

Navrhovaný postup uvádění do provozu nového jaderného zdroje

PAVEL ONDRŮJ



Úvod

Tento návrh postupu uvádění do provozu nového jaderného zdroje (NJZ) popisuje obecné principy tohoto procesu a skutečné finální provedení vybraným dodavatelem se může odlišovat. Vychází především z dokumentace Mezinárodní agentury pro atomovou energii MAAE [1], [7] a organizace World Association of Nuclear Operators WANO [2]. Rovněž se řídí požadavky Atomového zákona [4], navazujících vyhlášek a jsou zde použity zkušenosti a znalosti z nejlepší světové praxe v oboru.

Cílem souboru činností spojených s uvedením NJZ do provozu je prokázat, že veškeré zařízení NJZ splňuje konstrukční, ekonomické a bezpečnostní požadavky uvedené:

- v projektové dokumentaci;
- ve smlouvě;
- v povolovací dokumentaci a podmínkách povolení;
- v bezpečnostní zprávě a v licenčních podmínkách.

Hlavní podmínkou pro zahájení uvádění zařízení NJZ do provozu je řádné ukončení předchozí etapy jeho výstavby. Tato hranice je znázorněna na Obr. č. 1 a v praxi to znamená protokolární potvrzení předání dílčího zařízení útvarem výstavby dodavatele jeho útvaru spouštění.

NJZ přejde tímto do etapy Neaktivního Vyzkoušení (NV) a jako první se realizují funkční zkoušky komponent a systémů, jejichž cílem je postupný protokolární převod úspěšně odzkoušeného zařízení do přechodného provozu v kompetenci provozního útvaru dodavatele. Ve světové praxi se tento proces nazývá System Turnover for Testing and Operation (TOTO) [2]. Rovněž je možné se setkat s pojmem Take Over to Temporary Operation (TOTO). Podstatné je mít v tomto režimu převážnou většinu zařízení před zahájením funkčních zkoušek bloku ve studeném stavu (Cold functional tests – CFT), ale nejspozději do horkých funkčních zkoušek bloku (Hot functional tests – HFT).

V tomto období se rovněž provedou pevnostní tlakové zkoušky parogenerátorů (PG) a zkoušky integrity kontejmentu ZIK. Tímto NJZ směřuje k provedení celo-blokových zkoušek. Na obr. č. 1 – CFT/HFT. Hlavní činnosti těchto testů budou popsány dále.

Po jejich ukončení se provede údržba zařízení, implementace nutných modifikací zařízení a odstranění souvisejících vad a nedodělků, které by mohly bránit přechodu do etapy Aktivního Vyzkoušení. Musí být protokolárně doloženo úspěšné provedení všech testů z etapy NV NJZ.

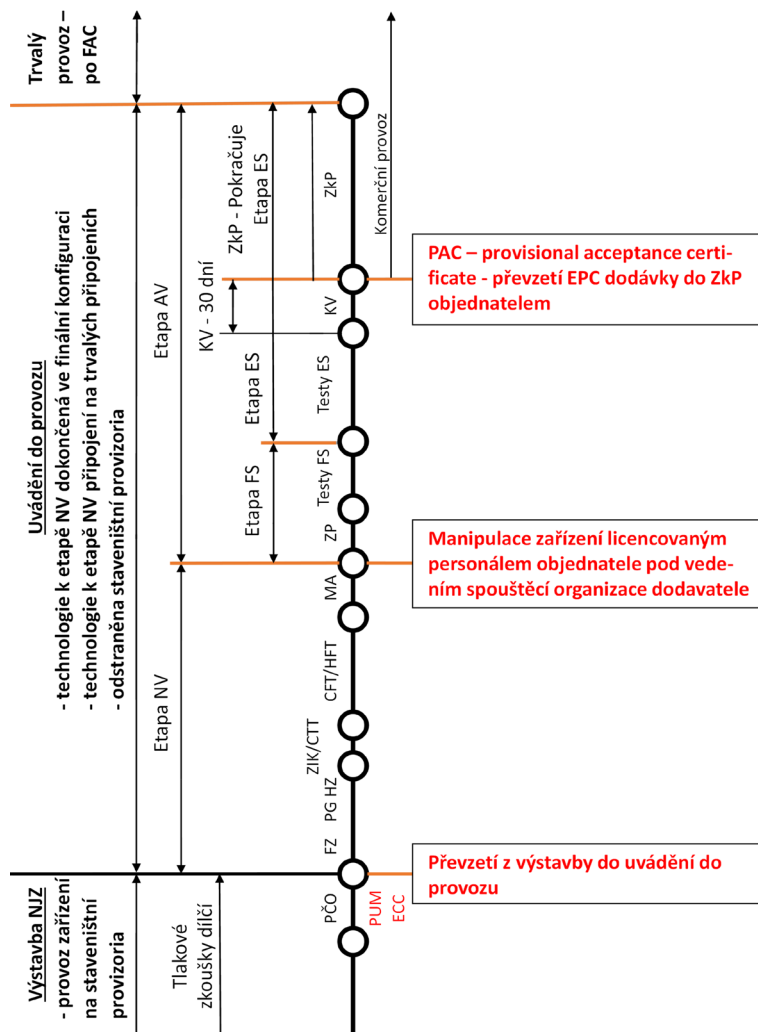
Pro zahájení etapy AV bude nutno disponovat povolením SÚJB. Toto platí i pro následný přechod z etapy fyzikálního spuštění (FS) do etapy energetického spuštění (ES).

