je okolo $50 \mu\text{K}$. Už jsme zmínili, že i s využitím zařízení ELENA se v optimálním případě daří získávat pouze okolo sto tisíc neutrálních antivodíků se stosekundovou periodou. Připomeňme, že jeden miligram obsahuje zhruba 10^{21} atomů. Na druhé straně ovšem jeden miligram antihmoty produkuje stejně energie jako při explozi 50 tun TNT.

I z toho je vidět, jak obrovskou výzvu je uchovávání makroskopických množství antihmoty. A zatímco nyní řešíme její uchovávání v řádu minut, hodin a dnů, při jejím kosmickém využití ji bude potřeba spolehlivě skladovat roky, desetiletí i staletí. Na závěr této části jen připomenutí fatálního problému v souvislosti s úvahami, že by se antihmota skladovala v kapalném či pevném skupenství v nějakých nádržích také z antihmoty. Zatím nedokážeme připravit jiný prvek, než je antivodík. A nemáme zatím ani přibližnou představu, jak takové nádrže, třeba z antioceli, oddělovat dostatečně efektivně od hmoty, aby nedošlo k anihilaci.

Mezihvězdné lety s pomocí antihmoty

Z popsaného je vidět, že výzvy spojené s využitím antihmoty pro mezihvězdné lety jsou kolosální a problémy s využitím fúze popsané v předchozích částech cyklu se na jejich pozadí mohou jevit skoro jako triviální.

Základním problémem je, že se antihmota v našem vesmíru v nezanedbatelných množstvích nikde nevyskytuje, nejsou žádné doly na antihmotu. Palivo pro antihmotové zdroje energie je třeba vyrobit, a to je vždy spojeno se ztrátami. To je důvod, proč nelze počítat s antihmotou jako zdrojem energie pro naši civilizaci. V případě antihmoty je navíc efektivita její produkce extrémně malá.



↑
Obr. 7 Letecký pohled na urychlovač částic Tevatron, který je součástí Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) umístěné poblíž Chicaga (zdroj: Reidar Hahn, Fermilab)

I to je důvodem, proč v současné době existují pouze dvě centra, kde se masivněji produkuje antiprotony. Jde o zmiňovaná výzkumná centra CERN a Fermilab. Produkce antiprotonů v tomto případě slouží dominantně pro účely studia struktury hmoty a vlastností antihmoty. Urychlovače, které se využívají, se zaměřují na jiné oblasti. Efektivita a náklady produkce antiprotonů tak nejsou hlavní prioritou a zařízení tak na ní nejsou optimalizována. Zároveň jsou realizace experimentů s antiprotony časově omezené a nepravidelně rozložené v čase. Průměrně se v posledních letech produkuje až jednotky nanogramů antihmoty ročně. Dosažitelné jsou i desítky nanogramů. Připomeňme, že se produkované antiprotony hned využívají a neshromažďují se. V současné době tak nejsou nikde uskladněna žádná makroskopická množství antihmoty.

Celková účinnost získávání antiprotonů je dána jednak účinností samotné produkce (podíl počtu vzniklých antiprotonů a protonů svazku), závisí však také na efektivitě

sběru a vyvedení vzniklých antiprotonů. Podívejme se na situaci ve Fermilabu, kde se pro produkci antiprotonů využívá svazek protonů s energií 120 GeV. Daří se získávat jeden antiproton na 10^5 protonů dopadajících na terč. Při anihilaci antiprotonu se uvolní energie dvojnásobku jeho klidové energie, tedy zhruba 1,9 GeV. Energetická účinnost je tak v řádu 10^{-7} . Zároveň je však nutné vzít v úvahu efektivitu konverze energie potřebné na provoz urychlovače v energii urychlených částic. I v tomto případě jsou ztráty značné. Je tak vidět, že energetická náročnost produkce antihmoty je opravdu extrémně vysoká.

Její řádové vylepšení je možné i se současnými technologiemi. Zařízením dedikovaným pro efektivní produkci antiprotonů s optimální energií urychlovače okolo 200 GeV a vyladěnou fokusací svazku, konstrukcí terče i sběrem antiprotonů by se dalo podle odhadů dosáhnout zlepšení účinnosti o tři až čtyři řády. Možná roční produkce antiprotonů by tak mohla dosahovat až stovek mikrogramů.