Po dosažení 100 % výkonu bloku pak v rámci ES pokračuje zkušební provoz bloku (ZkP) po dobu jedné kampaně.

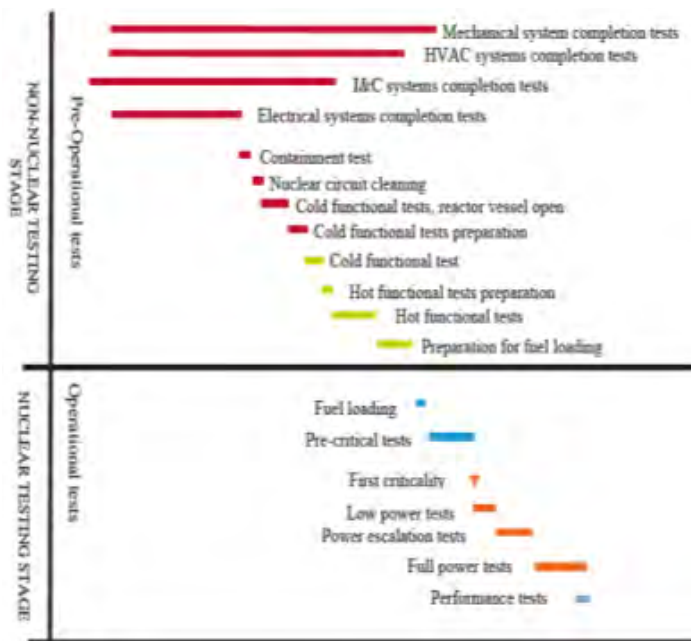
Z hlediska komerčního se po dosažení 100 % výkonu bloku rovněž provede Komplexní Vyzkoušení (KV). Ve světové praxi se pro tuto zkoušku používá pojem Demonstration run. V rámci KV se uskuteční i další zkoušky ověřující stabilitu provozu bloku a dosažení jmenovitého výkonu v souladu s projektem a se smlouvou. Tento akt je ukončen vydáním protokolu Provisional Acceptance Certificate (PAC), kdy investor přebírá plnou odpovědnost za provoz bloku.

NJZ se provozuje po dobu jedné kampaně, která je ukončena garanční odstávkou na první výměnu paliva a provedení nutných oprav a revizí zařízení NJZ. Po splnění všech nutných legislativních a smluvních požadavků je pak NJZ předán investorovi do trvalého provozu. Tento přechod je investorem potvrzen vydáním dokumentu Final Acceptance Certificate (FAC).

Obr. č. 1 – Hlavní průběh procesu uvádění do provozu



Obr. č. 2 – Příklad uvádění do provozu pro bloky PWR [2]



Legenda k obr. č. 1 a č. 2

- PČO – pomontážní čistící operace
- PUM/ECC – protokol ukončení montáže/ve světě Erection Completion Certificate
- NV – neaktivní vyzkoušení
- FZ – funkční zkoušky komponent a systémů
- PG HZ – hydraulická tlaková zkouška PG na sekundární straně
- ZIK/CTT – zkouška integrity kontejnmentu (pevnostní a těstnostní)
- CFT/HFT – studené/ horké funkční zkoušky, ve světě Cold Functional Test/Hot Functional Test
- MA – maintenance – údržba + implementace nutných modifikací
- AV – aktivní vyzkoušení
- ZP – zavezení paliva
- FS – fyzikální spouštění
- ES – energetické spouštění
- KV – komplexní vyzkoušení, ve světě pojem Demonstration Run
- ZkP – zkušební provoz
- AV – aktivní vyzkoušení
- FAC – final acceptance certificate – převzetí NJZ do trvalého provozu
- HVAC – vzduchotechnické systémy (Heating Ventilation and Air Conditioning)

Hlavní činnosti při uvádění NJZ do provozu

Pro zajištění budoucího ekonomického, bezpečného a spolehlivého provozu NJZ zahrnuje postup uvádění do provozu následující hlavní činnosti:

- Kontrola kompletnosti činností z „Výstavby NJZ“ pro oprávněný přechod do „Uvádění NJZ do provozu“.
- Ověření a doložení plnění předepsaných kritérií přijatelnosti v rámci testů a zkoušek jednotlivých systémů, subsystémů a dílčích zařízení s cílem prokázat, že splňují projektem definované funkční, technické, ekonomické a bezpečnostní kritéria, včetně požadovaných rezerv.
- Sběr základních dat a charakteristik systémů, subsystémů a zařízení v rámci provádění zkoušek a testů.
- Provedení všech činností předepsaných výrobcí vybraných a vyhrazených zařízení pro etapu jejich uvádění do provozu.
- Sběr dat a informací pro definici počátečního (referenčního) stavu SKK pro potřeby diagnostiky a programů řízení stárnutí.
- Validace provozních předpisů (včetně abnormálních i havarijních) a postupů pravidelných předepsaných zkoušek a údržby zařízení včetně ověření jejich rozsahu a přiměřenosti pro praktické použití.
- Validace datového modelu simulátoru.
- Ověření, že blok NJZ dosahuje parametrů garantovaných projektem.
- Seznámení budoucího provozovatele s provozem NJZ a se všemi souvisejícími aspekty.

Dodavatel bude zcela odpovědný za plánování, kontrolu, řízení a vyhodnocování všech testů v rámci uvádění zařízení NJZ do provozu. Všechny zkoušky se budou provádět v souladu s časovým harmonogramem uvádění zařízení do provozu, který bude pravidelně vyhodnocován a aktualizován. Výjimky a případné změny budou navrhovány zástupci dodavatele a schvalovány investorem. Odpovědní

pracovníci investora budou provádět nezávislé ověřování vybraných testů uvádění NJZ do provozu z pohledů plnění předepsaných kritérií jednotlivých zkoušek.

Fáze výstavby a uvádění do provozu se budou překrývat, protože stavební a montážní činnosti u některých systémů budou pokračovat souběžně s uvedením již dokončených systémů do provozu.

Od zahájení etapy AV začínají platit požadavky související s jadernou bezpečností (JB) a požadavky, které jsou definované v AtZ a v souvisejících vyhláškách [4], [6]. Personál investora, který aktivně provádí manipulace z blokové dozorní a kontroly související s manipulacemi s palivem musí být proškolen a licencován dle požadavků AtZ. Za dodržení pravidel JB je plně odpovědný investor a dodavatel musí dodržovat jím stanovená pravidla.