To ovšem na mezihvězdné lety nestačí. Pokud by měl let k nejbližším hvězdám trvat do sta let, je potřeba, aby byla rychlost kosmické lodi větší než pět procent rychlosti světla. Pokud chceme loď o hmotnosti 100 tun, která má být urychlena na 5 % rychlosti světla, musíme mít čistě z energetického hlediska cca 60 kg antihmoty, která anihiluje se stejným množstvím hmoty.

Musíme si však uvědomit, že úkolem raketového motoru je pomocí zákona akce a reakce změnit hybnost (rychlost) lodí a musí být také splněn zákon zachování hybnosti. Raketovým motorem musí být vyvrženo dostatek hmotnosti s odpovídající výtokovou rychlostí. Výhodou využití anihilace je, že její produkty mají rychlost blízkou rychlosti světla. Což ovšem neznamená, že i výtokové rychlosti budou tak vysoké. Produkty anihilace se pohybují do všech směrů. Možnost formování směru jejich letu závisí na tom, jestli jde o nabitě částice. Ty jde směřovat pomocí magnetického pole.

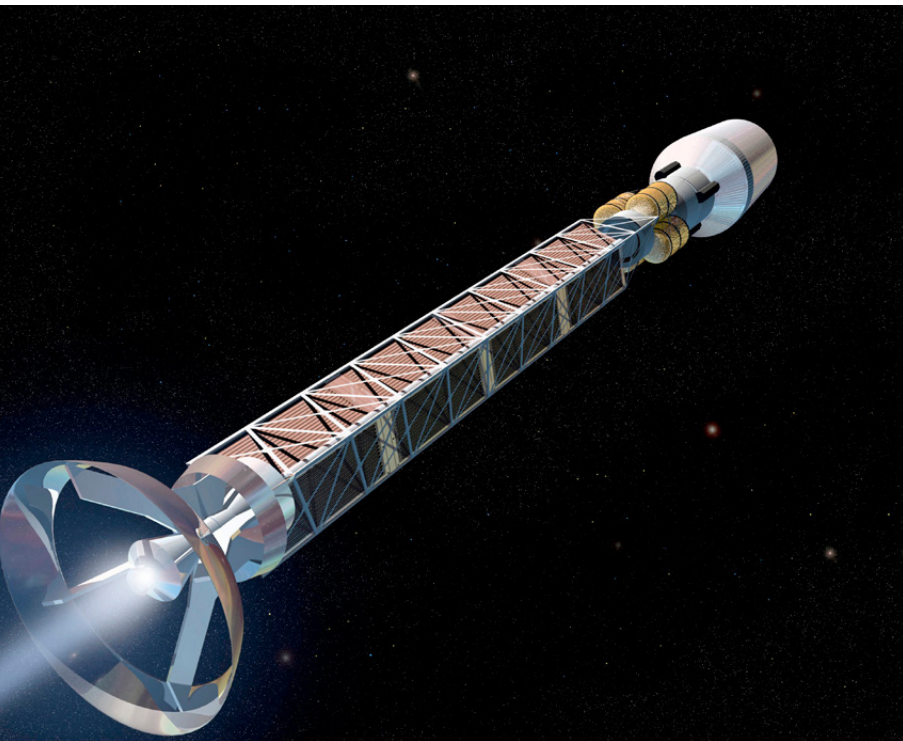
Při klasickém využití anihilačního motoru tak je potřeba vyvrhnout 5 tun hmoty, ovšem s výtokovou rychlostí blízkou rychlosti světla. Reálně však bude vyšší v závislosti na reálné výtokové rychlosti a také kvůli tomu, že hmotnost paliva už začíná být srovnatelná s hmotností lodí a palivo se bude spotřebovávat postupně a částečně je třeba je urychlit i s lodí. V každém případě pro mezihvězdné lety potřebujeme už desítky kilogramů až tuny antihmoty.