Výstavba NJZ a činnosti vedoucí k etapě uvádění do provozu

Na obr. č 1 je znázorněna tato etapa předcházející uvádění zařízení NJZ do provozu. Hlavním úkolem této etapy je realizovat stavební část a uskutečnit montáž systémů technologického, elektrického, I&C a souvisejícího podpůrného zařízení. V závěrečných fázích výstavby jsou realizovány kontroly, testy, po-montážní čisticí operace, tlakové zkoušky hydraulických systémů a inspekce. Tímto se potvrzuje úplnost provedené montáže, shoda s projektem a neexistence zjevných vad na zařízení a stavbě. Za provedení těchto testů a inspekcí je plně odpovědný tým výstavby dodavatele a již v této fázi je nezbytná aktivní účast pracovníků investora, kteří dozorují realizaci testů a provádí následnou kontrolu jejich výsledků, souvisejících protokolů a případně vzniklých vad a nedodělků (VaN).

Souhrn všech protokolů slouží jako podklad pro vytvoření finálního Protokolu Ukončení Montáže (PUM) dotčených systémů a jejich komponent. Ve světové praxi se tento protokol nazývá Erection

Completion Certificate (ECC) a proces Turnover from Erection to Commissioning.

Po úspěšném schválení tohoto protokolu zástupci dodavatele se systém předá z výstavby do etapy uvádění do provozu. Tímto přechází i odpovědnost za zařízení z útvaru výstavby dodavatele do jeho útvaru spouštění. Tento proces bude kontrolován a schvalován i investorem.

Etapy a fáze uvádění NJZ do provozu

Uvádění NJZ do provozu je rozděleno na dvě hlavní etapy (viz obr. č. 1):

- Etapa Neaktivního vyzkoušení;
- Etapa Aktivního vyzkoušení je zahájena s první manipulací s jaderným palivem s cílem jej zavést do reaktoru a končí zkušebním provozem bloku na 100 % výkonu.

Etapa Neaktivního vyzkoušení

Fáze 1

Fáze 1 navazuje na ukončení montáže systému a jeho komponent (po jeho předání do etapy uvádění do provozu) a je ukončena tím, že po provedení funkčních zkoušek systému je systém provozuschopný, což je základním předpokladem pro zahájení celkových funkčních zkoušek jaderného bloku a tedy přechod do Fáze 2.

Nejdříve se provádí funkční zkoušky komponent jednotlivých systémů a poté se zahajují testy souvisejících systémů – jejich celkové funkční zkoušky. Postup zkoušek je takový, že nejdříve se odzkouší a připraví k provozu pomocné systémy, které jsou pak již provozuschopné a podporují technologicky zkoušky navazujících nadřazených systémů.

Hlavní činnosti této fáze:

- **Provedení zkoušek** jednotlivých komponent a systémů, které jsou podmínkou pro provedení Funkčních zkoušek (FZ) těchto systémů.

Jde o ověření, že vlastnosti a charakteristiky instalovaných komponent jsou v souladu s projektovými požadavky a technickými specifikacemi výrobce. Uvádění do provozu se týká mechanického, elektrického, HVAC a I&C zařízení.

- **Funkční zkouška systémů** – cílem testů je demonstrace bezpečného a spolehlivého provozu systému, který je plně v souladu s projektovou dokumentací. Provádí se následující činnosti:
 - testy elektrických systémů a jejich komponent,
 - testy I&C komponent a systémů,
 - verifikace algoritmů, automatik a blokad, řízení sekvencí jejich působení, logiky signalizací atd.

Uvádění do provozu elektrického a I&C zařízení musí být provedeny do zahájení testů souvisejících mechanických systémů:

- statické a dynamické proplachy nebo profuky potrubních celků a souvisejících komponent včetně vzduchovodů HVAC,
- nastavení projektových průtoků čerpadel nebo ventilátorů a tlakových ztrát hydraulických nebo vzduchotechnických systémů,
- verifikace, že provoz a chování součástí mechanických systémů odpovídá jejich projektovým charakteristikám.
- **Hydrostatická tlaková PG** na sekundární straně včetně parovodů předepsaným tlakem (dle projektu až 150 % nominálního tlaku).

Pro tuto zkoušku je nutno provést ohřev kovu tlakové nádoby parogenerátoru povoleným trendem na 60 °C a nedopustit pokles pod 30 °C po dobu provádění této zkoušky.

- **Zkouška integrity kontejmentu** – ZIK/CTT pevnostní a těsnostní zkouška dle obr. č. 1 – jedná se o natlakování kontejmentu

vzduchem na předepsaný tlak a následné vyhodnocení stavu kontejmentu a trendu poklesu po stanovenou dobu.

- **Proplachy systémů s potrubím** přímo navazujícím na reaktorový chladicí systém do reaktorové nádoby – dle obr. č. 2 – Nuclear circuit cleaning.
Následně proběhnou studené zkoušky s otevřeným reaktorem – Cold functional tests, Reactor Vessel Open:
 - v projektech, kde jsou havarijní čerpadla, se provede jejich test s průtokem do reaktoru a nastavení průtoků v souladu s bezpečnostními požadavky,
 - verifikace průtoků z hydro-akumulátorů a dostatečnost jejich kapacity,
 - demonstrace požadované provozuschopnosti bezpečnostních systémů.

Fáze 2

Celkové funkční zkoušky jaderného bloku slouží k prokázání dostatečnosti jeho provozních a bezpečnostních funkcí v co největší možné míře bez výroby páry s pomocí jaderného paliva. Aby bylo možné zahájit tuto fázi, musí být již většina pomocných a hlavních technologických systémů funkční.

V maximální míře se personál řídí validovanými postupy používanými pro běžný provoz zařízení – jeho náběh a odstavení. Při těchto zkouškách se dokončí validace provozních předpisů a postupů periodických zkoušek zařízení.

Hlavní činnosti této fáze (obr. č. 2):

- **Funkční zkoušky bloku v studeném stavu – Cold Functional Tests – CFT**
 - hlavním cílem je provedení hydrostatické tlakové zkoušky reaktorového chladicího systému (dle projektu až 150 % nominálního tlaku primárního okruhu (I.O.),

- primární systém se technologicky připraví na první náběh hlavních cirkulačních čerpadel (HCC) a následně se tyto čerpadla najíždí a provedou se požadované zkoušky a měření,
- kov reaktorové nádoby se prací HCC nahřeje nad teplotu křehkosti za studena,
- uskuteční se zkoušky systému vychlazování, kontroly objemu a chemického režimu I.O.,
- primární systém se natlačí na požadovaný tlak a následně se provede protokolární obhlídka dotčených potrubních systémů a zařízení,
- následně se provede snížení tlaku I.O., jeho vychlazení a drenáž,
- uskuteční se nutné revize a opravy.
- **Funkční zkoušky v horkém stavu – Hot Functional Tests – HFT**
 - během HFT je chladič systému reaktoru nahříván až do nominální provozní teploty prací HCC při současném zvyšování tlaku do nominálních hodnot s pomocí standardního systému kontroly tlaku v I.O.,
 - provedou se funkční zkoušky zařízení I.O. a pomocných systémů včetně HVAC,
 - sekundární okruh (II.O.) – PG jsou zaplněny a produkují páru až do nominálních hodnot tlaku v parním kolektoru, je zajištěno jejich napájení vodou,
 - základní systémy II.O. jsou v provozu včetně pomocných okruhů chlazení,
 - v průběhu zvyšování a snižování parametrů bloku se provede verifikace provozu všech mechanických a řídicích systémů s ověřením algoritmů, ochran, blokád a měření,
 - provede se kontrola funkčnosti bezpečnostních a havarijních systémů,
 - provedou se funkční zkoušky systému elektrického napájení včetně testů úplné ztráty napájení bloku,
 - uskuteční se testy související s provozuschopností informačních a řídicích systémů bloku při různých konfiguracích zařízení,

- významnou činností je provedení chemické pasivace povrchů chladicího systému I.O. a PG,
 - ověření předepsaných chemických režimů pro I.O. a II.O.,
 - při nominálních parametrech v parním kolektoru II.O. se na konci HFT uskuteční první rozběh turbosoustrojí při dosažení nominálních otáček,
 - po ukončení všech zkoušek bloku prováděných při nominálních parametrech I.O. a II.O. se provede jeho vychlazení s použitím normálních i havarijních předpisů,
 - provede se úplná drenáž I.O. a II.O. a provedou se požadované inspekce a údržba.
- **Finální příprava jaderného bloku na zavezení prvního palivového souboru do reaktoru**

Tato perioda je určená na přípravu všech podmínek nutných pro první zavezení jaderného paliva do reaktoru – dokončení a vyhodnocení všech testů uvádění NJZ do provozu a odstranění vad a nedodělků z předchozích etap, plná připravenost zařízení, dokončení a schválení nutné dokumentace a prokázání připravenosti personálu na etapu aktivního vyzkoušení. Vše směřuje k obdržení povolení SÚJB k zavezení prvního palivového souboru do reaktoru.