Prvním úkolem při cestě k masivní produkci antihmoty pro potřeby vesmírných letů je tak co největší zlepšení energetické účinnosti produkce antihmoty a zajištění dostatku energie pro její produkci. Pro výrobu jedné tuny antihmoty by bylo při nulových ztrátách energie potřeba zhruba 180 000 PJ. Pro produkci této energie během jednoho roku by bylo potřeba elektrárny o výkonu zhruba 70 000 GW, tedy takový počet reaktorů z Temelína. A to nezapočítávám ty popsané další řády, které padnou na velmi nízkou efektivitu konverze energie při produkci antihmoty.

Prvním úkolem je zvýšit účinnost produkce antiprotonů. Kromě zmíněné optimaliza-

ce protonového urychlovače a zlepšení sběru vzniklých protonů je možnou cestou využití reakcí nabitých pí mezonů, které vznikají při srážkách protonu s jádrem ve značném množství, s dalším terčem pro produkci dodatečného množství antiprotonů. Daleko více antinukleonů, tedy i antiprotonů, dostaneme, pokud svazek protonů zaměníme za svazek těžkých jader. Problém je, že urychlovač těžkých iontů je mnohem náročnější. Pokud se podaří pokrok na cestě k co nejkompaktnějším a jednoduchým urychlovačům iontů, mohla by to být cesta ke zvýšení účinnosti produkce antiprotonů. Zlepšení by přineslo i využití srážek vstřícných svazků, kdy se neztrácí energie na pohyb těžiště a je možné ji všechnu využít k produkci částic. Zde však je problém se sběrem antiprotonů, jejich výlet totiž není směřován do jednoho směru, ale vyletují do všech směrů. V principu by se mohly využít i srážky svazků elektronů a pozitronů. Při vhodné energii, například v rezonanci J/ψ , je produkce částic, výsledkem jejichž rozpadu je i antiproton, dost pravděpodobná.

Pro některá využití antihmoty na vesmírných aparátech stačí okolo desítek a stovek mikrogramů, což už jsou množství dosažitelná v principu s využitím vylepšení současných metodik produkce antiprotonů. Zatím jsme se zaměřovali na situaci, kdy je médium vytékající tryskou raketového motoru tvořeno produkty anihilace. Anihilaci však lze využívat pro ohřev jiného typu média, které se používá v raketovém motoru. Je několik možností pro takový typ pohonu. Jednou je ohřev prostředí v pevném skupenství, od kterého se následně ohřívá vodík, který pak zajišťuje pohon. Jde o obdobu jaderných štěpných motorů, které se vyvíjely v projektu NERVA. V tomto případě jsou však teploty a tím i výtokové rychlosti plynného vodíku značně omezené dosažitelnými teplotami. Daleko vyšší hodnoty teplot a tím i výtokových rychlostí se dosahuje, pokud anihilace probíhá v médiu ve skupenství plynném, a ještě vyšší v případě plazmatu. Ještě jednou možností je využití anihilačního zdroje pro pro-



↑
Obr. 8 Umělecká představa hvězdoletu s antihmotovým pohonem v představách NASA (zdroj NASA)

dukci elektřiny, která pohání iontový motor. Pokud jde navíc o lety v rámci Sluneční soustavy a omezené rychlosti, kterých musí vesmírná loď dosáhnout, dostávají se hmotnosti potřebné antihmoty pod gram až k miligramu. Vše závisí na velikosti lodě a potřebné změně její rychlosti.

Ještě menší hmotnosti v oblasti jednotek až stovek mikrogramů jsou potřeba v případě využití hybridního pohonu. V tomto případě se anihilace využívá k ohřevu plazmatu, aby se dosáhlo podmínek pro realizace termojaderné fúze. Větší část energie pak dodává samotná fúze. V tomto případě je možné potřebné množství antihmoty v principu získat už vyladěním současných metod jejího získávání.

I po vyřešení problémů s produkcí a skladování antihmoty, je třeba překonat řadu výzev při konstrukci samotných zdrojů energie a motorů kosmických lodí. Extrémní nároky budou kladeny na používané materiály a jejich odolnost proti tepelnému i radiačnímu namáhání. Netriviální je i formování toku nabíjených relativistických částic, které při anihilaci vznikají, a také optimální využití jejich hybnosti.

Závěr

Jak se psalo v předchozích částech, první lety k nejbližším hvězdám by v principu mohly zajistit termojaderné reaktory. Ovšem pro nějakou masivnější mezihvězdnou expanzi budeme nejspíše potřebovat vyřešit výzvy spojené s ovládnutím využití antihmoty a anihilace. Na druhé straně je však produkce antihmoty extrémně energeticky náročná. A není představitelné ji vyrobit v dostatečném množství bez toho, že bude mít naše civilizace velmi efektivní a výkonnou energetiku. A to není možné bez vyřešení masivního zapojení jaderných štěpných a fúzních reaktorů. Musíme tak nejdříve vyřešit využívání termojaderné fúze.

Celá řada problémů, které musíme řešit, je společná pro štěpné, fúzní i antihmotové zdroje. Jde hlavně o oblast odolných materiálů, magnetické udržení plazmatu i konstrukce velmi kompaktních urychlovačů a laserů. Zatímco v případě jaderné fúze jsou vesmírné aplikace ve výhledu, využití antihmoty s největší pravděpodobností nebude před koncem století. Už nyní však můžeme otestovat zvyšování efektivity různých metod její produkce, a hlavně jejího dlouhodobého uchování.

Právě na tuto oblast je zaměřena i část budovaného zařízení FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research in Europe) v GSI Darmstadt (Německo), kde se budou vytvářet a ve shromažďovacím prstenci uchovávat antiprotony. Na produkci a anihilaci antiprotonů dominantně pro fundamentální výzkum je v této nové laboratoři zaměřen experiment PANDA. Půjde o nejmodernější zařízení svého druhu ve světě a znamená tak důležitý krok v oblasti efektivní produkce antihmoty a manipulace s ní.

Už nyní tak lze připravovat cestu k budoucím mezihvězdným cestám pomocí anihilace antihmoty, aby se vize zobrazovaná v dílech, jako je Star Trek, mohla uskutečnit. Zároveň je však nutné mít na paměti, že mezihvězdné lety, ať už s využitím fúze nebo antihmoty, jsou extrémní výzvou. To, jestli se je někdy lidstvu podaří realizovat, je úplně otevřená otázka.

Literatura:

- Eugene Mallove, Gregory Matloff: The Starflight Handbook, A Pioneer's Guide to Interstellar Travel, John Wiley & Sons, Inc, USA, 1989
- Philip Lubin: A Roadmap to Interstellar Flight, submitted to JBIS, April 2015
- G. R. Schmidt, H. P. Gerrisch, J. J. Martin et al: Antimatter Requirements for Near-term Propulsion Application, AIAA-99-2691
- M. D. Church, J. P. Marriner: The Antiproton Sources: Design and Operation, FERMILAB-FN-613, November 1993
- G. P. Jackson: An Intense Source of Antiprotons for Antimatter research at FNAL, Fermilab-pub-05-428
- S. Nagaitsev: Fermilab Antiproton Source, Recycler Ring, and Main Injector, Arxiv, ws-bk9x6, 2014
- S. Maury: The Antiproton Decelerator (AD), CERN/PS 99-50 (HP)
- Claudia Torregrossa Martin: Comprehensive Study for an Optimized Redesign of the CERN's Antiproton Decelerator Target, CERN-THESIS-2017-357
- D. Gamba, M. E. Angoletta, P. Belochitskii et al: ELENA Commissioning, North American Particle Acc. Conf. NAPAC2019, ISBN: 978-3-95458-223-3
- C. Schwarz: The PANDA Experiment at FAIR, Journal of Physics: Conference Series 374 (2012) 012003
- The ALPHA Collaboration: Investigation of the Fine Structure of Antihydrogen, Nature 578 (2020)376–380
- The ALICE collaboration: Production of ^4He and anti- ^4He in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ at the LHC, Nuclear Physics A 971(2018)1–20



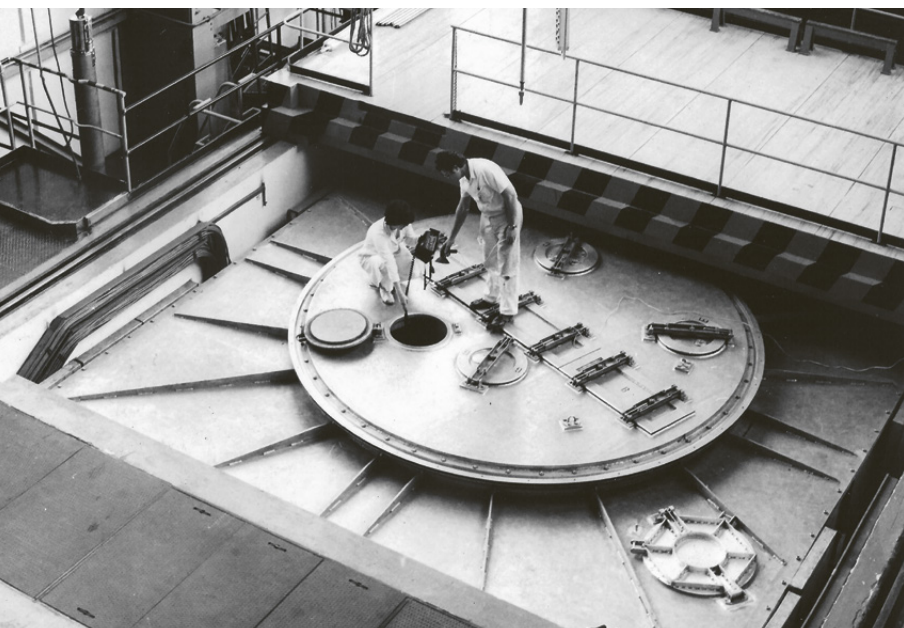
RNDr. Vladimír Wagner, CSc.

wagner@ujf.cas.cz

vystudoval jadernou fyziku na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Během doktorandského studia se věnoval experimentálnímu studiu struktury deformovaných jader. Pracuje v Ústavu jaderné fyziky AV ČR v Řeži a učí na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze. Mezi hlavní oblasti jeho vědeckého zájmu patří studium velmi horké a husté jaderné hmoty pomocí srážek těžkých iontů. Je zapojen do výzkumu mezinárodních skupin provádějících experimenty v GSI Darmstadt (Německo) a v laboratoři CERN (Švýcarsko). Vede skupinu, která studuje možnosti transmutace jaderného odpadu pomocí urychlovačem řízených transmutorů a získává potřebná jaderná data pro pokročilé štěpné i fúzní systémy. Využívá k tomu zdroje neutronů v mateřském ústavu. Zajímá se také o energetiku a byl členem druhé nezávislé energetické komise NEK II, která vypracovala doporučení pro aktualizaci Státní energetické koncepce České republiky, podílel se na publikaci Perspektivy české energetiky. Současnost a budoucnost (Novela bohemia 2014) a napsal knihu Fukušima I poté (Novela bohemia 2014). Zabývá se také popularizací vědy a hlavně fyziky. Pravidelně přednáší pro středoškolskou mládež a veřejnost. Píše články pro internetové i klasické časopisy, které se popularizaci vědy věnují.

Aktuality

Výzkumný reaktor LR-0 oslavil čtyřicátiny



Zdroj: Archiv ÚJV Řež, a. s.

Před 40 lety, 23. června 1983, uvedli v Řeži u Prahy do trvalého provozu výzkumný reaktor LR-0, který byl počátkem osmdesátých let přestavěn z původního těžkovodního reaktoru nulového výkonu TR-0.

Reaktor LR-0 je lehkovodní reaktor bazénového typu a „nulového výkonu“ (max. tepelný výkon je 1 kW), který je svojí konstrukcí určený především pro výzkum reaktorově fyzikálních vlastností reaktorů typu VVER a PWR. Palivové proutky reaktoru jsou ze zirkoniové slitiny a obsahují tablety z oxidu uranu s různým obohacením (max. 4,4 % ^{235}U), moderátorem je obyčejná demineralizovaná voda s volitelným obsahem kyseliny borité. Reaktor je řízen buďto absorpčními klastry zasouvány do paliva, nebo poměrně unikátně změnou výšky vodní

hladiny. Experimentální vybavení reaktoru LR-0 zahrnuje spektrometrické a počítačové aparatury neutronů a gama záření, maketu periferních konstrukcí reaktoru VVER-1000, precizní monitory výkonu a vodní hladiny, radioizotopové zdroje a součásti infrastruktury jsou také potrubní pošta, mechanické dílny a chemické laboratoře.

Mezi projekty realizované na tomto reaktoru patří např. měření fluencí na tlakovou nádobu VVER-1000, měření podkritičnosti skladovacích kontejnerů CASTOR a celá řada benchmarkových měření – ověřování přesnosti výpočetních prostředků vůči experimentálním datům.

Na reaktoru LR-0 probíhají ročně desítky exkurzí, studenti jaderných oborů VŠ se zde mohou školit v experimentální reaktorové fyzice a mohou také využít část kapacity reaktoru pro vlastní reaktorové projekty.

Reaktor LR-0 provozuje od roku 2002 společnost Centrum výzkumu Řež, dceřiná společnost ÚJV Řež a člen Skupiny ÚJV.

redakce

Na FJFI v Troji spustili v pořadí již desátý jaderný reaktor v ČR

Spouštění nejmladšího českého jaderného reaktoru VR-2 bylo zahájeno 6. června v prostorách Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské Českého vysokého učení technického v Praze. Ten bude – podobně jako jeho o více než 30 let starší „kolega“ výukový reaktor VR-1 – sloužit především pro potřeby vzdělávání jaderných odborníků.

O stavbě nového školního reaktoru se na pražské Jaderce uvažovalo už na konci první dekády. Konkrétních kontur začal projekt nabývat v roce 2014, kdy FJFI dostalo od kolegů z finské Aalto University, kteří vyřazovali svůj vlastní výzkumný reaktor z provozu, nabídku na dodávku paliva – necelé dvě stovky proutků s obohaceným palivem a zhruba tisícovku s přírodním uranem. Čeští vědci tedy věděli dopředu, jaké palivo budou mít k dispozici. Věděli také, že k „pohonu“ reaktoru chtějí využít stávající neutronový generátor. Zároveň se reaktor musel vejít do laboratoří fakulty, ve kterých i díky většímu VR-1 už není mnoho místa. Design je navržen tak, aby bylo možné rychle měnit celou řadu parametrů. Lze tedy například rychle měnit rozmístění paliva (proutků s palivem), což ovlivňuje chod reaktoru. Může se různě kombinovat palivo obohacené a přírodní či rychle a přesně regulovat výška hladiny vody v reaktoru nebo její ohřev či zchlazení.

Až začátkem příštího roku vstoupí reaktor do běžného provozu, studenti si ho budou moci „osahat“ za různých podmínek a přímo vidět, jak změna podmínek ovlivňuje průběh štěpení. Reaktor bude k dispozici také studentům dalších



univerzit, zahraničním studentům a samozřejmě také lidem z praxe, kteří sem chodí na různá školení, takže reaktor do budoucna bude pro školu představovat i zdroj příjmů. „V Evropě se podobné malé reaktory spíše zavírají, než otevírají,“ říká Jan Rataj z Katedry jaderných reaktorů, která má provoz VR-2 na starosti. O jádru se přitom čím dál více mluví jako významné složce budoucího energetického mixu. Vzhledem ke stárnutí evropské flotily by k něčemu takovému zjevně bylo zapotřebí nové generace techniků na stavbu i obsluhu plánovaných zařízení. Podle Jana Rataje je to vidět i na rostoucím počtu zájemců o studium oboru. „A počty budou ještě stoupat,“ odhaduje, „pokud se rozběhne plánovaná dostavba jaderné elektrárny Dukovany.“

Zdroj: Nejnovější český jaderný reaktor lze vypnout stisknutím tlačítka – Zpravodajský servis – České vysoké učení technické v Praze (cvut.cz)

Vzpomínka na Ing. Iva Peku, CSc.



Dne 19. března 2023 zemřel ve věku 92 let Ing. Ivo Peka, CSc. vážený a uznávaný odborník, který se mimořádným způsobem zasloužil o výzkum a vývoj v oblasti jaderných i nejaderných technologií v Československu. Ivo Peka vystudoval chemickou technologii na Vojenské technické akademii Antonína Zápotockého v Brně. Ihned po jejím absolvování v roce 1956 nastoupil do čerstvě založeného Ústavu jaderné fyziky. Vědeckou hodnost kandidáta chemických věd získal v roce 1965 na Institutu obecné a anorganické chemie N. S. Kurnakova v Moskvě za kandidátskou práci týkající se chemie a separace fluoridů plutonia.

V Ústavu jaderné fyziky a následně v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži se věnoval především chemii a chemické technologii fluoridů uranu a štěpných produktů. V této oblasti byl naším předním odborníkem. V šedesátých letech se stal vedoucím skupiny fluorové chemie a měl hlavní zásluhu na vytvoření samostatného Oddělení fluorové chemie, které se od počátku 70. let zabývalo nejen studiem chemie fluoridů aktinoidů a štěpných produktů, ale i vývojem fluoridových metod přepracování vyhořelého paliva.

Od počátku 80. let na československé straně vědecky řídil spolupráci Ústavu jaderného výzkumu s Kurčatovským institutem v Moskvě a Výzkumným

ústavem atomových reaktorů v Dimitrovgradě na společném vývoji technologie fluoridového přepracování vyhořelého paliva rychlých množivých reaktorů. Tento výzkumný program vyvrcholil vybudováním poloprovozní technologické linky Fregat-2, která byla po odzkoušení v laboratořích Ústavu jaderného výzkumu v Řeži následně instalována v horké komoře Výzkumného ústavu jaderných reaktorů v Dimitrovgradě, aby se na ní technologie fluoridového přepracování experimentálně ověřila přepracováním vyhořelého paliva z rychlého reaktoru BOR-60. Ing. Peka odborně řídil práce československého týmu, který v Dimitrovgradě, společně se sovětskými odborníky, tyto experimenty realizoval. Vedle vývoje fluoridového přepracování se Ing. Peka věnoval též nejaderným technologiím založeným na fluoridových metodách. Jednalo se především o vývoj technologie výroby fluoridu grafitu a o technologie získávání drahých kovů (především platiny a palladia) z použitých katalyzátorů petrochemického průmyslu a z automobilových katalyzátorů.

Technologie, které se pod jeho vedením vyvinuly a odzkoušely v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži, byly koncem 80. let zavedeny v tehdejším výrobním podniku Safina Jesenice.

V devadesátých letech, před skončením své kariéry v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži, se Ing. Peka zabýval problematikou kapalného paliva a palivového cyklu transmutačních reaktorů založených na technologii Accelerator Driven Systems (ADS) a Molten Salt Reactors (MSR). Po odchodu do důchodu se ještě dále podílel na vývoji technologií separace vzácných kovů ve Výzkumném ústavu kovů v Panenských Břežanech.

Ing. Peka byl vynikajícím a mezinárodně uznávaným odborníkem v oblasti chemie a technologie fluoru a anorganických fluoridů, který zejména v sedmdesátých a osmdesátých letech mimořádně přispěl k vývoji pyrochemických separačních metod jaderné technologie v Československu a v tehdejším východním bloku.

Jan Uhlíř

Smutná zpráva pro jadernou energetiku

S hlubokou lítostí jsme přijali zprávu, že nás v úterý 25. července 2023 ve věku 87 let navždy opustil význačný jaderný fyzik, skvělý kolega a respektovaný mentor, RNDr. Milan Brumovský, CSc. Jeho odchod přináší obrovskou ztrátu nejen jeho rodině a blízkým, ale i jadernému výzkumu, jemuž zasvětil celý svůj bohatý profesní život.

Světově uznávaná osobnost současné jaderné energetiky, jeden ze zakladatelů moderních metod řízení životnosti tlakových nádob reaktorů, nositel celé řady mezinárodních ocenění a autor mnoha odborných publikací se do posledních týdnů aktivně účastnil projektů ÚJV Řež na české i zahraniční scéně a svoje rozsáhlé znalosti předával mladším kolegům.

Odešel uprostřed práce, ale vychoval si řadu kvalitních následovníků, kteří budou v jeho díle a odkazu pokračovat. Jako člověk je nenahraditelný, jeho kolegové, žáci a přátelé si ho budou vážit a pamatovat navždy.

S úctou a bolestí se loučíme s kolegou, který svými schopnostmi, úsilím a strhujícím entuziasmem navždy přispěl k lepšímu a bezpečnějšímu světu jaderné energetiky.

Ing. Daniel Jiříčka,
předseda představenstva
a generální ředitel ÚJV Řež, a. s.





www.jadernaenergie.online