Etapa Aktivního vyzkoušení

Jaderný provoz NJZ začne od zavezení prvního palivového souboru do reaktoru. Od této fáze začínají platit požadavky související s jadernou bezpečností a požadavky, které jsou definované v AtZ [4] a navazujících vyhlášek. Personál investora, který aktivně provádí manipulace z blokové dozorny (BD) a kontroly související s manipulacemi s palivem musí být proškolen a licencován. Na základě dodané dokumentace uvádění do provozu musí být investorem vytvořen program pro aktivní spouštění NJZ a schválen SÚJB, který musí pro tuto etapu vydat oficiální povolení.

Následně budou popsány hlavní fáze Etapy AV a hlavní činnosti, které bude nutno realizovat.

Zavezení prvního palivového souboru do reaktoru

Tento milník je charakteristický tím, že se plně začínají aplikovat požadavky dokumentu *Limity a podmínky pro bezpečný provoz jaderné elektrárny* a další související bezpečnostní požadavky *Atomového zákona pro provoz jaderného zařízení*. Ze strany SÚJB je vydáno povolení k prvnímu fyzikálnímu spouštění jaderného zařízení s jaderným reaktorem.

Hlavní činnosti této fáze:

- I.O. a reaktorové pomocné systémy jsou zaplněny demineralizovanou vodou s určenou koncentrací kyseliny borité pro zajištění dostatečné pod-kritičnosti ve vztahu k jadernému palivu.
- Palivové soubory a regulační orgány se následně zavážejí z budovy paliva do reaktorové budovy a následně do reaktoru v souladu s odsouhlaseným programem zavážení paliva do reaktoru.
- Po zavezení veškerého vnitro-reaktorového zařízení a měření do reaktoru se provede usazení horního bloku reaktoru s pohony regulačních orgánů a následně uzavření/utěsnění reaktorové nádoby.

Testy před dosažením kritického stavu

Viz obr. č. 2 – Pre-critical tests.

Úkolem je prokázat spolehlivý a bezpečný provoz veškerého zařízení NJZ v průběhu dosahování horkého stavu primárního okruhu se zavezenou aktivní zónou a provedení měření hydraulických charakteristik I.O. a reaktoru ve finální konfiguraci. Provede se verifikace provozních charakteristik havarijních a regulačních orgánů reaktoru.

Měří se doba jejich pádu při provozu HCČ. Provádí se kalibrace vnitro-reaktorového měření a poslední ověření funkčnosti aparatury měření neutronového toku, verifikace a nastavení systému ochran reaktoru.

Fyzikální spouštění reaktoru – dosažení kritického stavu a testy po dosažení kritického stavu

Tato fáze uvádění NJZ do provozu zahrnuje dosažení prvního kritického stavu reaktoru a provedení testů na nízkém výkonu reaktoru.

Hlavní činnosti této fáze:

- Dosažení kritického stavu reaktoru předepsaným způsobem (obvykle ředěním obsahu kyseliny borité v chladivu).
- Po dosažení kritického pokračují předepsané fyzikální testy, obvyklý výčet hlavních testů pro PWR:
 - hodnota kritické koncentrace kyseliny borité v chladivu,
 - ověření symetrie zavezení aktivní zóny,
 - teplotní koeficienty reaktoru,
 - integrální a diferenciální charakteristiky skupin havarijních a regulačních kazet,
 - kontrola odezvy fyzikálních parametrů aktivní zóny reaktoru na rychlé odstavení a tím i kontrola efektivity zásahu havarijních a regulačních kazet,
 - opětovné dosahování kritického stavu s pomocí regulačních kazet,
 - provede se vyhodnocení všech předepsaných testů a musí následovat povolení SÚJB pro další zvyšování výkonu bloku.

Energetické testy

Na zahájení Energetických testů je požadováno samostatné povolení SÚJB.

V této fázi spouštění je hlavním úkolem zvýšit výkon reaktoru do úrovně energo-pásma (výkon reaktoru, kdy se začínají uplatňovat zpětné vazby reaktivity), což je zhruba výkon nad 2 % nominálního výkonu reaktoru. Poté budou zahájeny energetické testy bloku na předepsaných výkonových hladinách až do dosažení 100 % nominálního výkonu NJZ.

Hlavní činnosti této fáze:

- Na všech úrovních výkonu kontrola a kalibrace všech měřících kanálů jaderného přístrojového vybavení a nastavení úrovní působení ochran.
- Kontroly a testy měřících obvodů, regulačních systémů bloku, kalibrace a nastavení řídicího systému reaktoru.
- Vyhodnocení map rozložení neutronového toku v aktivní zóně.
- Při zvyšování výkonu se provádí testy zařízení II.O.
 - napájení PG a odzkoušení souvisejících automatik,
 - činnosti regulátorů tlaku v hlavním parním kolektoru,
 - příprava turbosoustrojí na fázování a jeho připojení k síti (fázování) při cca 25 % výkonu reaktoru,
 - následné zvyšování výkonu turbosoustrojí a předepsané kontroly a testy,
 - test odstavení turbosoustrojí.
- Test úplné ztráty napájení bloku – kontrola automatického přechodu napájení vlastní elektrické spotřeby diesel-generátory všech divizí, zároveň se kontroluje přechod reaktoru na chlazení přirozenou cirkulací.
- Dynamické testy spojené s velkou změnou výkonu, které musí být zvládnutelné bez působení ochranných systémů.
- Postupně NJZ dosáhne 100 % nominálního výkonu a je možné zahájit zkušební provoz bloku po dobu první kampaně, blok pokračuje v energetickém spouštění dle definice AtZ [4] a vyhlášek [5].

Komplexní vyzkoušení a zkušební provoz

Účelem komplexního vyzkoušení je prokázat, že NJZ je schopen všech nezbytných operací, jako je náběh bloku, jeho odstavování, částečné zatížení, schopnost měnit zatížení, provoz na maximálním výkonu atd. Tato zkouška trvá obvykle 30 dní.

Během této zkoušky dodavatel bloku zejména provede 10-denní zkoušku provozu bloku na stabilní výkonové hladině 100 % nominálního výkonu – tzv. Duration test.

Dále se uskuteční certifikační zkoušky bloku pro poskytování podpůrných služeb přenosové soustavě, garanční zkouška, zkoušky výkonu chladicí věže a zkoušky při předepsaných změnách výkonu bloku.

Po úspěšném ukončení těchto testů NJZ proběhne oficiální převzetí bloku do dočasného provozu investorem.

První kampaň je ukončena garanční odstávkou na výměnu paliva a provedení předepsaných garančních inspekcí a oprav a po splnění všech podmínek je NJZ převzat investorem do trvalého provozu.

Použitá literatura

- [1] Návod IAEA NES No. NP-T-2.10, Commissioning Guidelines for Nuclear Power Plants IAEA (May 2018, STI/PUB/1742).
- [2] WANO NUA I-WG – Roadway to Operational Readiness (A product of the New Unit Assistance Working Group).
- [3] Návrh Koncepce uvedení stavby ETE (3. a 4. blok) do provozu, zpracovaný ing. Ludkem Sedláčkem v ETE 2009.
- [4] Zákon č. 263/2016 Sb., Atomový zákon (AtZ).
- [5] Vyhláška č. 21/2017 Sb. – Vyhláška o zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení.

- [6] Vyhl. Č. 409/2016 Sb. – Vyhláška o činnostech zvláště důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti a radiační ochrany, zvláštní odborné způsobilosti a přípravě osoby zajišťující radiační ochranu registranta.
- [7] IAEA SSR 2/2 – Rev. 1 – Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation.