

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2024

Bc. Jiří Kaňa



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VLIV FLEXIBILITY PŘI POSKYTOVÁNÍ SYSTÉMOVÝCH SLUŽEB VYBRANÉHO BLOKU ELEKTRÁRNY DUKOVANY NA PARAMETRY AKTIVNÍ ZÓNY

THE IMPACT OF LOAD FOLLOWING IN PROVIDING SYSTEM SERVICES OF THE SELECTED DUKOVANY
POWER PLANT UNIT ON THE PARAMETERS OF THE CORE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Kaňa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Jiří Kaňa

ID: 220763

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Vliv flexibility při poskytování systémových služeb vybraného bloku Elektrárny Dukovany na parametry aktivní zóny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Komplexně zpracujte problematiku poskytování systémových služeb pomocí regulace výkonu jaderných bloků ve světě.
2. Pomocí difúzního makrokódu MOBY-DICK proveďte simulaci třetího bloku jaderné elektrárny Dukovany od počátku provozu do současnosti s výhledem na příští roky.
3. Navrhněte různé scénáře snižování bloku při poskytování systémových služeb.
4. Proveďte simulace vlivu těchto změn na parametry aktivní zóny z pohledu krátkodobého i z pohledu dlouhodobého. Analyzujte vliv na budoucí překládky jaderného paliva a jeho využití.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího a konzultantů závěrečné práce

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 20.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Konzultant: Ing. Martin Bárta, ČEZ, a.s., Ing. Pavel Máca

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Elektrizační soustava potřebuje k bezpečnému a spolehlivému provozu zdroje elektrické energie, které jsou schopny poskytovat výkonovou flexibilitu. V případě, kdy energetickému mixu budou dominovat bezemisní zdroje, bude poskytování těchto služeb z velké části úkolem jaderných elektráren. Změna výkonu jaderné elektrárny je oproti výkonovým změnám tepelných elektráren zatížena řadou specifík, která je nutno respektovat. Tato práce zkoumá možnosti využití reaktoru v elektrárně Dukovany pro poskytování flexibility. Z teoretického hlediska předkládá informace o potřebách elektrizační soustavy, obecné možnosti a úskalí využití jaderných elektráren pro flexibilitu a poukazuje na historický kontext této praxe. Po aplikování různých scénářů výkonových změn jsou výsledky simulace posouzeny z hlediska bezpečnostního, provozního a ekonomického.

Klíčová slova

Flexibilita, Dukovany, MOBY-DICK, systémové služby, bezpečnost, VVER-440, kompenzace kyselinou boritou

Abstract

To operate safely and reliably, the power grid needs power sources that are capable of providing flexibility. In the scenario that emission-free sources dominate the energy mix, the provision of these services will largely be the responsibility of nuclear power plants. Changing the output of a nuclear power plant is burdened with a number of specificities that need to be respected compared to the output changes of thermal power plants. This thesis explores the possibilities of using the reactor at the Dukovany power plant to provide load-following. From a theoretical point of view, it presents information on the needs of the power system, the general possibilities and limitations of using nuclear power plants for load-following and presents the historical context of this practice. After applying different scenarios of load-following, the simulation results are assessed from safety, operational and economic points of view.

Keywords

Load-following, Dukovany, MOBY-DICK, ancillary services, safety, VVER-440, boron compensation

Bibliografická citace

KAŇA, Jiří. *Vliv flexibility při poskytování systémových služeb vybraného bloku Elektrárny Dukovany na parametry aktivní zóny*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159508>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce doc. Ing. Karel Katovský, PhD.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Jiří Kaňa</i>
VUT ID studenta:	220763
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	2023/24
Téma závěrečné práce:	<i>Vliv flexibility při poskytování systémových služeb vybraného bloku Elektrárny Dukovany na parametry aktivní zóny</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 17. května 2024

podpis autora

Poděkování

Tímto velmi děkuji vedoucímu své práce doc. Ing. Karlovi Katovskému, PhD. za přístup k relevantním materiálům, projevenou podporu, metodickou pomoc a poskytnutou zpětnou vazbu. Dále patří můj velký dík mému odbornému konzultantovi Ing. Martinu Bártovi zejména za vhled do provozních a výpočetních postupů, pomoc se zpracováním dat a ochotu vyjasnit faktické nejasnosti. Nakonec děkuji i všem erudovanějším kolegům, kteří mi poskytli zpětnou vazbu v rámci průběžných prezentací.

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
1. ÚVOD.....	8
2. POSKYTOVÁNÍ SYSTÉMOVÝCH SLUŽEB POMOCÍ REGULACE VÝKONU	9
2.1 SYSTÉMOVÉ SLUŽBY	9
2.1.1 <i>Proces udržení frekvence</i>	9
2.1.2 <i>Proces obnovení frekvence</i>	10
2.1.3 <i>Proces obnovení záloh</i>	12
2.2 TECHNICKÉ PŘEVENÍ A OMEZENÍ REGULACE VÝKONU	12
2.2.1 <i>Mechanismus řízení</i>	12
2.2.2 <i>Xenonová otrava</i>	13
2.2.3 <i>Namáhání paliva</i>	15
2.2.4 <i>Režimy regulace</i>	15
2.2.5 <i>Omezení výkonových změn</i>	16
2.2.6 <i>Ekonomické hledisko</i>	17
2.3 ZKUŠENOSTI VE SVĚTĚ	17
2.3.1 <i>Francie</i>	17
2.3.2 <i>Německo</i>	18
2.3.3 <i>Švédsko</i>	18
2.3.4 <i>USA</i>	19
3. SIMULACE AKTIVNÍ ZÓNY EDU3	20
3.1 SPECIFIKA EDU3.....	20
3.1.1 <i>Provoz na efektech</i>	20
3.2 PROGRAM MOBY-DICK	21
3.2.1 <i>Vstupní soubor</i>	22
3.2.2 <i>Simulace do současnosti</i>	27
3.2.3 <i>Výstupní soubory</i>	27
4. NÁVRH SCÉNÁŘŮ REGULACE VÝKONU EDU3	31
4.1 LIMITY A OMEZENÍ	31
4.1.1 <i>Limitní poloha HRK6</i>	31
4.1.2 <i>Koeficient nerovnoměrnosti výkonu</i>	32
4.1.3 <i>Lineární výkon</i>	33
4.1.4 <i>Další parametry</i>	34
4.2 MYŠLENKOVÝ ZÁKLAD SCÉNÁŘŮ.....	35
4.2.1 <i>Ekonomický základ</i>	35
4.2.2 <i>Historický základ</i>	36
4.2.3 <i>Navržené scénáře</i>	39
4.2.4 <i>Změna vstupní teploty</i>	40
5. ZPRACOVÁNÍ A ZOBRAZENÍ.....	42
5.1 VARIANTY SCÉNÁŘŮ	42
5.1.1 <i>Referenční scénář</i>	42
5.1.2 <i>Týdenní scénář</i>	43
5.1.3 <i>Denní scénář</i>	44

5.1.4	<i>Kombinovaný scénář</i>	44
5.2	SLEDOVANÉ VELIČINY	44
5.2.1	<i>Výkonové změny</i>	45
5.2.2	<i>Axiální ofset</i>	46
5.2.3	<i>Poloha HRK</i>	47
5.2.4	<i>Koeficient K_r</i>	48
5.2.5	<i>Lineární výkon</i>	48
5.2.6	<i>Kyselina boritá</i>	51
5.3	POZOROVANÉ JEVY.....	53
5.3.1	<i>Výhoření během regulačního cyklu</i>	53
5.3.2	<i>Xenonové přechodné jevy</i>	54
5.3.3	<i>Překompenzace c_B</i>	58
5.3.1	<i>Vliv fáze kampaně</i>	61
5.3.2	<i>Opakování regulačních cyklů</i>	63
5.3.3	<i>Posun axiálního ofsetu</i>	67
5.4	PRODLOUŽENÍ KAMPANĚ	70
6.	ZHODNOCENÍ	71
6.1	BEZPEČNOSTNÍ HLEDISKO	71
6.2	EKONOMICKO-PROVOZNÍ HLEDISKO	72
7.	ZÁVĚR	74
	LITERATURA.....	76
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	79

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Příklad konstrukce "černého" a "šedého" klastru v západním PWR, převzato z [1]	13
Obrázek 2: Režim konstantního tlaku sekundárního okruhu a režim konstantní teploty primárního okruhu. Převzato z [30].	16
Obrázek 3: Výchozí uspořádání palivových kazet a regulačních orgánů, 1. kampaň	24
Obrázek 4: Příklad vstupního souboru: změny v uspořádání palivových souborů oproti předchozí kampani, kampaň 28	25
Obrázek 5: Zadání kroků výpočtu, kampaň 35	26
Obrázek 6: Výstupní soubor AAA. T. f3c35	28
Obrázek 7: Výstupní soubor alT. f3c35	28
Obrázek 8: Vyhoření jednotlivých kazet (MWd/tU) na konci 35. kampaně, vytvořeno pomocí Mapview	29
Obrázek 9: Maximální relativní výkon proutku v kazetě, 35. kampaň, zobrazeno pomocí Mapview	30
Obrázek 10: Povolené polohy HRK6, převzato z [33]	32
Obrázek 11: Závislost koeficientu K_r na výkonu	33
Obrázek 12: Závislost lineárního výkonu q_{ldov} a Δq_{ldov} na vyhoření, převzato z [33]	34
Obrázek 13: Průměrná cena elektřiny na denním trhu v ČR po hodinách za rok 2023, data z [34]	35
Obrázek 14: Průměrná cena elektřiny day-ahead v ČR po dnech v týdnu za rok 2023, data z [32]	36
Obrázek 15: Roční průběh výkonu bloku (v % N_{nom}) zapojeného do poskytování flexibility, EdF, převzato z [21]	37
Obrázek 16: Příklad změny výkonu bloku během 24 h, převzato z [1]	37
Obrázek 17: Průběh výkonu (v % N_{nom}) v JE Philippsburg 1 (BWR 926 MW) v srpnu 2009, převzato z [21]	38
Obrázek 18: Příklad poskytování flexibility v některých Německých jaderných elektrárnách během jednoho dne, převzato z [21]	38
Obrázek 19: Návrh týdenního intervalu scénářů flexibility	39
Obrázek 20: Porovnání teoretické a skutečné závislosti vstupní teploty chladiva na výkonu reaktoru, EDU4	40
Obrázek 21: Referenční varianta, bez regulace výkonu	45
Obrázek 22: Příklad vyhodnocení lineárního výkonu pro referenční scénář	49
Obrázek 23: Vyhodnocení lineárního výkonu pro týdenní scénář na začátku kampaně s překompenzací	50
Obrázek 24: Zhodnocení lineárního výkonu během týdenního scénáře na koci cyklu s překompenzací c_B	51
Obrázek 25: Týdenní scénář na začátku cyklu bez kompenzace c_B	54
Obrázek 26: Týdenní scénář na konci cyklu bez kompenzace c_B	55
Obrázek 27: Kombinovaný scénář na konci cyklu bez kompenzace c_B	57
Obrázek 28: Kombinovaný scénář na konci cyklu bez kompenzace c_B s vyhlazením přechodu	58
Obrázek 29: Týdenní scénář na začátku cyklu s překompenzací c_B	59
Obrázek 30: kombinovaný scénář na konci cyklu s překompenzací c_B	60
Obrázek 31: Týdenní scénář na konci cyklu s překompenzací c_B	62
Obrázek 32: Denní scénář vprostřed cyklu bez kompenzace c_B	63
Obrázek 33: Periodicky opakovaný denní scénář vprostřed cyklu	64
Obrázek 34: Týdenní scénář uprostřed cyklu s překompenzací c_B a s opakováním	65
Obrázek 35: Kombinovaný scénář vprostřed cyklu s překompenzací c_B a opakováním	67
Obrázek 36: Denní scénář, varianta na konci cyklu bez překompenzace	69

1. ÚVOD

Pro bezpečný provoz elektrizační soustavy je nutné zapojení zdrojů, které jsou schopny poskytovat výkonovou flexibilitu a tím dorovnávat rozdíly mezi výrobou a spotřebou elektrické energie. Ve stavu, kdy bude energetický mix tvořen kombinací obnovitelných zdrojů energie a jadernými zdroji, bude nutné využívat i jaderné elektrárny v režimu poskytování flexibility. Jelikož se však s tímto provozem pojí řada specifik, je třeba na ně brát ohled.

Cílem této práce je tedy představit vliv výkonových změn v rámci poskytování flexibility na parametry aktivní zóny jaderného reaktoru v elektrárně Dukovany. Věnuje se problematice systémových služeb na podporu elektrizační soustavy, stejně jako specifikům a omezením flexibility plynoucím z principu funkce jaderných elektráren. Představuje princip funkce výpočetního programu MOBY-DICK, který je pro simulaci využit, s ohledem na unikátní vlastnosti a provozní zvyklosti vybraného třetího bloku jaderné elektrárny Dukovany.

Hlavním přínosem práce je vytvoření tří scénářů poskytování flexibility, které se zakládají nejen na ekonomicky vyjádřených potřebách sítě, ale také na historických zkušenostech z provozu zahraničních elektráren s respektem ke schopnostem vybraného reaktoru deklarovaným jeho provozovatelem. Tyto scénáře jsou dále rozlišeny do několika variant, které umožňují podrobněji posoudit jevy, které se v jaderném reaktoru odehrávají. Výstupy ze simulací jsou představeny ve struktuře, která sleduje popis jednotlivých dějů spojených s vyhoříváním paliva, výkonovými změnami a změnami koncentrace kyseliny borité a která umožňuje logicky souslednou interpretaci změn sledovaných parametrů. Při interpretaci je kladen důraz na odlišení jevů souvisejících s výpočetní metodou a jevů fyzikální podstaty s popisem jejich příčin.

Na závěr je v práci přistoupeno k vyhodnocení pozorovaných jevů z hlediska bezpečnostního, tj. zda sledované veličiny vyhovují stanoveným limitům, z hlediska provozního, které bere v potaz zejména případnou potřebu opakovaných změn koncentrace rozpustného absorbátoru v chladivu primárního okruhu a jejich vliv na další systémy, a nastiňuje také základní směry ekonomického zhodnocení. Na základě předchozího posouzení je doporučen charakter výkonových změn v rámci poskytování flexibility a jsou také vytyčeny další kroky, které vhodně rozšiřují záběr této práce.

2. POSKYTOVÁNÍ SYSTÉMOVÝCH SLUŽEB POMOCÍ REGULACE VÝKONU

2.1 Systémové služby

Provozovatel přenosové soustavy má ze zákona povinnost udržovat kvalitu elektřiny [11][12]. Tím se rozumí především udržovat frekvenci a hladinu napětí v daných mezích.

Dané meze [13]:

	Nominální hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Podíl času
Frekvence	50 Hz	-1 % 49,5 Hz	+1 % 50,5 Hz	99,5 %
	50 Hz	-6 % 47 Hz	+4 % 52 Hz	100 %
Napětí	110 kV	-10 % 99 kV	+10 % 121 kV	99 %
	220 kV	-10 % 198 kV	+10 % 242 kV	99 %
	400 kV	-5 % 380 kV	+5 % 420 kV	99 %
	všechna	-15 %	+15 %	100 %

Podle Kodexu přenosové soustavy [11] tyto povinnosti plní její provozovatel pomocí systémových služeb, které zajišťuje koordinační nebo řídicí formou [11]. Mezi systémové služby patří zejména služby pro udržování kvality elektřiny:

- Proces automatického udržení frekvence a zálohy pro automatické udržení frekvence (FCR)
- Proces obnovení frekvence a výkonové rovnováhy a zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy ($aFRR$, $mFRR_t$)
- Proces náhrady záloh a služby záloh pro náhradu (RR)
- Sekundární regulace U/Q
- Terciární regulace napětí pomocí optimalizace
- Sledování kvality napěťové sinusovky a měření „čistoty“ sinusovky
- Zajištění stability přenosu pomocí sledování a vyhodnocování měřených údajů v reálném čase a kontrolními výpočty stability

Dále sem patří služby pro udržování výkonové rovnováhy v reálném čase:

- Sekundární regulace f a P (zajištěná službou $aFRR$)
- Terciární regulace výkonu (zajištěná službami $mFRR_t$ a RR) [11]

2.1.1 Proces udržení frekvence

V elektrizační soustavě platí, že odchylka od nominálního výkonového stavu má za následek odchylku od nominální frekvence podle rovnice (1):

$$\Delta f = -\frac{\Delta P}{K_s} \quad (1)$$

K_s ($\text{MW} \cdot \text{Hz}^{-1}$) je výkonové číslo soustavy.

Takovou odchylkou je změna zatížení nebo výroby, nejspíše výpadek zdroje výkonu, výpadek některého vedení, neočekávané sepnutí zátěže nebo změna výroby daná charakterem zdroje (závislost na počasí). Pro primární regulaci frekvence platí tzv. princip solidarity, tj. na obnovení výkonové rovnováhy se podílejí všechny výrobní soustavy, které jsou do procesu zapojeny, bez ohledu na to, v které oblasti nerovnováha vznikla [11].

Cílem primární regulace frekvence je zastavení poklesu nebo nárůstu frekvence pomocí zvýšení, respektive snížení, činného výkonu dodávaného do soustavy. Tento děj je poměrně rychlý, odehrává se v řádu sekund (ČEPS stanovuje podmínku pro jednotky zapojené do služby FCR uvolnění 100% rezervované zálohy do 30 s a 50% zálohy do 15 s od vzniku odchylky frekvence [11]).

Záloha pro automatickou regulaci frekvence se stanovuje v rozsahu největšího zdroje soustavy, jehož výpadek určuje teoretickou maximální odchylku ΔP . V propojené soustavě je zpravidla tato záloha rozložena mezi jednotlivé regulační oblasti, přičemž každá regulační oblast je povinna udržovat souhrnnou výkonovou zálohu, která je pro ni stanovena, s daným sumárním výkonovým číslem.

V ENTSO-E je pro oblast kontinentální Evropa, které je ČR součástí, stanovena záloha na ± 3000 MW, z čehož na ČR připadá přibližně 80 MW [11].

Potřebný výkon se uvolňuje postupně podle velikosti odchylky frekvence, přičemž aktivace jednotlivých poskytovatelů výkonové zálohy probíhá podle jejich nabízené ceny za jednotku dodávaného výkonu.

Z důvodu omezení vlivu výpadku jednotlivých poskytovatelů FCR je v ČR omezena maximální velikost zálohy pro jednu jednotku na 25 MW. Minimální velikost je stanovena na 1 MW. [11]

2.1.2 Proces obnovení frekvence

Proces obnovení frekvence, dříve označovaný jako sekundární regulace f a P , navazuje na proces udržení frekvence a jeho cílem je obnovení nominální frekvence f_n a obnovení smluvených toků výkonů mezi regulačními oblastmi. Na rozdíl od primární regulace, kde platí princip solidarity, zde platí princip neintervence, který značí, že odchylku má za úkol vyrovnat regulační oblast, která ji způsobila [11]. Princip neintervence vyjadřuje následující rovnice:

$$ACE = \Delta P_{sald} - K_s \cdot \Delta f \quad (2)$$

ACE (MW) je chyba regulační oblasti, ΔP_{sald} je rozdíl plánovaného salda a reálného přeshraničního salda a K_s je výkonové číslo soustavy.

Rovnice (2) vyjadřuje chybu regulační oblasti. V oblasti, kde odchylka nevznikla, dojde k změně výkonu na základě změny frekvence podle rovnice (1). Tato změna výkonu se projeví změnou přeshraničního salda a celková chyba ACE bude rovna nule. V postižené oblasti bude naopak rozdíl přeshraničního salda dán intervencí ostatních regulačních oblastí a celková chyba ACE bude rovna změně zatížení nebo výroby, která zapříčinila odchylku frekvence [11].

V takovém případě je povinností postižené oblasti obnovit výkonovou bilanci na úroveň před vznikem odchylky Δf .

Pro obnovení jmenovité frekvence je stanoven časový interval 15 minut [14]. Služby, které se pro tento proces užívají se dělí na automatické aFRR a manuální mFRR. Automatické služby se aktivují na základě algoritmu, manuální ovládá dispečer. Manuálně spínané rezervy pro obnovení frekvence se mohou řadit do následujícího procesu obnovení záloh, ale v realitě tyto jevy probíhají paralelně a jednotlivé zdroje jsou spínány podle rychlosti, s jakou jsou schopny dodat potřebný výkon, a ceny za kterou své služby nabízejí.

Pro aFRR určuje ČEPS mimo jiné tato pravidla: velikost rezervy od 1 MW do 99 MW, rychlost realizace rezervy 7,5 min od vydání požadavku, rychlost změny výkonu alespoň 2 MW/min, schopnost poskytovat plnou výkonovou rezervu alespoň po dobu 30 min, rychlost deaktivace služby 7,5 min. ČEPS rovněž plánuje zkrácení doby náběhu na plnou velikost rezervy na 5 min do konce roku 2024 [11][15].

Manuálně aktivované zálohy jsou většinou realizovány pomocí produktů s časovým určením $mFRR_t$, kde $t = 5$ min nebo $t = 12,5$ min.

Pro $mFRR_{12,5}$ platí doba do plné aktivace 12,5 min, z toho doba přípravy maximálně 2,5 min a doba změny výkonu (rampování) 10 min. Zdroj musí garantovat poskytování výkonu minimálně po dobu 15 minut, což je obchodní interval, na který se tento produkt sjednává.

Podobně pro $mFRR_5$ platí požadavek náběhu do plné aktivace do 5 min od vydání povelu a garance poskytování výkonu alespoň po dobu 4 hodin během jednoho obchodního dne.

I pro $mFRR_t$ platí meze poskytovaného výkonu od 1 MW do 70 MW a jsou sjednávány jak kladné rezervy $mFRR_t^{(+)}$, které spočívají ve zvýšené dodávce výkonu, tak rezervy záporné $mFRR_t^{(-)}$, které realizují zvýšený odběr, nebo pokles výroby. [11]

2.1.3 Proces obnovení záloh

Proces obnovení záloh je součástí mechanismu dříve označovaného jako terciární regulace výkonu a navazuje na proces obnovení frekvence. Má za cíl uvolnit zálohy aFRR na původní velikost, aby byla opět k dispozici plná předepsaná výše záloh pro regulaci další případné odchylky frekvence [11]. Z hlediska dispečera lze pro tento účel využít jak zálohy výkonové rovnováhy s manuální aktivací (mFRR_t), tak zálohy pro náhradu (RR).

Poskytovatel služby RR má povinnost najetí na sjednaný výkon do 30 min do příkazu dispečera a podobně obnovení původní výroby do 30 min po pokynu dispečera k ukončení procesu náhrady záloh. Rozsah výkonu jedné jednotky zapojené do služby je 1 MW až 99 MW. Služba se sjednává vždy na celé čtvrt hodiny.

2.2 Technické provedení a omezení regulace výkonu

Většina jaderných elektráren pracuje v základním zatížení. To není dáno primárně jejich neschopností výkonových změn, ale tím, že je to zkrátka ekonomičtější a jednodušší způsob provozu. Většina bloků, které jsou dnes v provozu, byly nicméně konstruovány se schopností poskytování flexibility ve značném rozsahu. Lehkovodní reaktory jsou běžně zapojeny do primární a sekundární regulace frekvence a některé jednotky jsou provozovány v režimu, jehož součástí je jedna nebo dvě velké změny výkonu denně. Evropské požadavky na veřejné služby (EUR) požadují po jaderných elektrárnách schopnost výkonových změn v rozsahu 50 % až 100 % jejich jmenovitého výkonu¹ na denní bázi s rychlostí změny 3 % až 5 % za minutu. Některá uspořádání počítají i s daleko rychlejší změnou výkonu v řádu jednotek procent jmenovitého výkonu za sekundu, ale pouze v úzce vymezeném rozpětí. [1][16]

2.2.1 Mechanismus řízení

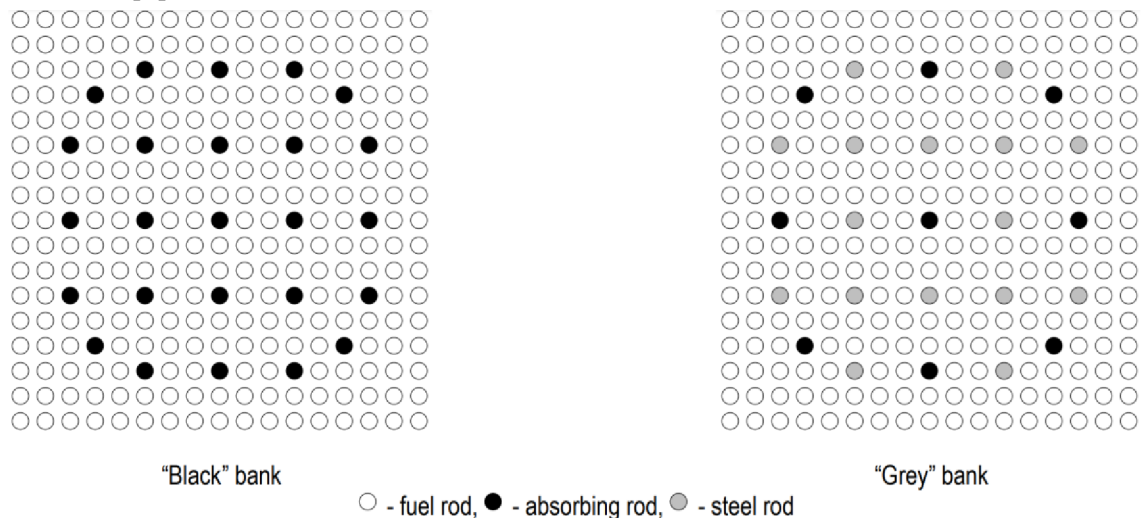
Pro řízení reaktivity aktivní zóny reaktoru jsou v tlakovodních lehkovodních reaktorech klasicky užívány dva mechanismy: regulační orgány² a rozpustné absorbátory. Regulační orgány jsou většinou na bázi bóru nebo kadmia a jejich účelem je při vsunutí do aktivní zóny významně omezit řetězovou štěpnou reakci. Výhodou je rychlost, s jakou se projeví jejich vliv, nevýhodou je deformace rozložení výkonu a tím i horší využití paliva v okolí regulačních orgánů. Rozpustné absorbátory obsahují prvek (¹⁰B) s velkým účinným průřezem pro záchyt neutronu v kapalně podobě a přidávají se do chladiva nebo moderátoru. V PWR se nejčastěji používá kyselina boritá (H₃BO₃) [3]. Výhodou rozpustných absorbátorů je, že působí rovnoměrně v celém objemu aktivní zóny a nedochází tedy k deformaci neutronového toku. Nevýhodou je poměrně malá rychlost procesu, zejména snižování koncentrace kyseliny borité je časově i ekonomicky náročné

¹ Pozn. Procentuální vyjádření výkonu v této práci vždy odkazuje na procenta z nominálního výkonu

² Regulační orgány jsou obecným označením, alternativně se používá méně přesně „regulační tyče“, ve většině tlakovodních reaktorů se jedná o regulační klastry, v reaktorech VVER-440 o regulační kazety.

a vzniká při něm množství radioaktivního odpadu.

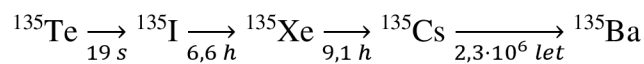
Oba mechanismy řízení reaktivity mají v provozu reaktoru své nezastupitelné místo, ale ani jeden přístup není obzvláště vhodný k cyklování reaktoru v režimu den – noc. Namísto toho byl vyvinut přístup pomocí tzv. „šedých“ regulačních orgánů³, které mají několikanásobně nižší váhu⁴ než hlavní „černé“ regulační orgány. Tím je zajištěna dostatečná rychlost regulace a zároveň nedochází k tak významné deformaci neutronového toku, jelikož ani plně zasunutá skupina šedých regulačních orgánů zpravidla nemá za následek úplné odstavení reaktoru, ale jen významný pokles výkonu. Toto uspořádání společně se změnami teploty chladiva zajišťují dostatečnou pružnost reaktoru. [1]



Obrázek 1: Příklad konstrukce "černého" a "šedého" klastru v západním PWR, převzato z [1]

2.2.2 Xenonová otrava

Jedním z hlavních problémů při změnách výkonu způsobených regulací výroby jsou reaktorové otravy, zejména otrava ^{135}Xe . Tento izotop má obrovský účinný průřez⁵ pro záchyt neutronů a významně snižuje reaktivitu aktivní zóny. V reaktoru vzniká prakticky výlučně rozpadem nestabilního izotopu ^{135}I , který vzniká buďto přímo štěpením nebo rozpadem štěpného produktu ^{135}Te . Hlavní rozpadová řada vypadá takto:



Jelikož je doba rozpadu telluru ve srovnání s rozpadem jódu zanedbatelná, lze uvažovat, že jód vzniká rovnou ze štěpení. Podobně ^{135}Cs lze z hlediska doby, kterou stráví palivo v reaktoru, považovat za stabilní izotop, který navíc nemá na další štěpení

³ V ČR se nepoužívají; používají je některé západní reaktory, u kterých se dopředu počítá s poskytováním flexibility.

⁴ Váhou regulačního orgánu se myslí jeho vliv na reaktivitu aktivní zóny

⁵ Účinný průřez pro záchyt tepelného neutronu je $2,65 \cdot 10^6$ barn [24]

žádný významný vliv. Změna koncentrace ^{135}I je dána přírůstkem izotopu ze štěpení, respektive rozpadu ^{135}Te , a úbytkem vlivem radioaktivní přeměny na ^{135}Xe .

$$\frac{dN_I(t)}{dt} = \gamma^{Te} \cdot \Sigma_f \cdot \varphi(t) - \lambda^I \cdot N_I(t) \quad (3)$$

N_I – hustota izotopů ^{135}I v reaktoru (m^{-3})

λ^I – rozpadová konstanta ^{135}I (s^{-1})

φ – hustota neutronového toku ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

Σ_f – makroskopický účinný průřez pro štěpení (m)

γ^{Te} – podíl vzniku ^{135}Te ze štěpení ($\sim 6,2 \%$)

Změna koncentrace ^{135}Xe je dána přírůstkem díky přeměně ^{135}I a malým dílem i vlastním vznikem přímo z jaderného štěpení, úbytkem vlivem vlastního radioaktivního rozpadu a úbytkem absorpcí neutronu. [3][25]

$$\frac{dN_{Xe}(t)}{dt} = \gamma^{Xe} \cdot \Sigma_f \cdot \varphi(t) + \lambda^I \cdot I - (\lambda^{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \varphi(t)) \cdot N_{Xe}(t) \quad (4)$$

N_{Xe} – hustota izotopů ^{135}Xe v reaktoru (m^{-3})

λ^{Xe} – rozpadová konstanta ^{135}Xe (s^{-1})

σ_a^{Xe} – mikroskopický účinný průřez ^{135}Xe pro záchyt neutronu (m^2)

γ^{Xe} – podíl vzniku ^{135}Xe ze štěpení ($\sim 0,3 \%$)

V ustáleném stavu je množství ^{135}Xe i ^{135}I konstantní, tedy přírůstky se rovnají úbytkům. Pokud se výkon nemění, je koncentrace xenonu přímo úměrná neutronovému toku, respektive výkonu reaktoru. Při rychlém (z hlediska vývinu xenonu⁶) poklesu výkonu se však rovnováha naruší. Množství ^{135}I se začne exponenciálně snižovat, ale ^{135}Xe začne vlivem menšího vyhořívání přibývat až do maxima, které se objevuje přibližně v čase 7-8 hodin po výkonové změně [1]. Teprve potom se množství absorbátoru začne snižovat. Může se tak stát, že po dobu několika hodin po snížení výkonu není možné výkon reaktoru kvůli nedostatečné zásobě reaktivity opět zvýšit. Tento jev je omezující zejména ke konci kampaně, kdy je zásoba reaktivity vlivem vyhořívání paliva a akumulaci strusek⁷ malá a nárůst koncentrace xenonu by mohl vést k neplánovanému odstavení reaktoru.

Během nominálního provozu je výkon realizován dominantně ve spodní polovině aktivní zóny. Důvodem je jednak vtok studenějšího chladiva zespodu, jednak přítomnost regulačních kazet v horní části. Po nějakém regulačním zásahu pomocí kazet však může dojít k postupnému převážení výkonu do horní poloviny. To je způsobeno tím, že přemírou výkonu se ve spodní polovině naakumulovalo množství ^{135}I , který se rozpadl

⁶ Pro potřeby této práce se xenonem myslí vždy ^{135}Xe , případně jeho molární koncentrace v palivu.

⁷ Struskou rozumíme štěpné produkty, které jsou stabilní, nebo jejich poločas rozpadu je významně delší než doba pobytu paliva v reaktoru. Strusky obecně snižují reaktivitu parazitním záchytem neutronů. Nejvýznamnější strusky jsou ^{149}Sm , ^{151}Sm , ^{155}Eu , ^{113}Cd , ^{157}Gd . [3]

na ^{135}Xe . Naopak v horní polovině je koncentrace xenonu poměrně malá, proto se reakce rozeběhne tam, kde dochází k menší absorpci neutronů. Tomuto jevu se říká xenonové oscilace a je typický pro rozměrné reaktory⁸. Nejčastější jsou axiální oscilace mezi horní a dolní polovinou. To může být potíží zejména pro cyklickou regulaci výkonu např. v režimu den – noc, jelikož perioda xenonových oscilací má délku přibližně 24 h [3]. Při významných rozdílech výkonu jednotlivých částí reaktoru může dojít k překročení lineárního výkonu proutku i při nominálním výkonu reaktoru jako celku.

2.2.3 Namáhání paliva

Jelikož má ve většině PWR palivo formu keramického UO_2 a pokrytí je většinou tvořeno kovovou slitinou na bázi zirkonia, mají značně rozdílný teplotní koeficient roztažnosti. K tomu se přidává značný teplotní spád na samotné palivové peletce, což vede k praskání a napuchání palivové peletky a unikání plynných produktů štěpení do prostoru mezi palivem a pokrytím. Tyto plyny jsou navíc často korozivní. Nárůst tlaku, přirozený rozpad produktů štěpení a teplotní změny zvyšují riziko vzniku netěsnosti pokrytí palivového proutku. [7]

Během změn výkonu na denní bázi dochází v palivu k výrazným změnám lineárního poproutkového výkonu a teplotního gradientu. Přesto se ukazuje, že při dodržování předepsaných mezí (zejména rychlosti změny výkonu) nevedou periodické výkonové změny ke zvýšení frekvence vzniku netěsnosti paliva.

Pokud však dojde ke vzniku netěsnosti (z jakéhokoli důvodu), není možné, aby reaktor poskytoval flexibilitu, protože panuje silné přesvědčení, že změny lineárního poproutkového výkonu a teplotního gradientu netěsnost dále významně zhoršují. [1][21]

2.2.4 Režimy regulace

Regulace výkonu probíhá v režimu od turbíny k reaktoru. To znamená, že regulátor na základě požadavků primární regulace frekvence, sekundární regulace a plánovaného cyklování vyšle signál do ventilů, které upravují množství páry přiváděné na turbínu [1]. To má za následek změnu tlaku a teploty v hlavním parním kolektoru⁹. To má za následek změnu odběru výkonu z primárního okruhu, což se projeví jako zvýšení nebo snížení teploty studené větve chladicí smyčky.

Reaktor se potom provozuje v jednom z následujících režimů. Režim konstantní průměrné teploty primárního okruhu se projeví menší náročností na kompenzátor objemu, jelikož chladivo nepodstupuje během provozu téměř žádné objemové změny vlivem teplotní roztažnosti. Nevýhodou je s výkonem klesající teplota sekundárního okruhu¹⁰, což jednak snižuje termodynamickou účinnost cyklu a jednak zvyšuje nároky na parogenerátor.

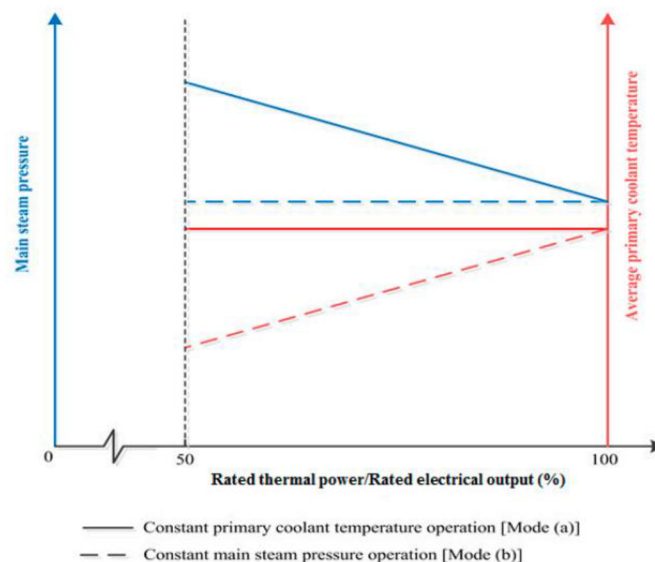
⁸ V Dukovanech se oscilace prakticky nevyskytují, ale v elektrárně v Temelíně hrají významnou roli.

⁹ Parovod sdružující výstupy ze všech parogenerátorů.

¹⁰ Vyšší předávaný výkon znamená větší rozdíl vstupní a výstupní teploty, přičemž teplota sekundárního okruhu musí být nižší než teplota studené větve primárního okruhu.

Druhou možností je režim konstantního tlaku v hlavním parním kolektoru. To znamená, že se se zvyšujícím výkonem zvyšuje i teplota. To vede k vyšším nárokům na kompenzátor objemu a větší deformaci neutronového toku při regulaci¹¹, ale také k větší celkové účinnosti cyklu [1].

V praxi se používá i kombinace obou režimů regulace např. v různých výkonových rozmezech [1].



Obrázek 2: Režim konstantního tlaku sekundárního okruhu a režim konstantní teploty primárního okruhu. Převzato z [30].

2.2.5 Omezení výkonových změn

Při provozu jaderného reaktoru je řada parametrů, které je třeba sledovat a jejichž vykročení z předepsaných mezí může vést k omezení činnosti, nebo i k havarijnímu odstavení reaktoru. Z hlediska poskytování flexibility jadernými elektrárnami jsou důležitými parametry zejména:

- nerovnoměrnost rozložení výkonu v aktivní zóně - jedná se o poměr výkonu nejzatíženějšího elementu zóny a průměrného výkonu
- bezpečnostní zásoba podkritičnosti - jedná se o množství záporné reaktivity, které je možno do reaktoru vnést při zaseknutí regulačního orgánu s největší vahou
- velikost lineárního výkonu - v závislosti na vyhoření proutku je výrobcem daná maximální hodnota lineárního výkonu proutku (W/cm), aby byla zachována těsnost a integrita proutku
- skok lineárního výkonu - při přechodových jevech v reaktoru je povolena pouze určitá hodnota změny lineárního výkonu proutku (W/cm)

¹¹ Oproti regulaci na konstantní teplotu primárního okruhu se při snížení výkonu sníží i průměrná teplota primárního okruhu. To vede vlivem zpětnovazebního efektu ke zvýšení reaktivity, kterou je třeba tím více kompenzovat regulačními orgány, což vede k větší nerovnoměrnosti neutronového toku.

- poloha regulačních orgánů - ta souvisí s deformací neutronového toku uvnitř aktivní zóny (jsou-li regulační orgány příliš zasunuty) a s účinností regulačních orgánů $\frac{\delta\rho}{\delta x}$ (míra vnosu reaktivity na změnu polohy regulační tyče) [33]

2.2.6 Ekonomické hledisko

Poskytování systémových služeb je vždy nakonec otázka ekonomické rentability. Provoz reaktoru v režimu umožňujícím poskytování těchto služeb s sebou nese vždy dodatečné náklady, které je třeba kompenzovat platbou za poskytnutou službu. Na rozdíl od fosilních elektráren cena elektřiny z jaderné elektrárny není z největší části tvořena cenou paliva, nelze tudíž předpokládat, že omezením výkonu elektrárny se ušetří díky menší spotřebě paliva. Cena za palivo naopak bude vyšší než při optimálním provozu, neboť kampaň není možné naplánovat tak přesně a využití paliva tak klesne.

Výpočty ukazují, že cena paliva na kWh vyrobené elektřiny takto může vzrůst až o 20 % v případě, že k poskytování systémových služeb dojde neplánovaně, aniž by to bylo předem započteno v návrhu uspořádání aktivní zóny. Podíl ceny paliva na celkovou cenu za kWh je však přibližně jen 20 %, takže se nárůst ceny paliva nepromítne plnou měrou do ceny elektřiny [21].

Další významný vliv na cenu má snížení koeficientu využití jaderného bloku. Vliv poskytování služby pro regulaci na koeficient využití bloku je na základě zkušeností z Francie odhadován na 1,2 % [1]. Jelikož většina elektráren byla navržena se schopností měnit výkon v poměrně velkém rozsahu, dodatečné náklady na údržbu vlivem rychlejšího stárnutí komponent nejsou významné. Zejména ale nejen u starých elektráren je třeba započíst i náklady na dodatečné zařízení, měření a kontrolní systém. Celkový nárůst nákladů na výrobu elektřiny tedy můžeme odhadovat na 1 % až 5 %. [1][21]

Aby se tedy provozovateli jaderné elektrárny poskytování systémových služeb vyplatilo, musí být odměna za tuto službu vždy vyšší než zvýšení nákladů.

2.3 Zkušenosti ve světě

2.3.1 Francie

Roční výroba cca 336 TWh¹² francouzských jaderných elektráren je zodpovědná za přibližně 70 % elektřiny vyrobené ve Francii [17][19]. Podíl energie pocházející z větrných a solárních elektráren za rok 2023 je přibližně 14,5 %. Z důvodu vysokého podílu jaderných zdrojů nemá Francie v podstatě jinou možnost než tyto zdroje zapojit do regulace sítě, což také dělá. Regulaci jaderných elektráren lze rozdělit do tří kategorií:

- Primární regulace frekvence (FCR), kdy na rychlé změny reaguje turbína, podle které následně upraví svůj výkon i reaktor

¹² V roce 2023 [19]

- Sekundární regulace výkonu (FRR), která závisí na ceně kontraktů a platbě za systémové služby
- Přizpůsobování výkonu v režimu den – noc v rozsahu 50 % až 100 %

Veškerá kapacita Francie pochází z bloků typu PWR, které mají poměrně velkou zásobu reaktivity na začátku kampaně. Reaktory EdF jsou schopny snížit svůj výkon ze 100 % na 30 % během 30 minut [17]. Ve dvou třetinách kampaně už je zásoba reaktivity menší a reaktor už nelze použít pro cyklování v režimu den – noc. Na konci kampaně (přibližně v poslední desetině) už je reaktor schopen poskytovat pouze FCR a žádné velké výkonové skoky nejsou možné.

Společnost EdF uvádí, že reaktor EPR je schopen¹³ výkonových změn souvisejících s regulací výkonu v následujícím rozsahu [26][28]:

- rychlost regulace až 5 % za minutu v rozmezí 60 % až 100 % nominálního výkonu na denní bázi
- zvyšování výkonu z 25 % na 60 % rychlostí 2,5 % za minutu
- skoková změna výkonu o velikosti $\pm 2,5$ % v rámci primární regulace frekvence
- změna zatížení $\pm 12,5$ % s rychlostí 1 % za minutu v rámci sekundární regulace
- změna zatížení rychlostí ± 1 % za sekundu do velikosti ± 10 % v rozmezí od 30 % do 100 % během neplánovaných výkonových změn

2.3.2 Německo

Před ukončením provozu všech jaderných elektráren, o kterém Německo rozhodlo v r. 2011 po jaderné havárii ve Fukušimě a ke kterému došlo 15.4.2023 [29], nasbíralo mnoho zkušeností s provozem svých 36 reaktorů. Mnoho z nich bylo provozováno v režimu regulace výkonu, a to jak tlakovodní reaktory (PWR), tak reaktory varné (BWR) [21]. V době před havárií ve Fukušimě bylo možné využít až 50 % kapacity tlakovodních reaktorů pro flexibilitu bez významných ztrát účinnosti. Regulace pod tuto hranici by mohla vést ke vzniku teplotních gradientů a tepelnému namáhání. K regulaci byla využívána zároveň skupina několika reaktorů, což vedlo k menším nárokům na jednotlivá zařízení a větší schopnosti regulace. Tento celek měl schopnost regulace v rozmezí 80 % až 100 % rychlostí 10 % za minutu a v rozmezí od 50 % rychlostí 3,8 % až 5,5 % za minutu. Celkový výkon uskupení tak bylo možné zvýšit z 50 % na 100 % během 15 minut. Tyto rychlosti jsou srovnatelné s rychlostí regulace tepelných elektráren. [21][26]

2.3.3 Švédsko

Švédsko má zkušenosti s flexibilním provozem jaderných elektráren zejména z osmdesátých a devadesátých let minulého století [21][26]. Do regulace se nicméně zapojovaly zejména varné reaktory na elektrárnách Forsmark, Oskarshamn a Ringhals.

¹³ Teoretické schopnosti reaktoru zpravidla neodpovídají provozním limitům a omezením.

Cyklování se provádělo hlavně na denní bázi, nebo formou dlouhodobého snížení výkonu (v letních měsících). Jmenovitě na elektrárně Forsmark byly provedeny testy na použití reaktorů pro primární regulaci, ale tento koncept byl opuštěn poté, co se objevily nežádoucí výkonové oscilace. Další potíží byla konstrukce regulátoru turbíny, který způsoboval nouzové odstavení bloku v případě výkonových změn.

Švédsko má díky své geografické poloze svoji energetiku postavenou na vodních elektrárnách, které jsou levné na provoz a snadno říditelné. I proto je jeho situace poměrně specifická a těžko porovnatelná se situací středoevropských států.

2.3.4 USA

Společnost Westinghouse uvádí, že jejich reaktor AP1000 vydrží následující změny bez havarijního odstavení reaktoru [26][27]:

- změnu výkonu rychlostí $\pm 5\%$ za minutu v rozsahu 15 % až 100 % nominálního výkonu
- skoková změna zatížení $\pm 10\%$ v rozsahu 25 % až 100 % nominálního výkonu
- ztráta plného zatížení ve výši 100 % z plného výkonu na vlastní spotřebu
- změny výkonu v režimu 100 % - 50 % - 100 % na denní bázi po dobu 90 % kampaně
- skoková změna zatížení 20 % během deseti minut

3. SIMULACE AKTIVNÍ ZÓNY EDU3

3.1 Specifika EDU3

Výpočet na bloku elektrárny Dukovany má některá specifika daná konstrukcí reaktoru, jeho vývojem a provozem. Ty nejvýznamnější jsou následující:

Pro rychlou regulaci výkonu aktivní zóny se používají HRK (havarijní a regulační kazety). Ty jsou v reaktoru VVER 440 tvořeny spodní palivovou částí a horní absorpční částí. Palivová část HRK je prakticky shodná s palivovými kazetami, jen je nahoře osazena bajonetovým spojem, do něž se zasazuje absorpční část HRK, a obsahuje méně paliva. V horní části, která sousedí s absorpčním materiálem by totiž palivo téměř nevyhořivalo a dolní část je většinu doby provozu reaktoru vysunuta z aktivní zóny ven (když se absorpční část HRK zasouvá, spodní konec palivové části opouští aktivní zónu). Stejně jako běžné palivové kazety i palivové části HRK prošly od začátku provozu elektrárny vývojem za účelem zvýšení výkonu, účinnosti a využití potenciálu reaktoru.

V současné době se v reaktorech elektrárny Dukovany nachází několik typů palivových souborů. Jedná se zejména o soubory typu Gd-2M a Gd-2M+. Tyto typy paliva se liší hlavně množstvím uranu v souboru. To bylo možné navýšit úpravou rozměrů a tvaru palivových peletek. Podobnými úpravami prošel i vývoj palivové části regulační kazety Gd-2. Navyšování množství uranu souvisí se zvyšováním výkonu reaktoru a prodlužováním kampaně. Postupně se začíná zavážet i nový „bezobálkový“ typ souboru PK3+, to se ovšem netýká bloku 3 v sledovaném období. [31][32]

Původní délka kampaně byla přibližně 300 efektivních dní. Dnes se délka kampaně prodlužuje na přibližně 430 efektivních dní, což odpovídá 16měsíční kampani¹⁴.

3.1.1 Provoz na efektech

Během kampaně se vyhoření paliva kompenzuje ředěním kyseliny borité v chladivu primárního okruhu. Na konci kampaně, když koncentrace H_3BO_3 dosáhne praktické nuly, dojde k postupnému vytažení regulačních kazet. Ve chvíli, kdy jsou kazety zcela vytaženy, nastává konec kampaně.

V praxi však může být výhodné kampaň o něco prodloužit. Například proto, že se zpozdí přípravy odstávky nebo je z nějakého důvodu vysoká potřeba dodávky elektrické energie do sítě. Aby to bylo možné uskutečnit, provede se tzv. provoz na efektech. Efekty, které se využívají, jsou dva.

Teplotní efekt vychází ze záporného koeficientu reaktivity, který je základním bezpečnostním parametrem aktivní zóny. Znamená, že se snížením teploty chladiva se zvýší reaktivita aktivní zóny, jelikož vyšší hustota moderátoru má za následek lepší moderaci neutronů. To umožňuje další provoz na plném tepelném výkonu reaktoru.

¹⁴ V Temelíně je plán prodloužit kampaň postupně až na 18měsíční

Nevýhoda, kterou s sebou tento provoz nese, je nižší teplota sekundárního okruhu, a tím i nižší termodynamická účinnost parního cyklu [7]. Elektrický výkon bloku se tedy sníží.

Další možností je provoz na výkonovém efektu. Jedná se o stav, kdy je tepelný výkon reaktoru snížen. Tím klesá teplota paliva uvnitř palivových proutků a zpětná vazba od teplotního koeficientu reaktivity paliva uvolňuje kladnou reaktivitu¹⁵. Další uvolnění reaktivity zajistí snížení stacionární xenonové otravy, jelikož dochází k nižšímu vývinu xenonu ze štěpení.

Provoz „na efektech“ (teplotním a výkonovém) je teoreticky možný po prakticky neomezenou dobu. Fyzikálně nic nebrání snížení teploty např. na 150 °C při pouhém zlomku nominálního výkonu. Takový provoz je však ekonomicky irelevantní. V praxi je možné uvažovat o prodloužení kampaně tímto způsobem přibližně o 20 dní. Při provozu je však vždy třeba zvážit ekonomickou výhodnost takového provozu. V praxi se kampaň plánuje bez provozu na efektech, ale tato možnost se využívá jako časová rezerva pro nepředvídatelné události během přípravy odstávky.

3.2 Program MOBY-DICK

Program MOBY-DICK je autorským programem společnosti ŠKODA JS a.s. a je vyvinut za účelem výpočtů pro české reaktory VVER 440 a VVER 1000.

Základ výpočetního programu MOBY-DICK jsou dva bloky: NF-blok pro neutronově-fyzikální výpočty a TH-blok pro navazující termohydraulické výpočty.

NF-blok stojí na modulech, které řeší diferenční metodou vícegrupovou soustavu difuzních rovnic. Rovnice mají následující tvar (5).

¹⁵ Dopplerův efekt podrobněji zde [7]

$$\begin{aligned}
& -\text{div}[D^g(\vec{r}, t)\text{grad}\Phi^g(\vec{r}, t)] + [\Sigma_r^g(\vec{r}, t) + D^g(\vec{r}, t)B^{2g}(\vec{r}, t)]\Phi^g(\vec{r}, t) \\
& = \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq g}}^G \Sigma_s^{h \rightarrow g}(\vec{r}, t)\Phi^h(\vec{r}, t) + \frac{\chi^g(\vec{r}, t)}{k_{eff}}S(\vec{r}, t) + Q^g(\vec{r}, t)
\end{aligned} \tag{5}$$

$g = 1, 2, \dots, G$ je číslo grupy, G celkový počet grup¹⁶

$S(\vec{r}, t) = \sum_{h=1}^G v\Sigma_s^{h \rightarrow g}(\vec{r}, t)\Phi^h(\vec{r}, t)$ představuje štěpný zdroj

$Q^g(\vec{r}, t)$ představuje vnější zdroj dané grupy

k_{eff} je koeficient násobení a pro $Q^g(\vec{r}, t) \neq 0$ je roven 1

$D^g(\vec{r}, t)$ je difuzní koeficient

$\Sigma_r^g(\vec{r}, t)$, $\Sigma_s^{h \rightarrow g}(\vec{r}, t)$, $v\Sigma_s^{h \rightarrow g}(\vec{r}, t)$ jsou účinné průřezy

$\chi^g(\vec{r}, t)$ představuje štěpné spektrum

$\Phi^h(\vec{r}, t)$ je neutronový tok

$B^{2g}(\vec{r}, t)$ odpovídá 0 v 3D výpočtu; ve 2D výpočtu představuje buckling¹⁷

Simulaci lze provést na dvou typech sítě:

- na hexagonální síti (přesný výpočet), která rozděljuje kazetu po šestiúhelnících, které odpovídají jednotlivým palivovým proutkům. Toto řešení bylo dříve, v době vzniku programu, příliš náročné na výpočetní výkon, ale dnes v podstatě dominuje tomuto typu výpočtů.
- na trojúhelníkové síti (hrubosíťový výpočet), která rozděljuje palivovou kazetu na $6k^2$ trojúhelníkových elementů. Výběrem stupně dělení k ovlivníme přesnost výpočtu:

k	1	2	3	4	5
$6k^2$	6	24	54	96	150

V praxi nedává smysl používat $k > 4$, jelikož počet proutků v kazetě je 127, takže rozdělení na trojúhelníkové elementy by oproti síti dělené po jednotlivých proutcích by bylo jednak neefektivní z hlediska výpočetního času a jednak by postrádalo fyzikální význam. Dnes už použití tohoto typu výpočetní sítě ztrácí na významu.

Vertikální rozdělení aktivní zóny je realizováno prakticky 42 dělicími body. Tento počet je dán omezením vyplývajícím z použité knihovny programu.

Počet grup neutronů je klasicky 2 nebo 4. Program využívá symetrii zóny: rotační 120° , 60° nebo zrcadlovou 30° , 60° , nebo plnou zónu.

3.2.1 Vstupní soubor

Název vstupního souboru je ve tvaru **f3c00**. Písmeno **f** představuje typ výpočtu v hexagonální síti (přesné). Číslo **3** odkazuje na číslo bloku, v tomto případě EDU3. Číslo

¹⁶ Písmeno g v horním indexu nepředstavuje v rovnici exponent, nýbrž označení grupy

¹⁷ Buckling je parametr aktivní zóny, který souvisí s její geometrií, rozměry a materiály. Pro podrobnější informace viz [7]

c00 udává pořadí kampaně (c01 - c36).

První část souboru udává požadované výstupy **RESULTS**, vstupní data výpočtu a typ výpočtu **finemesh**:

```
TRAP      GOARCHIVED
RESULTS   B
RESULTS   POWER-2D
RESULTS   BURN-2D
RESULTS   BURN-UP
#
WDDU2022  CONS042
WSDU2022
finemesh
#
```

Další část udává výchozí parametry simulace:

```
DB3C35ST XC DB3C34EX 1P- 06 150.07 150.TI 220.0CB 8.000PN 1444.-
CY 35QM 8506.
```

První slova říkají, že počáteční stav simulace 35. kampaně (**DB3C35ST**) je stejný, jako koncový stav simulace 34. kampaně (**DB3C34EX**). Parametr **X** nám sděluje, že výpočet je prováděn pro nestacionární koncentraci jedů (**Xe** a **Sm**) a následně **C** určuje kritický parametr, který se dopočítává - koncentraci kyseliny borité (alternativně např. **R** pro dopočet polohy HRK6). Dále je zadána výchozí poloha **06** a **07** skupiny¹⁸ HRK v centimetrech ode dna aktivní zóny (250 pro úplné vytažení). Parametr **TI** udává vstupní teplotu chladicí vody (°C), **CB** předpokládanou¹⁹ koncentraci H_3BO_3 (g/kg), **PN** jmenovitý tepelný výkon (MW) a **QM** jmenovitý průtok chladicí vody (m^3/s). **CY** je číslo cyklu (kampaně).

Následuje část, která popisuje změnu topologie - překládku paliva, zavážení nových kazet a rotaci. Rotace kazet přispívá rovnoměrnějšímu vyhoření jednotlivých proutků. Zavážecí stroj není ale rotace technicky schopen, proto se provádí zavezením kazety z jiné šestiny symetrické AZ [32]. První soubor pro první kampaň obsahuje detailní rozložení celé zóny:

¹⁸ Provozně je 6. a 7. skupina HRK spojená a pohybuje se zároveň. Do 7. skupiny je kvůli uvažování symetrie zóny zařazena pouze centrální HRK a rozdělení v programu MOBY-DICK je čistě formální.

¹⁹ Pro dopočet kritického parametru **C** se jedná o výchozí bod iterace

```

HEIGHT-R          249.900 42
NO REFL.
CORE MAP TROT.   60
2001  1002  2003  2004  1005  1006  2007  2008  3009  2010
      2011  1020  2028  2035  2042  1048  1053  3057  3059
      1012  2021  1029  1036  2043  2049  3054  3058
      2013  1022  2030  1037  1044  1050  3055
      2014  1023  1031  2038  2045  3051  3056
      2015  2024  1032  2039  2046  3052
      1016  2025  1033  3040  3047
      1017  3026  3034  3041
      3018  3027
      3019

*
RCCG MAP T      7
7 0 0 5 0 0 6 0 0 1
 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 0 0 2 0 0 4 0
 0 0 0 0 0 0 0
 0 0 0 0 0 0
 0 0 3 0 0
 0 0 0 0
 0 0
 0

```

Obrázek 3: Výchozí uspořádání palivových kazet a regulačních orgánů, 1. kampaň

Soubory pro další kampaně už obsahují jen změny v uspořádání:

```

R. SCHEME B
CHANGE 6401 1
CHANGE 6310 10
CHANGE 6709 9 8 2
CHANGE 6711 11 24 18 47
CHANGE 6713 13 19
CHANGE 6717 17 3 5 21 43 57 52
CHANGE 6726 26 16 12
CHANGE 6728 28 59
CHANGE 6730 30
CHANGE 6732 32 22 34 41
CHANGE 6739 39 15 23 14 31 40 58
CHANGE 6744 44 29 55 56
CHANGE 6745 45 42 36 35 37 51 27
CHANGE 6753 53 6 46
CHANGE 6754 54 48 20
ROTAT. 3 3 12 20 15 40 42 46 51
ROTAT. 3 19 27 34 41 47 52 55 56 58 59
ROTAT. 1 1
INVENT 64016950
INVENT 63106933
ASSEMBLY
SUP43TTU 670967116713671767266728673267396744674567536754
SUR380WA 64016310
SUR42RUI 6730
DB3C22EX 1
6950
DB3C23EX 1
6933

```

Obrázek 4: Příklad vstupního souboru: změny v uspořádání palivových souborů oproti předchozí kampani, kampaň 28

První označený řádek zadává změnu na pozici HRK. U HRK se mění pouze palivová část kazety, která je s absorpční částí spojena bajonetovým spojem.

Druhý označený řádek stanovuje změnu palivové kazety. Konkrétně znamená umístění kazety číslo **6709** na pozici **09**, přesun kazety z pozice **09** na pozici **08** a kazety z pozice **08** na pozici **02**. Poslední kazeta v řadě putuje do bazénu použitého paliva a v této kampani nebude použita.

Klíčové slovo **ROTAT.** uvádí pozice, na nichž dojde k rotaci kazet. První číslo na řádku uvádí stupeň rotace, v tomto případě $3 \equiv 180^\circ$ [32].

Příkaz **INVENT** slouží k zavezení kazety z bazénu použitého paliva zpět do aktivní zóny pod novým číslem, v tomto případě z **6950** na **6401**. Je to kvůli určení stáří kazety, které se odvozuje z názvu [31]. Více viz dále.

Oddíl **ASSEMBLY** určuje materiál jednotlivých kazet. Zde konkrétně materiál **SUR380WA** označuje kazety **6401** a **6310** jako typ „regulační zirkoniová tenká“ s průměrným obohacením 3,8 % [31].

Poslední označený příkaz načítá kazetu číslo **6950** z konce kampaně 22. Jedná se tak o využití kazety, která už byla umístěna do bazénu použitého paliva, ale ještě může posloužit (Zde je speciální případ, protože na pozici **01** je jediná kazeta, ale na všech ostatních pozicích je kvůli šestinové symetrii kazet šest. Proto může být kazeta z konce 22. kampaně použita ve 23. i 28. kampani.).

Po tomto bloku následuje popis kroků simulace kampaně:

```
DB3C3501 XC DB3C35ST MP- PW -100.TI 267.106 214.07 214.
TI-STEPS F 4 2. 3 4. 2 10.
#
DB3C3501 XC DB3C3501 MP-
TI-STEPS F 50 10.
#
DB3C35S1 XC DB3C3501 MP- 06 225.07 225.
TI-STEPS F 3 10.
#
DB3C35S2 XC DB3C35S1 MP- 06 250.07 250.
TI-STEPS F 3 10.
#
DB3C35P1 X DB3C35S2 MP- TI 262.
TI-STEPS F 1 -433.
#
DB3C35EX X DB3C35P1 MP- PW
TI-STEPS 1 45.
#
STOP
```

Obrázek 5: Zadání kroků výpočtu, kampaň 35

Zde je syntaxe parametrů výpočtu stejná jako u zadávání výchozího stavu výše. **MP-**mapové podklady se přebírají z referenční varianty, **PW -100.** tepelný výkon reaktoru je 100 %²⁰, **TI 267.1** vstupní teplota chladiva je 267,1 °C, polohy HRK skupiny **06** a **07** jsou **214** cm.

Druhý řádek určuje jednotku výpočtu jako **F** - effective full power day (efektivní den). Následně předepisuje počet a délku jednotlivých kroků výpočtu: **4** kroky po **2** efektivních dnech, **3** kroky po **4** a **2** kroky po **10** efektivních dnech.

Následující blok probíhá podobně, přičemž neuvedené parametry se převezmou z předchozího výpočtu. Lze upozorovat, že zde uvedených **50** kroků po **10** efektivních dnech dalece překračuje délku kampaně. Klíčový výraz **TI-STEPS** určuje, že výpočet se

²⁰ Mínus se chápe jako zadávání v % nominálního tepelného výkonu. Alternativně lze psát výkon v MWt, např **1444**.

provede jen do konce cyklu - kritický parametr (C) je roven nule. Když k tomu dojde, změní se výpočtově stav na následující řádek.

Zde dochází k posunu HRK **06** a **07** do polohy **225** cm. Tím dochází k vnesení kladné reaktivity a pro $k_{eff} = 1$ se vypočítá nová hodnota $c_B \neq 0$. Následuje další krok výpočtu, kdy se s vyhořením c_B opět snižuje až je opět rovna nule.

Postup se opakuje s vytažením HRK **06** a **07** do horní koncové polohy **250** cm.²¹

Následuje provoz na teplotním efektu, což je zadáno jako snížení vstupní teploty chladiva **TI** na **262** °C²².

Po ukončení kampaně probíhá ještě jeden krok výpočtu: **45** dní na nulovém výkonu. Je to z důvodu rozpadu xenonu a přeměny promethia na samarium. Konečný výstupní soubor totiž z pravidla slouží jako vstupní soubor simulace další kampaně, je proto nutné, aby byla k dispozici co možná odpovídající data.

3.2.2 Simulace do současnosti

Pomocí postupných výsledků simulací a informací o provozu reaktoru je možné nasimulovat stav reaktoru po celou dobu provozu až do současnosti. To je důležité, protože stav jednotlivých kazet, jejich vyhoření, izotopické složení a další parametry se s každou kampaní mění a praxe ukázala, že vliv předchozích kampaní nelze zanedbat a nahradit pouze parametricky zadaným stavem. Proto je třeba provést pro úplnost vstupních dat kampaně celou simulaci od první vsázky.

Na EDU3 dobíhá v současné době²³ 35. kampaň jejíž délka je přibližně 430 efektivních dní.

3.2.3 Výstupní soubory

Možných výstupních souborů z programu MOBY-DICK je mnoho a lze si je vybrat a upravit v pomocném souboru **FILESDM.CONF**, ale základním a nejlépe srozumitelným souborem je soubor s názvem **AAA.T.f3c35**. V tomto souboru se nachází přehledová tabulka:

²¹ V praxi se na konci kampaně vytahují HRK současně se snižováním c_B . Popsané skokové změny jsou aproximací programu, který nedokáže iterovat na polohu HRK a nezanáší významnou chybu. Přesto je třeba mít na paměti, že tento postup neodpovídá skutečné obsluze reaktoru.

²² Viz 3.1.1

²³ Leden 2024

FUNDAMENTAL CORE CHARACTERISTICS TABLE										
PROGRAMME : mds564v16o7		LIBRARY : WDDU2022 WSDU2022 .FAsCONS042								
VARIANT	CORE	INSERT. [CM] OF				CRITICALITY	POWER DISTRIBUTION		CHARACTERISTICS	
SPECIFIC.:	PARAMETERS :	CONT. ELEM. GROUP:				PARAMETERS:	ASS./CORE FACTORS:		CHANNEL FACTORS:	
NAME	POWER [MW]	1	2	3	4	KEFF	KQ(INTEG. PEAK F.)		CQ(INTEG. PEAK F.)	
NUMBER	T-INPUT [C]	5	6	7	8	RO-RO(θ) [%]	KV(VOLUME PEAK F.)		CV(VOLUME PEAK F.)	
TIME [DAYS]	FLOW A. [KG/S]	9	10	11	12	H3BO3 [G/KG]	KZ (AXIAL PEAK F.)		DNBR MINIMUM	
TIME [EFPD]	PRESS. [MPA]	13	14	15	16	MFXS	AO (AXIAL OFFSET)		DNBR POSITION	
	TF-av. [K]						AO [%] POW-top POW-bot. [%]			
DB3C35ST	1.0000E-06	244	244	244	244	1.0000089	1.5598(6438/---)		1.7163(6438/ 63/---)	
1	220.0	244	143	143	250	0.0008856	2.2483(6443/017)		2.4906(6443/ 44/017)	
0.0000 H	8506.0	250	250	250	250	11.0886	1.4446(---/017)		9.9990	
0.0000	12.30	250	250	250	250	++++	-0.1864		0/000	
	493.16						-18.64 40.68 59.32			
DB3C3501	1.4440E+03	244	244	244	244	0.9999916	1.5025(6435/---)		1.6176(6414/ 84/---)	
1	267.1	244	208	208	250	-0.0008374	1.8956(6435/018)		2.0648(6443/ 33/017)	
0.0000 H	8506.0	250	250	250	250	9.2819	1.2612(---/018)		2.6676	
0.0000	12.30	250	250	250	250	++++	-0.0706		6414/031	
	827.16						-7.06 46.47 53.53			

Obrázek 6: Výstupní soubor AAA.T.f3c35

V souboru je souhrnný výsledek pro každý krok simulace, zde příklad dvou prvních kroků v čase nula: s nulovým výkonem a s plným výkonem. Neuvažují se zde přechodové jevy spojené se spouštěním reaktoru. Zvýrazněné jsou hodnoty, které jsou podstatné pro uvažovaný případ: čas simulace v hodinách (H) případně ve dnech (D) a v efektivních dnech, výkon reaktoru v MWt, teplota vstupní vody (°C), poloha HRK6 (skupina 06 a 07), koncentrace H₃BO₃ (g/kg) a maximální relativní výkon proutku zde značený CQ, v provozu označovaný jako K_r.

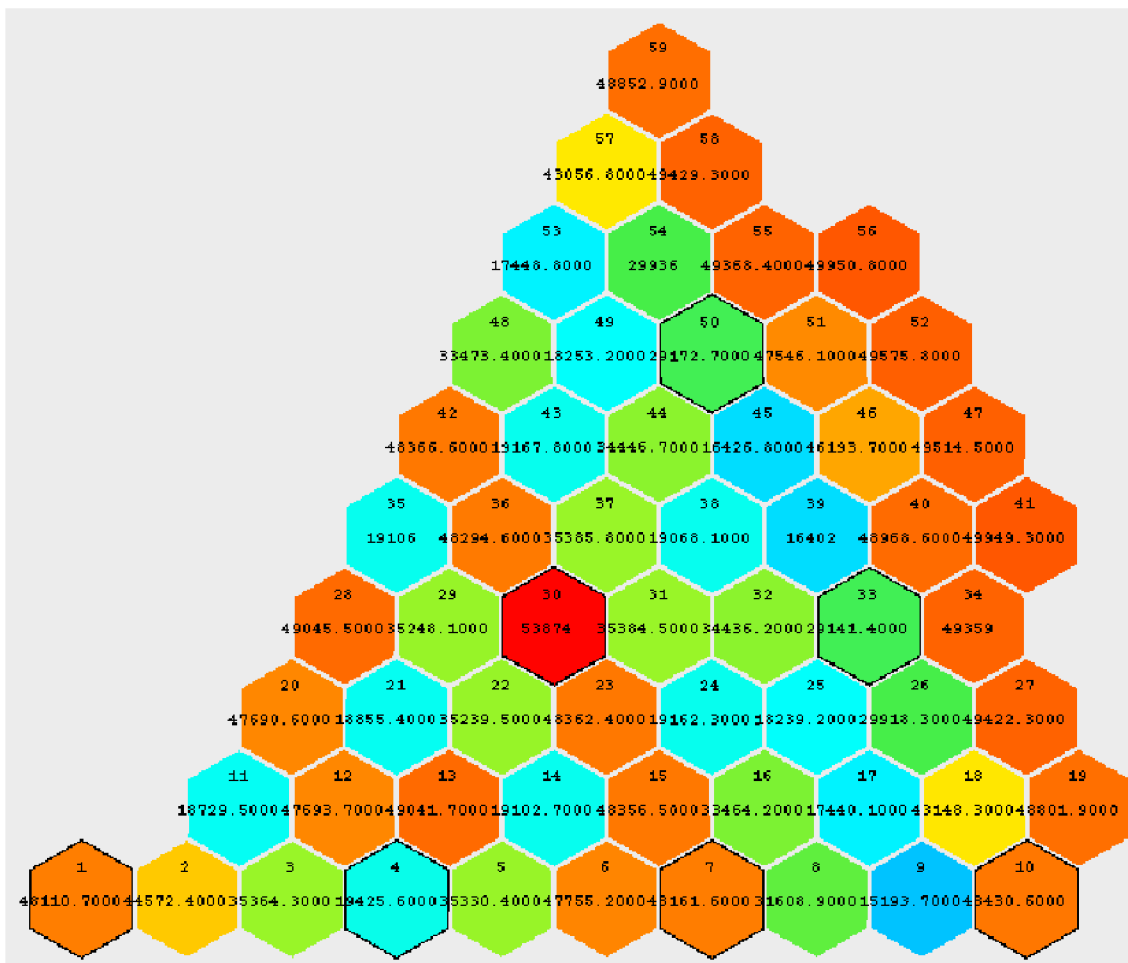
Kompaktnější zápis parametrů, který je vhodnější pro strojové zpracování, nabízí soubor a1tT.f3c35, kde jsou jednotlivé kroky zapsány na řádcích:

count	NAMEV	GEN	Trea[d]	Teff[d]	POW[MW]	RO[%]	CB[g/kg]	Kq	Kv	Cq	Cv	averBU	fh06	sh06
1	DB3C35ST	1	0.0000000E+00	0.0000000E+00	1.0000E-06	0.0008856	11.0886	1.5598	2.2483	1.7163	2.4906	23318.0	142.800	148.850
2	DB3C3501	1	0.0000000E+00	0.0000000E+00	1.4440E+03	-0.0008374	9.2819	1.5025	1.8956	1.6176	2.0648	23318.0	208.250	214.300
3	DB3C3501	2	2.0000000E+00	2.0000000E+00	1.4440E+03	-0.0008337	6.8688	1.4894	1.8354	1.6009	1.9924	23379.4	208.250	214.300
4	DB3C3501	3	4.0000000E+00	4.0000000E+00	1.4440E+03	0.0009015	6.8491	1.4902	1.8404	1.6014	1.9919	23440.7	208.250	214.300
5	DB3C3501	4	6.0000000E+00	6.0000000E+00	1.4440E+03	0.0007119	6.8493	1.4904	1.8408	1.6007	1.9906	23502.1	208.250	214.300
6	DB3C3501	5	8.0000000E+00	8.0000000E+00	1.4440E+03	-0.0006022	6.7997	1.4889	1.8321	1.5986	1.9801	23563.4	208.250	214.300
7	DB3C3501	6	1.2000000E+01	1.2000000E+01	1.4440E+03	0.0007691	6.7153	1.4883	1.8286	1.5965	1.9749	23686.2	208.250	214.300
8	DB3C3501	7	1.5000000E+01	1.5000000E+01	1.4440E+03	0.0007213	6.5303	1.4857	1.8105	1.5925	1.9651	23808.0	208.250	214.300

Obrázek 7: Výstupní soubor a1tT.f3c35

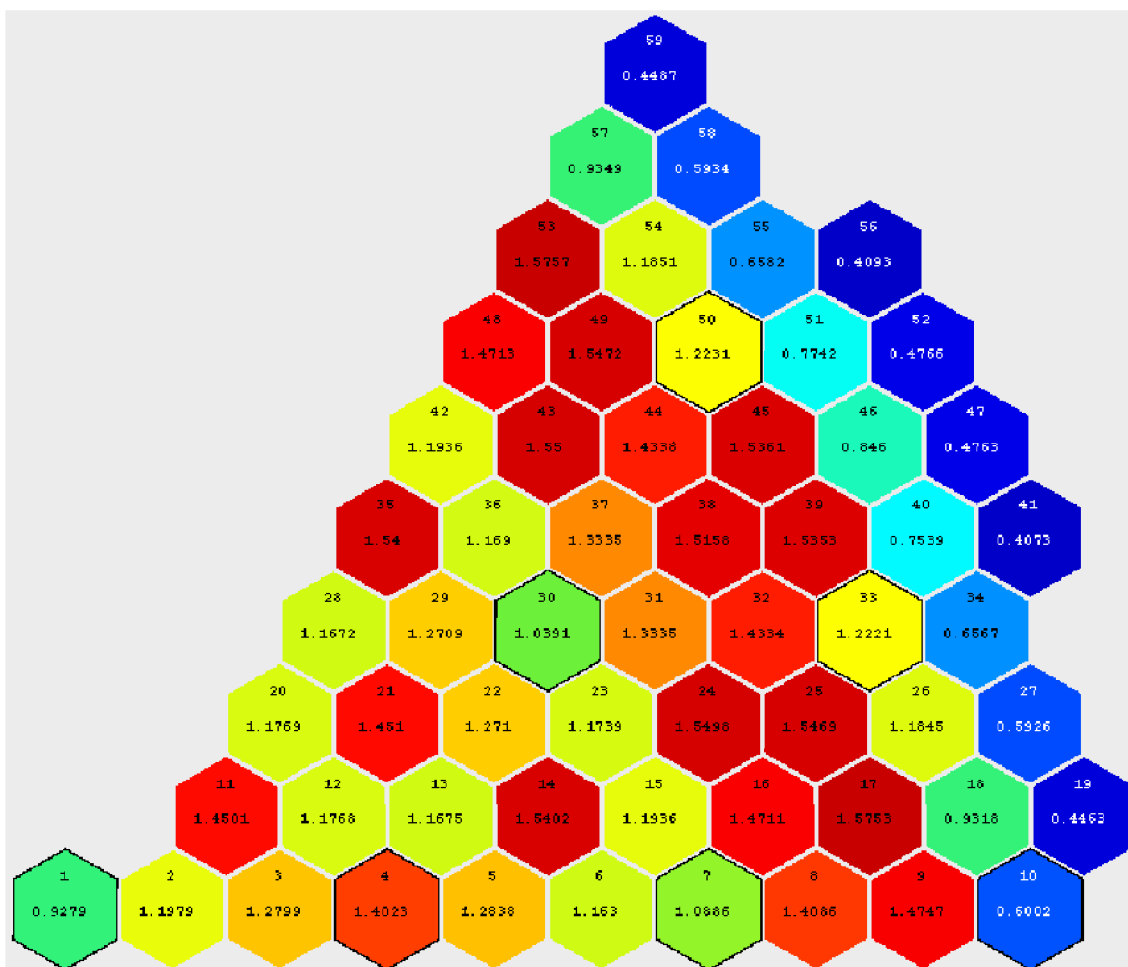
Zde je důležité uvést rozdíl mezi posledními dvěma sloupci. Oba zaznamenávají polohu HRK ode dna aktivní zóny, ale každá hodnota se počítá jinak, v důsledku čehož se hodnoty liší o 6,05 cm. Palivová část regulačních kazet je totiž o něco kratší než u palivových kazet (viz 3.1). Plně vytažená HRK má tedy polohu fh06 243.95 cm a sh06 250.00 cm. Pro přehlednost a srozumitelnost je nadále za polohu HRK považována druhá uvedená hodnota, tedy poslední sloupec souboru (Obrázek 7).

Dalším důležitým souborem je a1tB.f3c35, soubor, který zaznamenává vyhoření jednotlivých kazet během cyklu. Zobrazení souboru je přehlednější pomocí programu Mapview.



Obrázek 8: Vyhoření jednotlivých kazet (MWd/tU) na konci 35. kampaně, vytvořeno pomocí Mapview

Podobně soubor **a1tm.f3c35** obsahuje mapu kazet pro každý krok výpočtu. Mimo jiné obsahuje informace o označení a materiálu kazety, vyhoření, relativním výkonu, nejvyšším relativním výkonu proutku a poloze maxima výkonu v kazetě (horizontální i vertikální).



Obrázek 9: Maximální relativní výkon proutku v kazetě, 35. kampaň, zobrazeno pomocí Mapview

4. NÁVRH SCÉNÁŘŮ REGULACE VÝKONU EDU3

Elektrárna Dukovany je uzpůsobena k poskytování flexibility²⁴, přestože vzhledem k ekonomice provozu pracuje v základním zatížení. Schopností reaktorů je rychlost regulace 1 % za minutu v rozmezí 80 % až 100 % výkonu, nicméně na základě dohody s ČEPS byla tato hodnota snížena na 2 MW/min na jeden blok. Další služby, kterých jsou dukovanské reaktory schopny jsou snížení výkonu o 90 MW rychlostí 5 MW za minutu, snížení výkonu o 250 MW rychlostí 2,5 MW (odpovídá 0,5 % nominálního výkonu) za minutu s následnou dobou stabilizace (méně než 24 hodin). [30]

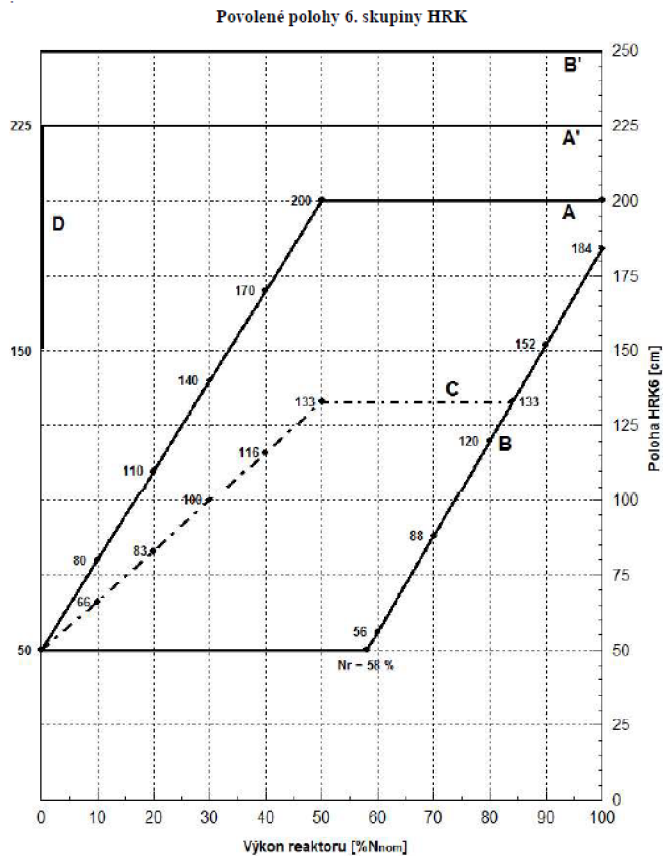
4.1 Limity a omezení

Konkrétní hodnoty, kterých je možné během provozu dosahovat jsou omezeny Limitami a Podmínkami bezpečného provozu, provozním dokumentem reaktoru, podle kterého se musí provoz reaktoru řídit a který zajišťuje, že nedojde k překročení bezpečnostních limit, zejména limitních parametrů daných výrobcem paliva. Tento dokument stanovuje mimo jiné provozní meze rozebrané v této kapitole. V případech, kdy se hodnoty liší podle typu paliva se uvažuje nejcitlivější palivo v reaktoru, což je v našem případě typ Gd-2M+ [33].

4.1.1 Limitní poloha HRK6

Krajní polohu HRK6 je třeba omezit, protože příliš vysunuté regulační orgány by měly za následek malou kontrolu nad probíhající reakcí a pomalý vnos záporné reaktivity v případě havarijního odstavení. Příliš zasunuté regulační orgány by měly zase za následek deformaci výkonu v aktivní zóně, zvýšení nerovnoměrnosti distribuce výkonu a suboptimální vyhořívání paliva. Při nižších výkonech nabývá na důležitosti ještě bezpečnostní efekt. Příliš zasunuté kazety (pod 50 cm) by znamenaly, že změna jejich polohy má malou váhu, tedy malý vliv na výkon reaktoru. V takovém případě by bylo řízení pomalejší a těžkopádné, čímž by se snížila bezpečnost. Z těchto důvodů je poloha HRK6 částečně závislá i na výkonu reaktoru:

²⁴ Pro srovnání: elektrárna Temelín není navržena s úmyslem poskytování flexibility. Službou, kterou poskytuje provozovateli přenosové soustavy, je nicméně schopnost snížení výkonu bloku až o 850 MW na cca 240 MW za účelem zabránění stavu nouze pomocí vyfukování ostré páry do kondenzátoru, čímž se omezí výkon turbíny, při zachování tepelného výkonu reaktoru.



Obrázek 10: Povolené polohy HRK6, převzato z [33]

Pro uvažovaný případ je relevantní rozmezí:

„B-B‘: Pásmo dovolených poloh pro ...

2 - blok v pohotovosti pro zařazení do režimu regulace činného výkonu

3 - blok je připravován pro plánované zvýšení nebo snížení výkonu“ [33]

Regulační kazety tedy mohou dosahovat i horní koncové polohy a v závislosti na výkonu nesmí jejich poloha klesnout pod křivku **B**.

Vyčtení polohy HRK6 pro každý vypočtený krok z výstupních souborů programu MOBY-DICK je možné např. ze souboru

4.1.2 Koeficient nerovnoměrnosti výkonu

Radiální koeficient nerovnoměrnosti vývinu energie v palivových proutcích K_r musí splňovat následující limity (pro stav, kdy je v provozu všech 6 hlavních cirkulačních čerpadel (HCČ)):

$$K_r \leq 1,61 \text{ pro kazety Gd-2, Gd-2M a HRK Gd-2M, Gd-2+}$$

Koeficient K_r se vypočítá jako $\frac{\text{výkon nejzatíženějšího proutku}}{\text{průměrný výkon proutku v celé AZ}}$.

Ve skutečnosti je parametr K_r závislý na výkonu reaktoru podle rovnice [33]:

$$K_r \leq F_s \cdot K_r^{lim} \cdot \left(1 + \alpha \left(1 - \frac{N_R}{N_{dov}}\right)\right) \equiv K_r^{lim} \cdot \left(2 - \frac{N_R}{100}\right) \quad (6)$$

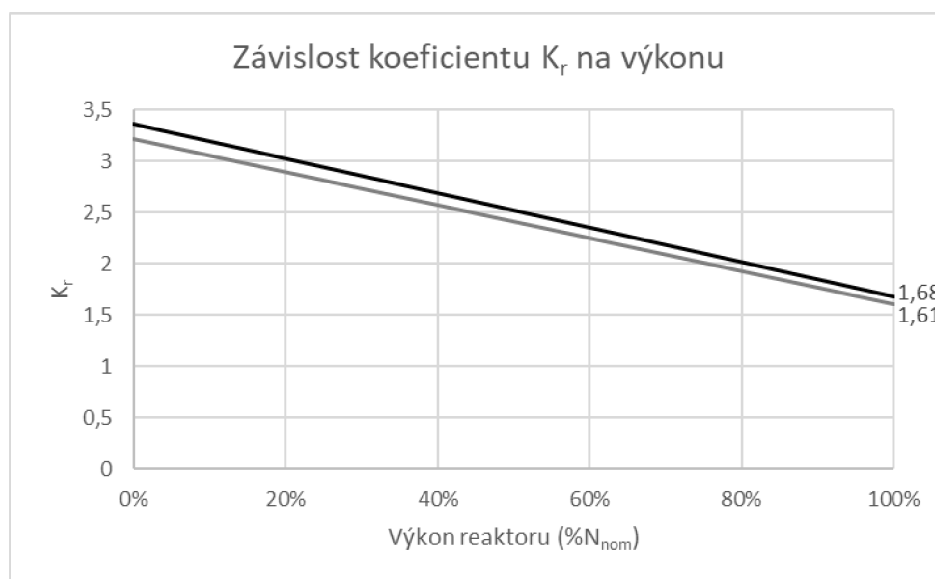
K_r^{lim} je limitní hodnota K_r (1,68 respektive 1,61)

$\alpha = 1$ je parametr sklonu přímky

N_{dov} je dovolený maximální výkon, $N_{dov} = 100\%$ pro všechna HCČ v provozu

N_R je okamžitý výkon reaktoru (%)

F_s je parametr závislý na počtu HCČ v provozu (pro 6 HCČ $F_s = 1$)

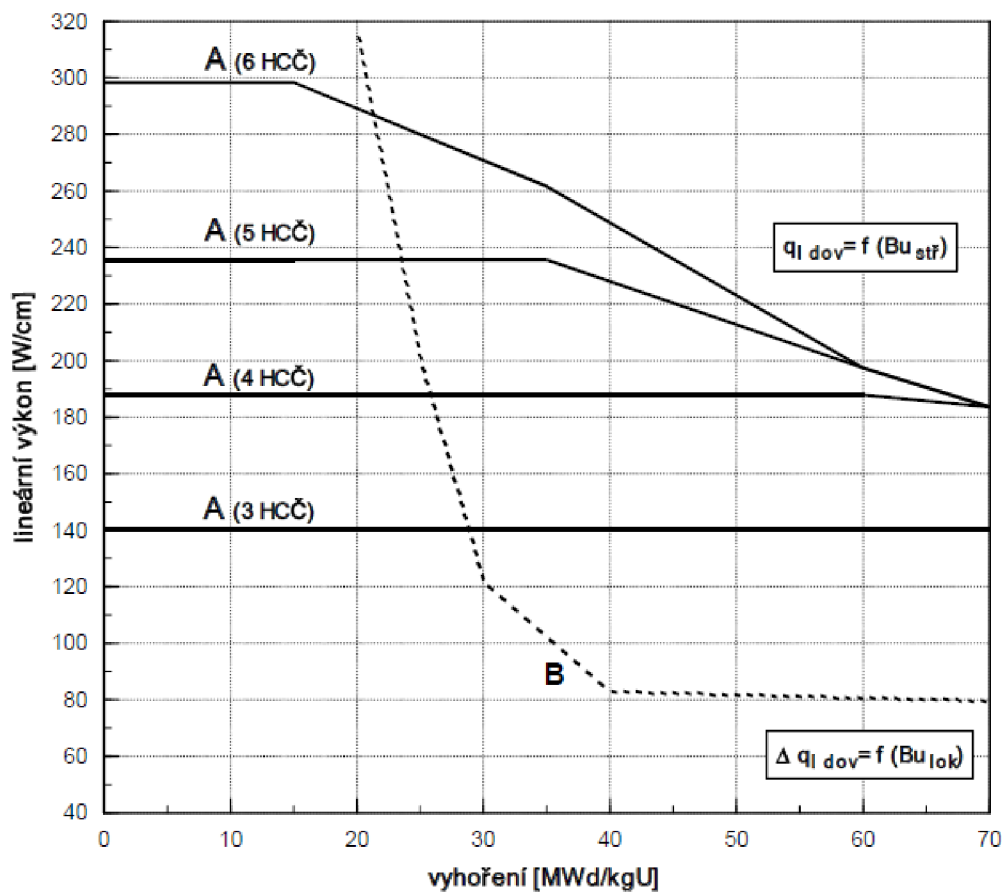


Obrázek 11: Závislost koeficientu K_r na výkonu

Fyzikálně je tato závislost odvozená od maximálního výkonu proutku (lineárního výkonu). Proto je při nižších výkonech povolena větší nerovnoměrnost výkonu, větší nerovnoměrnost totiž neznámá vyšší lineární výkon proutku. Teoreticky by tak závislost měla být hyperbolická a s klesajícím výkonem jít k nekonečnu. Z provozního hlediska ale taková charakteristika nedává smysl, protože k tak velké nerovnoměrnosti při návrhu reálných vsázek nedochází.

4.1.3 Lineární výkon

Lineární výkon palivových proutků je omezen při výkonu pod 50 % nominálního výkonu reaktoru na 325 W/cm, nad 50 % N_{nom} musí být tento parametr pro každý proutek menší než dovolená hodnota $q_l \leq q_{dov}$. Toto omezení je závislé mimo jiné na vyhoření proutku:



Legenda:

- $Bu_{stř}$ střední vyhoření palivového proutku
- Bu_{lok} lokální vyhoření v palivu
- $q_{l\ do v}$ limitní hodnota lineárního výkonu palivového proutku
- $\Delta q_{l\ do v}$ limitní hodnota lokálního nárůstu lineárního výkonu palivového proutku

Obrázek 12: Závislost lineárního výkonu $q_{l\ do v}$ a $\Delta q_{l\ do v}$ na vyhoření, převzato z [33]

Podobně je zadána limitní hodnota pro skokovou změnu výkonu $\Delta q_l \leq \Delta q_{l\ do v}$ při přechodových procesech. [33]

4.1.4 Další parametry

Výčet některých dalších parametrů, jejichž hodnoty jsou omezeny:

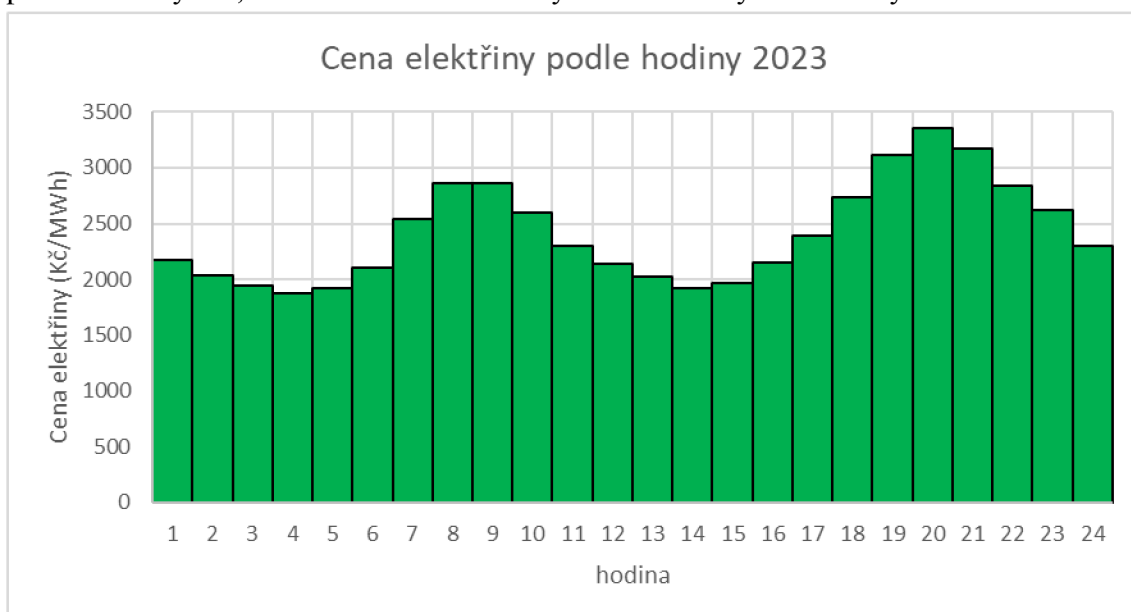
- Bezpečnostní zásoba podkritičnosti $BZP \geq 2\% \Delta k/k$. Tento parametr udává schopnost reaktoru v každém okamžiku rychle zastavit řetězovou štěpnou reakci při zaseknutí bezpečnostního orgánu s největší vahou.
- Teplotní koeficient reaktivity od teploty moderátoru musí být záporný.
- Celkový teplotní koeficient reaktivity od teploty moderátoru a paliva musí být záporný.
- Vstupní teplota chladiva do reaktoru musí být ≤ 270 °C.
- Rezerva do varu ≥ 25 °C, počítá se z ustáleného tlaku a teploty chladiva na výstupu z reaktoru.

Zmíněné bezpečnostní limity rozhodně nejsou úplným výčtem parametrů, které je třeba při provozu sledovat a jejichž hodnota nesmí překročit stanovenou mez. Jedná se spíše o přehled těch parametrů reaktoru, které mohou být nejspíše ovlivněny častými a rychlými změnami výkonu [33].

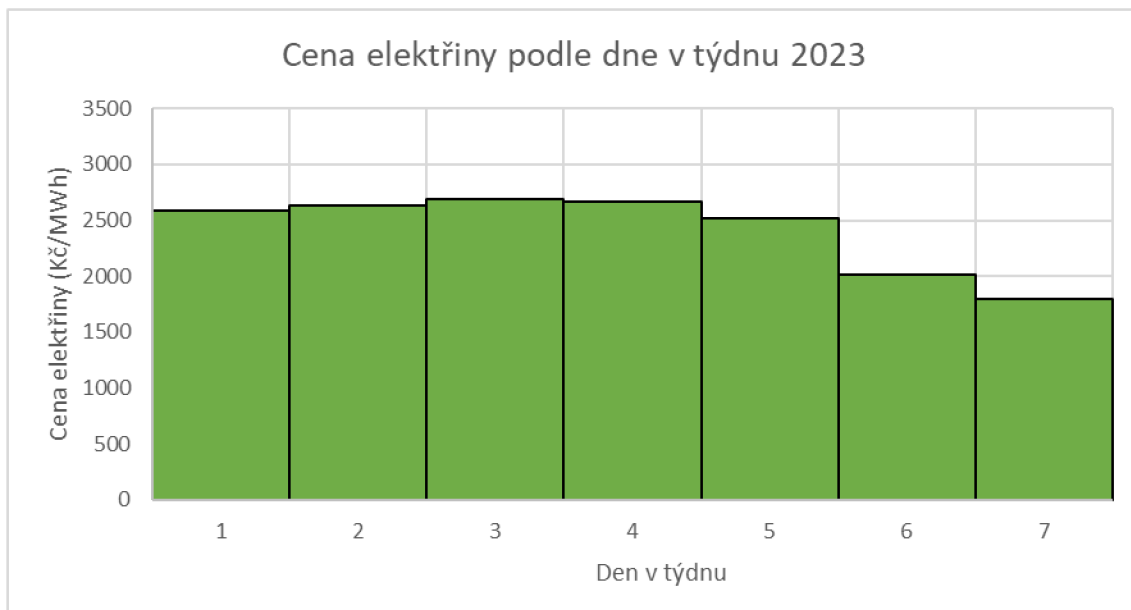
4.2 Myšlenkový základ scénářů

4.2.1 Ekonomický základ

Návrh schématu flexibility závisí nejen na schopnostech bloku, ale především na poptávce sítě. Poptávku tvoří nejen nárůst spotřeby, ale také pokles výroby. Celkový diagram poptávané elektřiny bude tedy složen jednak z diagramu spotřeby, jednak z diagramu výroby obnovitelných zdrojů, kterých bude v síti přibývat [18]. Souhrnnou potřebu energie lze nejnázne vyjádřit cenou na trhu. Pro provoz jaderné elektrárny je stěžejní poptávka po elektrické energii plánovaná v předstihu, což v intencích obnovitelných zdrojů znamená cenu na denním trhu (day-ahead). V dlouhodobých kontraktech by nebylo možné zohlednit výrobu OZE, které by měly jaderné elektrárny doplňovat. Zde je uvedena průměrná cena elektřiny za rok 2023 podle denní hodiny a podle dne v týdnu, ze které tvorba navržených scénářů myšlenkově vychází:



Obrázek 13: Průměrná cena elektřiny na denním trhu v ČR po hodinách za rok 2023, data z [34]



Obrázek 14: Průměrná cena elektřiny day-ahead v ČR po dnech v týdnu za rok 2023, data z [32]

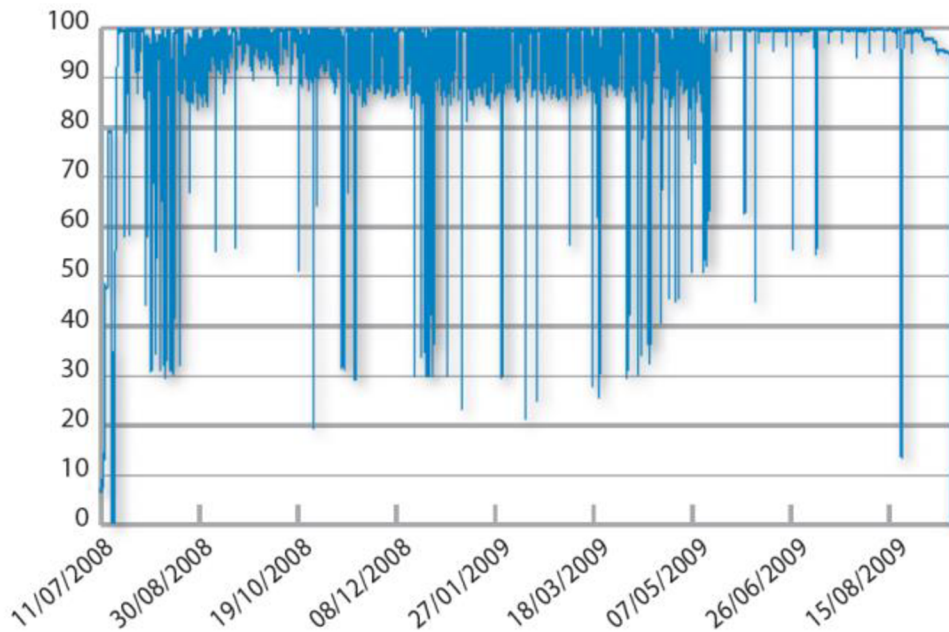
Toto vyjádření potřeby energie je třeba brát pouze orientačně, ale lze je využít jako výchozí bod pro tvorbu schémat flexibility. Do budoucna bude pravděpodobně v elektrizační soustavě daleko větší procento obnovitelných zdrojů (v ČR se jedná především o fotovoltaické výroby), proto se předpokládá, že rozdíly mezi dobou, kdy tyto zdroje vyrábí a kdy nikoli, budou ještě výraznější. Rozdíly na týdenní bázi souvisí se spotřebou, tudíž zejména s elektrifikací průmyslu. [18]

4.2.2 Historický základ

Při návrhu scénářů flexibility se lze opřít o historické zkušenosti s jadernými bloky, které tyto služby poskytovaly. Ze specifikace jednotlivých reaktorů známe limitní schopnosti reaktoru, které deklaruje výrobce. Historická data o provozu reaktorů jsou však užitečná proto, že zohledňují skutečné technologické možnosti postavených bloků, potřeby sítě²⁵ a do jisté míry i ekonomickou stránku procesu.

Dobrym příkladem je jistě Francie. Podle EdF vypadá roční průběh výkonu na jednom bloku zapojeném do poskytování flexibility následovně [1][21].

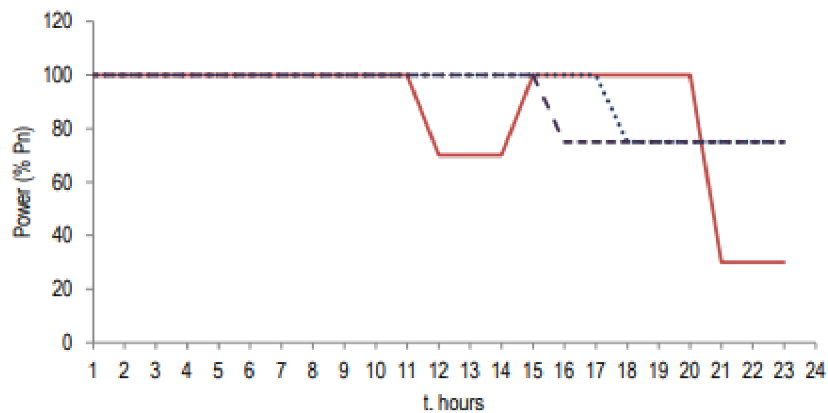
²⁵ Je třeba mít na paměti, že síť a její potřeby se stále mění a historické zkušenosti tedy nemusí být beze změny uplatnitelné na dnešní situaci. Jedná se ale o dobrý výchozí bod.



Courtesy of Électricité de France (EDF).

Obrázek 15: Roční průběh výkonu bloku (v % N_{nom}) zapojeného do poskytování flexibility, EDF, převzato z [21]

Jeden denní cyklus flexibility potom může vypadat následovně:



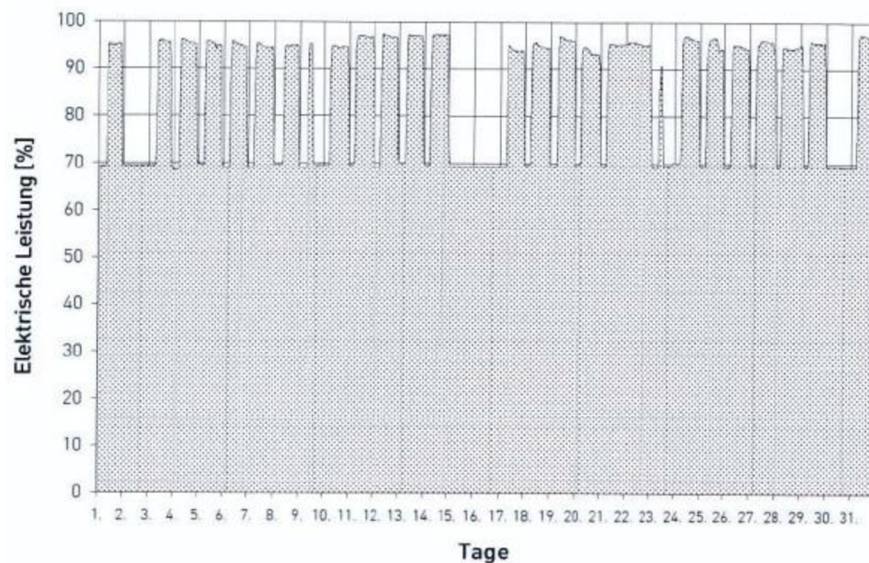
Obrázek 16: Příklad změny výkonu bloku během 24 h, převzato z [1]

Podobně si lze udělat představu o praxi výkonové flexibility z německých jaderných elektráren. Zkušenosti z Německa jsou pro Českou republiku obzvláště přínosné, protože v roce 2009 byl energetický mix v Německu relativně podobný skladbě zdrojů v ČR dnes²⁶ [22][23]. Skladba zdrojů dnes v celé Evropě sice vypadá poněkud jinak, takže tuto

²⁶ Srovnání skladby zdrojů elektrické energie Německa v roce 2009 a ČR v roce 2023:

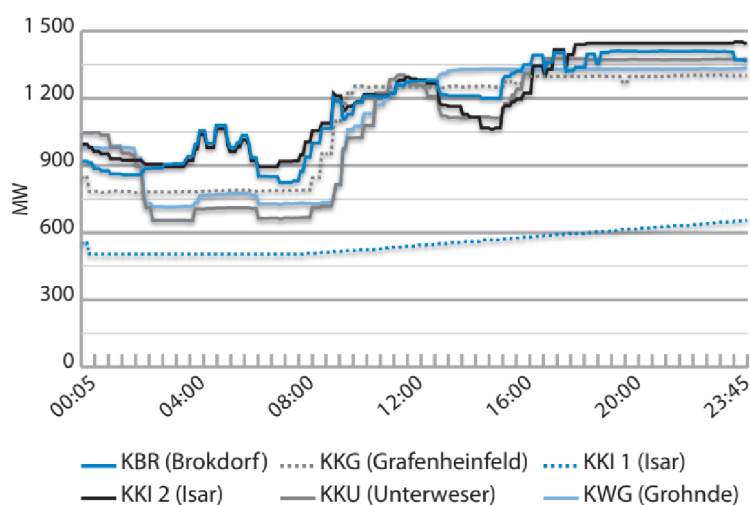
	Jádro	Uhlí	Plyn	OZE
Německo 2009	23 %	47 %	14 %	16 %
ČR 2023	40 %	38 %	5 %	17 %

paralelu nelze brát zcela jako směrodatnou, srovnání však ob stojí lépe než například srovnání s Francií, která měla v roce 2009 podíl jaderných zdrojů kolem 80 %.



Obrázek 17: Průběh výkonu (v % N_{nom}) v JE Philippsburg 1 (BWR 926 MW) v srpnu 2009, převzato z [21]

Následující graf (Obrázek 18) ukazuje řízení výkonu jaderných elektráren v Německu během výskytu záporných cen na trhu.



Courtesy of E.ON Kernkraft.

Obrázek 18: Příklad poskytování flexibility v některých Německých jaderných elektrárnách během jednoho dne, převzato z [21]

Ze zmíněných příkladů lze vyvodit, že denní změny výkonu jsou nejčastěji v rozmezí od 100 % do 85 % až 70 % a ve výjimečných situacích nebo ve víkendovém provozu se výkon snižuje na 30 % až 50 % nominálního výkonu.

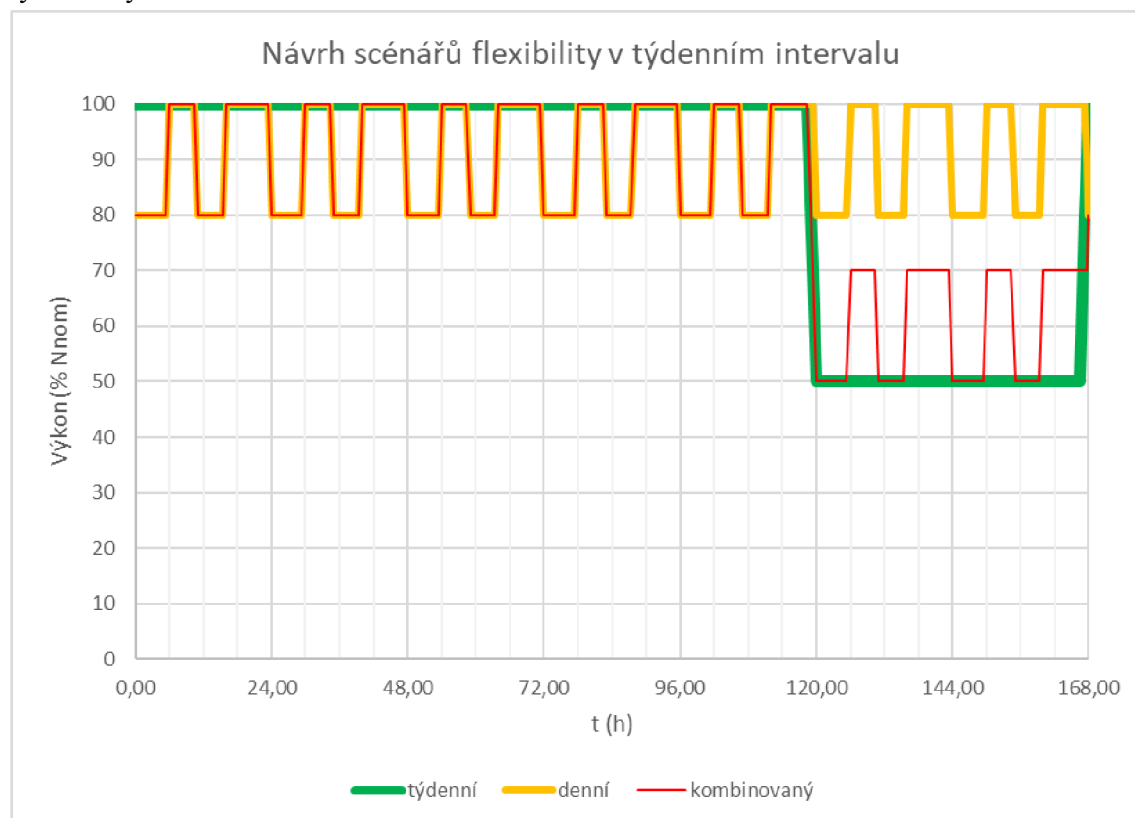
4.2.3 Navržené scénáře

Nulový scénář flexibility budeme považovat za „referenční“. Jedná se o soudobý stav, kdy blok flexibilitu neposkytuje v žádném rozsahu a výstupní výkon bloku je zcela podřízen optimalizaci využití paliva, tedy 100 % N_{nom} po celou dobu.

První scénář flexibility můžeme označit za „víkendový“. Budeme uvažovat změny výkonu dvakrát týdně, snížení výkonu na 50 % během víkendu a provoz na 100 % během pracovního týdne²⁷.

Druhý scénář nazveme „denní“ a bude založen na změně výkonu čtyřikrát denně - z 80 % nominálního výkonu během noci na 100 % během dopolední špičky, následně snížení na 80 % během polední špičkové výroby fotovoltaických elektráren, následný nárůst na 100 % během večerní špičky a opětovné snížení na 80 % o půlnoci.

Třetí scénář, „kombinovaný“, bude založen na předchozích dvou přístupech. Bude podstupovat denní cyklování mezi 80 % a 100 % nominálního výkonu během pracovního týdne a cyklování mezi 50 % a 70 % během víkendu.



Obrázek 19: Návrh týdenního intervalu scénářů flexibility

Pro demonstraci a posouzení jednotlivých jevů, které se při změnách výkonu odehrávají, je třeba eliminovat nežádoucí vlivy. V kontextu plánování kampaně to značí především nepřihlížet úplnému začátku kampaně. Důvody jsou dva. První je ten, že na počátku kampaně se dramaticky mění koncentrace Xe a Sm, což má za následek značné

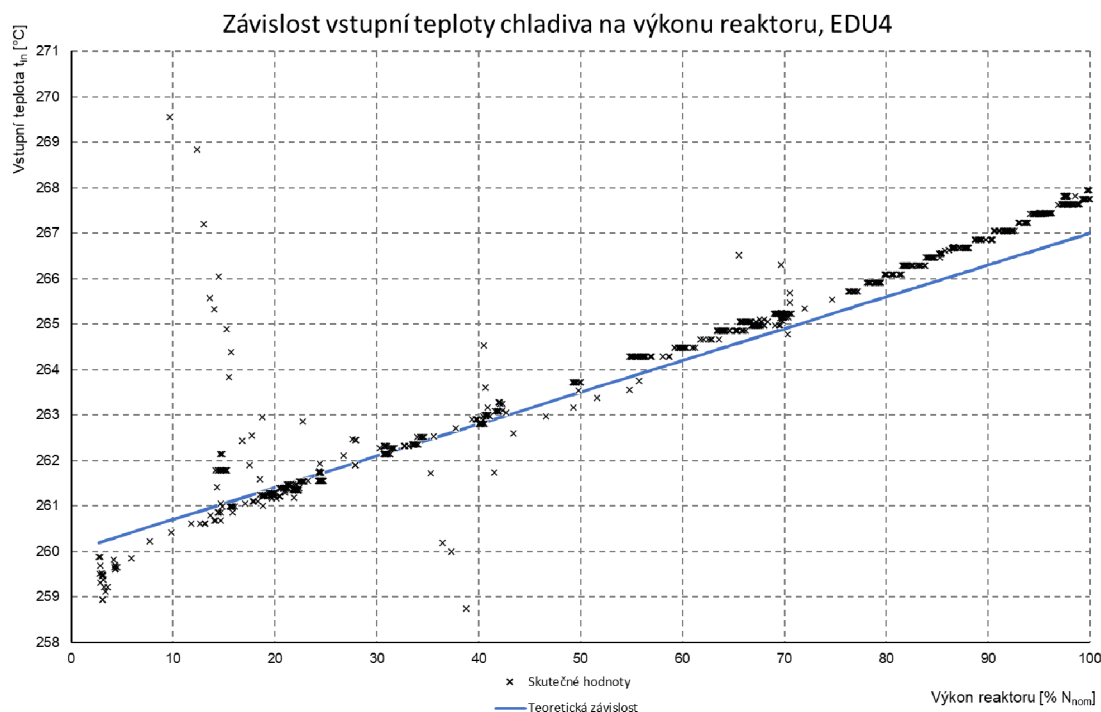
²⁷ Podobně provozuje své JE i EdF, viz 4.2.2, resp. [20]

změny koncentrace kyseliny borité. Kromě toho dochází také k nejrychlejšímu vyhořívání gadolinia. I podle zkušeností ze zahraničí se proto začíná s poskytováním flexibility až po ustálení těchto přechodových jevů [1][2][6][21][26]. Standardně je za dobu dostatečnou k ustálení reaktoru považováno 40 dní od počátku kampaně. Druhý důvod je pouze výpočetní: jelikož MOBY-DICK počítá sérii ustálených stavů a nikoli časové průběhy přechodových jevů, je zahájení kampaně počítáno jako skokový nárůst výkonu z 0 % na 100 % v nulovém čase. To sice neodpovídá realitě, ale s dostatečným časovým odstupem to do výpočtu nezavádí přílišnou chybu.

Vlivem vyhořívání a změny koncentrace H_3BO_3 se vliv jednotlivých scénářů bude lišit v závislosti na tom, zda proběhne na začátku kampaně, uprostřed anebo na konci. Proto budou pro každý scénář provedeny varianty regulace od 40. dne kampaně, od 190. a konečně od 340. dne kampaně.

4.2.4 Změna vstupní teploty

Jelikož jsou reaktory v elektrárně Dukovany regulovány v režimu konstantního tlaku sekundárního okruhu (viz 2.2.4), mění se s výkonem teplota primárního okruhu. To je třeba zohlednit výpočtově a společně se změnou výkonu, která se zadává do programu MOBY-DICK, zadat i změnu teploty chladiva. Teoretická závislost teploty na výkonu je lineární a dosahuje hodnoty 260 °C pro 0 % nominálního výkonu reaktoru a 267 °C pro plný výkon. Přestože rozdíl teplot není velký, hraje nezanedbatelnou roli ve vlivu na reaktivitu aktivní zóny.



Obrázek 20: Porovnání teoretické a skutečné závislosti vstupní teploty chladiva na výkonu reaktoru, EDU4

Na grafu (Obrázek 20) je vidět srovnání teoretické závislosti $T_{in} = f(N_{nom})$ a reálných hodnot naměřených při provozu. Použitá data pocházejí ze spouštění 4. bloku jaderné elektrárny Dukovany, je proto možné, že lehká odlišnost trendu závislosti je zapříčiněná rozdílnými vlastnostmi bloků²⁸. Změřené body, které se nacházejí mimo hlavní lineární závislost, odpovídají různým testům, které je třeba při spouštění vždy provést a které ověřují vypočtené bezpečnostní parametry vsázky. Z hlediska provozu se jedná o nestandardní stavy, nejedná se tedy o chybu.

²⁸ Bloky se navzájem mohou lišit v tepelném výkonu, typu použitého paliva a z toho vyplývajícím chemickém režimu nebo účinností parogenerátorů.

5. ZPRACOVÁNÍ A ZOBRAZENÍ

5.1 Varianty scénářů

5.1.1 Referenční scénář

Referenční scénář neuvažuje se změnami výkonu během kampaně, výkon reaktoru je tedy po celou dobu 100 % N_{nom} ²⁹. Simulace provozních veličin reaktoru při referenčním scénáři nám umožňuje stanovit optimální konec kampaně. Pro sledovanou kampaň je plánovaný konec po 433 dnech, což je doba, kterou nelze jednoduše překročit. Termín je vázaný na množství odstávkových prací, které jsou zpravidla prováděné externími firmami a plánovat harmonogram odstávky např. podle vyhoření paliva by bylo provozně neekonomické. Proto se u všech uvažovaných scénářů použije referenční konec kampaně, což umožňuje porovnání prováděných výkonových změn z hlediska realistického provozu reaktoru.

Na výstupu ze simulace referenčního scénáře je možné sledovat řadu základních jevů, které se v reaktoru odehrávají. Jedná se zejména o vyhořívání paliva během kampaně a s tím související ředění koncentrace kyseliny borité v chladivu primárního okruhu. Dále je důležitým ukazatelem axiální ofset, tedy procentní rozdíl mezi výkonem horní a spodní poloviny aktivní zóny.

Pro výsledky je podstatné, že v období, kdy neprobíhalo poskytování flexibility, byla simulace u všech scénářů provedena stejným způsobem jako pro referenční variantu. Zejména je to důležité pro začátek kampaně, tedy prvních 40 dní. Výpočtově je nastavena na začátku kampaně výkonová změna z 0 % na 100 % N_{nom} v nulovém čase a následně je provedeno 40 dní, kdy se ustaluje koncentrace jedů a strusek³⁰. Tento postup se při výpočtech běžně používá, proto byl zachován při výpočtu všech scénářů.

Podobně byly převzaty výpočtové intervaly pro období, kdy nedochází k poskytování flexibility. V některých případech vedou delší intervaly vlivem menšího časového rozlišení k drobnému zkreslení průběhu veličin po skončení přechodových jevů.

Na grafu (Obrázek 21), který zachycuje průběh veličin pro referenční scénář, je v části B) je vidět, že poloha HRK6 je po celou dobu kampaně na konstantní pozici 214 cm, až na konci kampaně kompenzuje vyhoření paliva ve chvíli, kdy koncentrace c_B dosáhne 0 g/kg. V provozu se na konci kampaně zároveň vysouvá skupina HRK6 a snižuje koncentrace H_3BO_3 , takže podobné schody, jaké můžeme vidět kolem 390. dne neodpovídají realitě a jsou pouze výpočetním konstruktem umožňujícím s rozumnou přesností simulovat konec kampaně. Kampaň je standartně plánována na délku

²⁹ Pro 35. kampaň je 100 % 1444 MWt, vlivem neustálé snahy o zvyšování výkonu je nominální výkon pro 36. kampaň už 1475 MWt.

³⁰ Zejména ^{135}Xe a ^{149}Sm , viz 2.2.2, příp. [7][25]

odpovídající „konci bóru^{31c}“, což je čas, kdy je skupina HRK6 plně vytažena (250 cm) a $c_B = 0$ g/kg a reaktor je právě kritický. Další prodloužení je možné na efektech (viz 3.1.1), což se také na Dukovanech děje, ale je to primárně vnímáno jako časová rezerva pro neočekávané odklady při plánování odstávky bloku, jelikož tento typ provozu nemá takovou ekonomickou návratnost³².

Lze zde také vidět nerovnoměrnost výkonu K_r , která v žádném okamžiku nepřesáhne limitu, která je pro $P_t = 1444$ MWt $limK_r = 1,61$. V první třetině nerovnoměrnost mírně roste, což je způsobeno především vyhoříváním gadoliniových absorbátorů. Tím dochází k nárůstu výkonu v nejexponovanějších místech. Potom, co palivo v těchto oblastech dosáhne určitého vyhoření, začne se nerovnoměrnost K_r opět snižovat. To je způsobeno tím, že v místech, kde je tok neutronů největší, se už snížila koncentrace ²³⁵U a nižší koncentrace H₃BO₃ umožňuje zvýšení relativního výkonu i elementů na okraji zóny, což vede k rovnoměrnějšímu rozložení výkonu.

5.1.2 Týdenní scénář

Jedná se o typ provozu, který nevyžaduje časté výkonové změny, a ze zkušeností získaných z provozu reaktorů poskytujících flexibilitu víme, že k podobnému režimu se při provozu přistupuje. Kromě toho je hranice 50 % N_{nom} vysloveně zmíněna ve zprávě IAEA o poskytování flexibility jadernými elektrárnami, viz [30].

Důležitým efektem, který se zde projeví, je velká změna výkonu. To v zásadě nepředstavuje problém samo o sobě, ale následný přechodový jev způsobený vývinem xenonu může vést k podkročení limit pro polohu HRK6, což je třeba kompenzovat přidáním kyseliny borité.

Simulaci tedy provedeme pro případ bez kompenzace a s kompenzací kyselinou boritou.

Dalším parametrem, se kterým se výsledky simulace mohou lišit, je vyhoření paliva, respektive zda k výkonové změně dojde na začátku kampaně, uprostřed nebo na konci. Vytvoříme tedy další varianty, kdy představený cyklus provedeme po 40 dnech simulace, po 190 dnech a po 340 dnech. V každém čase tedy simulujeme variantu s kompenzací a bez kompenzace H₃BO₃.

Zajímavý úhel pohledu může nabídnout i periodické opakování navrženého scénáře. V reaktoru se mohou objevit některé jevy, které získají na významu v delším časovém horizontu, proto vytvoříme ještě variantu provedení regulačního cyklu šestkrát za sebou, tedy po dobu šesti týdnů. Zde bude podstatný zejména vliv vyhoření a případné změny v průběhu axiálního ofsetu.

³¹ Lze se setkat se zkratkou EOB z anglického End Of Boron

³² Teplotní efekt - nižší teplota v primárním okruhu - vede k nižší účinnosti turbíny, a tudíž stejně jako výkonový efekt - nižší tepelný výkon reaktoru - k nižšímu elektrickému výkonu generátoru.

5.1.3 Denní scénář

Denní cyklování je nejpravděpodobnějším způsobem provozu, který také souvisí nejvíce s vysokým podílem obnovitelných zdrojů v elektrizační soustavě. Pro demonstraci byl zvolen pokles výkonu na 80 %, protože takový režim odpovídá provozu jiných elektráren zapojených do poskytování flexibility a je uvedený ve zprávě IAEA (viz [30]).

Specifikem tohoto scénáře je frekvence výkonových změn, která je poměrně velká a blíží se frekvenci xenonových oscilací. Vzhledem k tomu, že výkonové změny mají poměrně malou amplitudu, při provozu podle tohoto scénáře není třeba kompenzovat pohyb regulačních kazet pomocí změny koncentrace H_3BO_3 .

Varianty, které jsou simulovány, se tedy liší pouze obdobím kampaně, kdy k výkonovým změnám dojde: po 40, 190 nebo 340 dnech nominálního provozu.

Vzhledem k pravidelnému charakteru změn a předpokládaným xenonovým jevům byly taktéž simulovány opakující se průběhy pro období šesti týdnů.

5.1.4 Kombinovaný scénář

Tento scénář počítá s kombinací předchozích přístupů jako s možností, která by mohla být pro potřeby sítě v některých okamžicích výhodná, vzhledem k tomu, že reflektuje jak výrobu fotovoltaických elektráren během dne, tak pokles spotřeby během víkendu a noci.

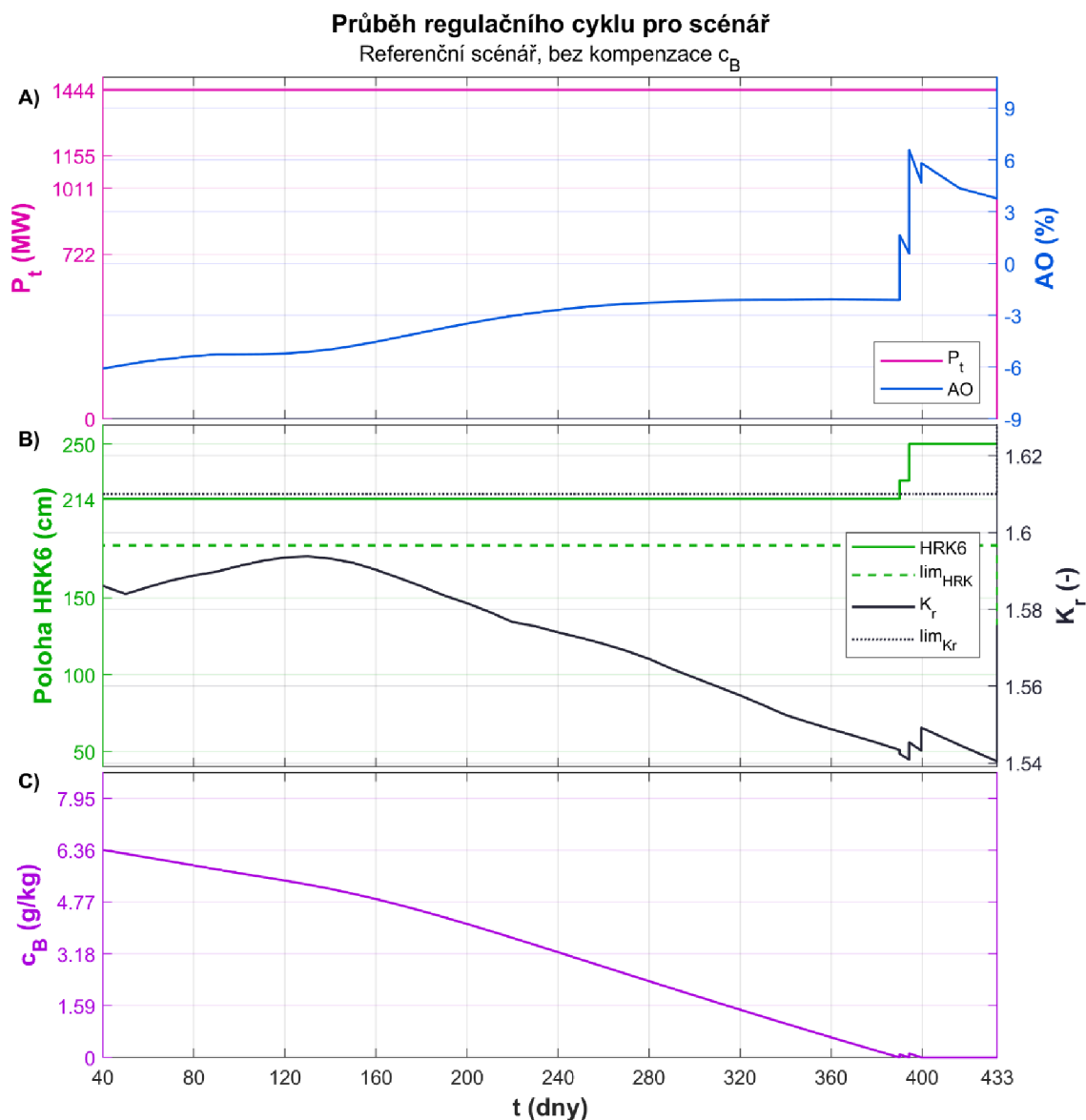
Vzhledem k tomu, že dochází k velkým výkonovým změnám, podobně jako u týdenního scénáře, a navíc k následným rychlým zásahům bez možnosti ustálení koncentrace xenonu, je při tomto scénáři nutný zásah formou kompenzace pomocí kyseliny borité.

Podobně jako u předchozích scénářů byly taktéž vytvořeny varianty pro provedení cyklu na začátku, uprostřed i na konci kampaně.

Pro ilustraci, jak jednotlivé parametry a pozorované jevy ovlivní změna vyhoření během cyklu, je vytvořena též šestitýdenní varianta pro znázornění dlouhodobějších efektů.

5.2 Sledované veličiny

Příklad zobrazení sledovaných veličin v grafu:



Obrázek 21: Referenční varianta, bez regulace výkonu

5.2.1 Výkonové změny

Výkon reaktoru zobrazený v grafu je udáván v MW_t , přičemž

$$1444 \text{ MW}_t \equiv 100 \% N_{nom}^{33}.$$

Výkon se v reaktoru nemění naráz, ale postupně, navíc pouze za předem definovaných podmínek, zejména rychlosti změny výkonu. Pro reaktory jaderné elektrárny Dukovany se tato rychlost pro různé stavy a výkonové rozmezí liší, ale po domluvě s konzultantem byla stanovena na $0,5 \% N_{nom}$ za minutu, což odpovídá $7,22 \text{ MW}_t/\text{min}^{34}$. Zároveň je třeba mít na paměti, že výpočetní program MOBY-DICK,

³³ Nominální tepelný výkon pro 35. kampaň.

³⁴ $7,22 \text{ MW}_t \equiv 2,5 \text{ MW}_e$; rychlost změny odpovídá realitě, viz [1], [30]

ve kterém jsou simulace pro tuto práci vypočítány, pracuje s jednotlivými diskrétními stavy, ve kterých se reaktor nachází a nepočítá spojitý průběh přechodových jevů. Pro získání dostatečného rozlišení během výkonové změny a zároveň zachování rozumného výpočetního času byl stanoven krok výpočtu během výkonových změn na 20 minut, což odpovídá skoku o 10 % nominálního výkonu. Ve většině případů poskytuje toto časové rozlišení dostatečný a relevantní vzhled do dějů uvnitř reaktoru, ale v některých případech jsou tímto jevem výsledky zkreslené a je tedy třeba mít při interpretaci výsledků výpočetní omezení na paměti.

Ve vstupním souboru se pro výpočet polohy HRK6 jako kritického parametru zadává teplota vstupního chladiva jako neměnný parametr, který je na pevně svázaný s tepelným výkonem reaktoru. To souvisí se způsobem řízení reaktoru na konstantní tlak sekundárního okruhu (viz 2.2.4 respektive 4.2.4). Protože průběh vstupní teploty je napřímo navázaný na průběh tepelného výkonu, není dále teplota uvažována jako samostatný parametr, ani není zobrazena v grafických výstupech. Její výška se nicméně proměňuje, což má následně vliv na další parametry, proto je třeba mít vliv teploty stále na paměti.

Zápis výkonu a vstupní teploty do vstupního souboru je proveden podle vzoru (Obrázek 5) a podle závislosti $T_{in} = f(P_t)$ popsané v (4.2.4).

5.2.2 Axiální ofset

Axiální ofset vyjadřuje procentní rozdíl výkonu spodní a horní poloviny aktivní zóny podle vzorce:

$$AO = \frac{P_{top} - P_{bot}}{P_t} \cdot 100 \quad (7)$$

P_{top} - Výkon horní poloviny aktivní zóny

P_{bot} - Výkon spodní poloviny aktivní zóny

P_t - Tepelný výkon reaktoru

Na axiální ofset má vliv několik faktorů. Prvním z nich je teplota chladicí vody. Jelikož vtok chladicí vody je zesponu, je ve spodní polovině aktivní zóny chladivo studenější. Vlivem teplotního koeficientu reaktivity je tedy spodní polovina reaktivnější než horní. K tomuto efektu se navíc přidává poloha HRK, které se zasouvají seshora, takže při částečném zasunutí potlačují výkon hlavně v horní části aktivní zóny. Tyto dva faktory mají za následek, že těžiště výkonu je po většinu kampaně posunuto pod fyzický střed aktivní zóny.

Axiální ofset je důležité sledovat z několika důvodů. Prvním z nich je nerovnoměrnost vyhoření paliva. Palivové kazety reaktoru VVER-440 nejsou axiálně profilované, takže v horní polovině je stejné palivo jako ve spodní. Na konci kampaně dosahuje tedy spodní část znatelně vyššího vyhoření. Nerovnoměrnost vyhoření vede nejen k nižšímu využití paliva, ale může za určitých podmínek vést i ke zmenšení

bezpečnostních rezerv u některých parametrů³⁵. Další situací, kterou pomáhá axiální ofset odhalit, jsou axiální xenonové oscilace. Průběh je takový, že vlivem vysokého výkonu ve spodní části aktivní zóny dojde ke zvýšenému vývinu xenonu v této části. Xenon potom „vytlačí“ výkon do horní poloviny, kde je stacionární otrava nízká. Během toho, co se v horní polovině zvyšuje koncentrace xenonu, ve spodní polovině dojde k jeho vyhoření nebo radioaktivní přeměně a výkon se opět „přelije“ do spodní části. V dukovanských reaktorech se tento jev prakticky nevyskytuje, oscilace jsou tlumeny v první půlperiodě. V jaderné elektrárně Temelín, jejíž reaktory mají větší fyzické rozměry, je tento jev významnější.

Hodnoty axiálního ofsetu v jednotlivých výpočetních krocích pro vytvoření grafů je možné získat z výstupního souboru **altM.f3c35** nebo **altB.f3c35** rovnou v procentech pod názvem **ao*100**:

```
pow_top*100= 40.681
pow_bot*100= 59.319
ao*100= -18.638
```

5.2.3 Poloha HRK

Poloha HRK6 je během přechodných jevů uvažována jako kritický parametr, který program MOBY-DICK dopočítává na základě ostatních zadaných parametrů a stavem aktivní zóny ve výpočtovém čase. Tento parametr se udává v cm ode dna aktivní zóny. Může tedy nabývat hodnoty 0 až 250. Pokud během výpočtu dosáhne poloha HRK6 horní koncové polohy 250 cm, výpočetní program automaticky přejde na výpočet s kyselinou boritou jako kritickým parametrem. To je dáno tím, že pro zachování kritického stavu reaktoru je třeba přidat další reaktivitu, což lze udělat pouze vytažením HRK6 nebo ředěním H₃BO₃.

Limita HRK6 je závislá na okamžitém tepelném výkonu reaktoru a je dána grafem (Obrázek 10). Jedná se o spodní hranici, kde se během provozu může skupina HRK nacházet, jelikož horní hranice je rovna maximální možné poloze. Pro výkon nižší než 58 % N_{nom} , což odpovídá $P_t \approx 838$ MWt, je limita 50 cm ode dna aktivní zóny. Pro vyšší výkony je limita dána rovnicí:

$$lim_{HRK} = 50 + \frac{P_t - 838}{1444 - 838} \cdot (184 - 50) = 0,221 \cdot P_t - 135 \quad (8)$$

lim_{HRK} (cm) - limitní poloha regulační skupiny HRK

P_t (MWt) - tepelný výkon reaktoru

Poloha HRK6 pro každý výpočtový krok je vypsána ve výstupním souboru (viz 3.2.3).

³⁵ Některé bezpečnostní parametry, zejména lineární výkon a skok lineárního výkonu jsou závislé na vyhoření.

5.2.4 Koeficient K_r

Nerovnoměrnost výkonu v reaktoru během simulování všech scénářů nikdy nepřesahuje povolenou limitu. Podle rovnice (6) jsou limitní hodnoty korespondující s tepelným výkonem:

N (%)	100	80	70	50
lim_{K_r} (-)	1,610	1,932	2,093	2,415

Zatímco limitní hodnotu je třeba vypočítat ze zadaného tepelného výkonu, koeficient K_r najdeme ve výstupním souboru pod názvem **Cq** (viz 3.2.3).

5.2.5 Lineární výkon

Lineární výkon proutku, respektive elementu, je omezen limitní hodnotou podle grafu (Obrázek 12). Získání hodnoty lineárního výkonu ale není jednoduché, stejně jako jeho vyhodnocení. Výpočetní program má ve výstupních souborech sice informaci o relativním výkonu nejzatíženějšího elementu, ale jelikož limitní hodnota zatížení závisí nejen na okamžitém tepelném výkonu reaktoru, ale navíc i na průměrném vyhoření proutku, nemusí být nejzatíženější element nutně elementem, který je nejbližší k překročení limitní hodnoty.

K posouzení tohoto kritéria je tedy třeba zpracovat data ze souborů, které obsahují hodnotu vyhoření a relativního výkonu pro každý jednotlivý element v každém kroku výpočtu. Tato data je nutné zpracovávat strojově, jelikož hodnot je velké množství: pro jeden krok výpočtu je zde zapsáno

Počet hodnot	=	Počet elementů v proutku	·	Počet proutků v kazetě	·	Počet kazet v jedné šestině zóny
314 706	=	42	·	127	·	59

Tato data jsou obsažena v souborech **KNOWBU.f3c35** (vyhoření) a **KNOWPW.f3c35** (relativní výkon). Pro posouzení je třeba získat z relativních výkonů lineární poproutkový výkon:

$$q_l = p_w \cdot \frac{P_t \cdot 10^{-6}}{n_{ka} \cdot n_{pr} \cdot n_{el} \cdot h_{el}} = p_w \cdot \frac{P_t \cdot 10^{-6}}{349 \cdot 126 \cdot 42 \cdot 5,95} \quad (9)$$

q_l ($W \cdot cm^{-1}$) - lineární výkon elementu

P_t (MWt) - tepelný výkon reaktoru

p_w (-) - relativní výkon elementu

n_{ka} (-) - počet kazet v aktivní zóně

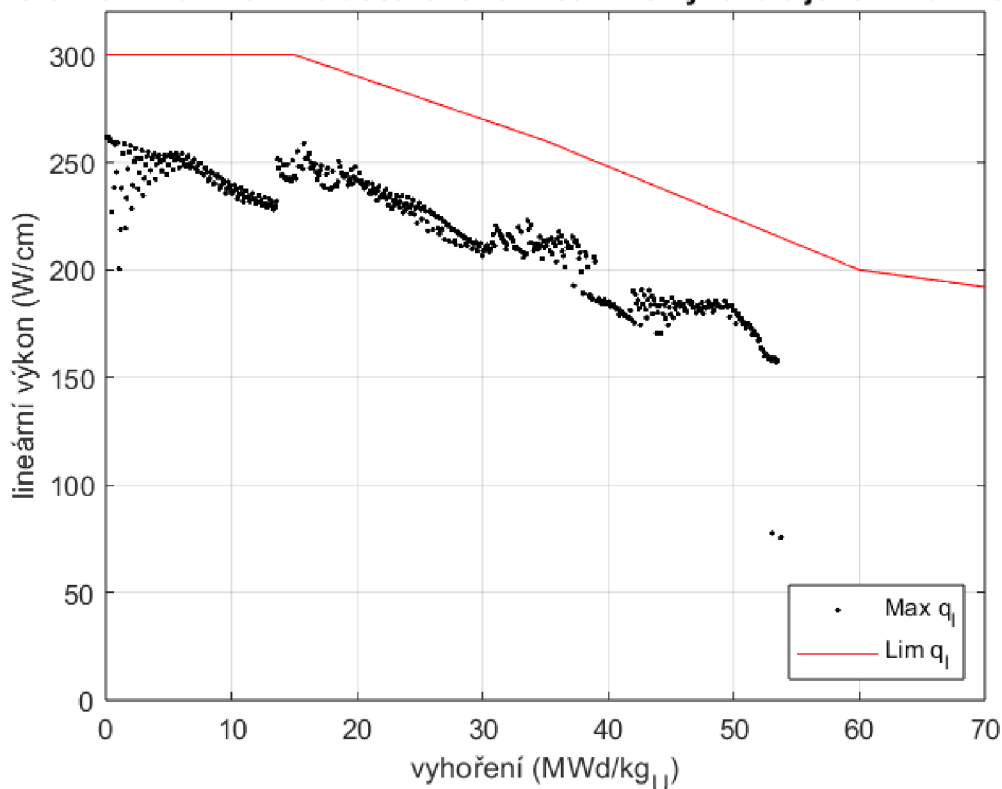
n_{pr} (-) - počet palivových proutků v kazetě³⁶

n_{el} (-) - počet elementů po výšce proutku

h_{el} (cm) - výška elementu

Pro každý proutek je potom třeba vypočíst průměrné vyhoření z vyhoření jednotlivých elementů a k tomu přiřadit nejvyšší lineární výkon elementu v tomto proutku. Tímto postupem je získán jeden bod charakteristiky, jak je znázorněno v grafu (Obrázek 22). Graf je vhodné poté upravit tím způsobem, že se pro každé vyhoření ΔBU zapíše pouze nejvyšší hodnota lineárního výkonu, takže je grafický výstup přehlednější:

Porovnání maximálního dosaženého lineárního výkonu a jeho limitní hodnoty.



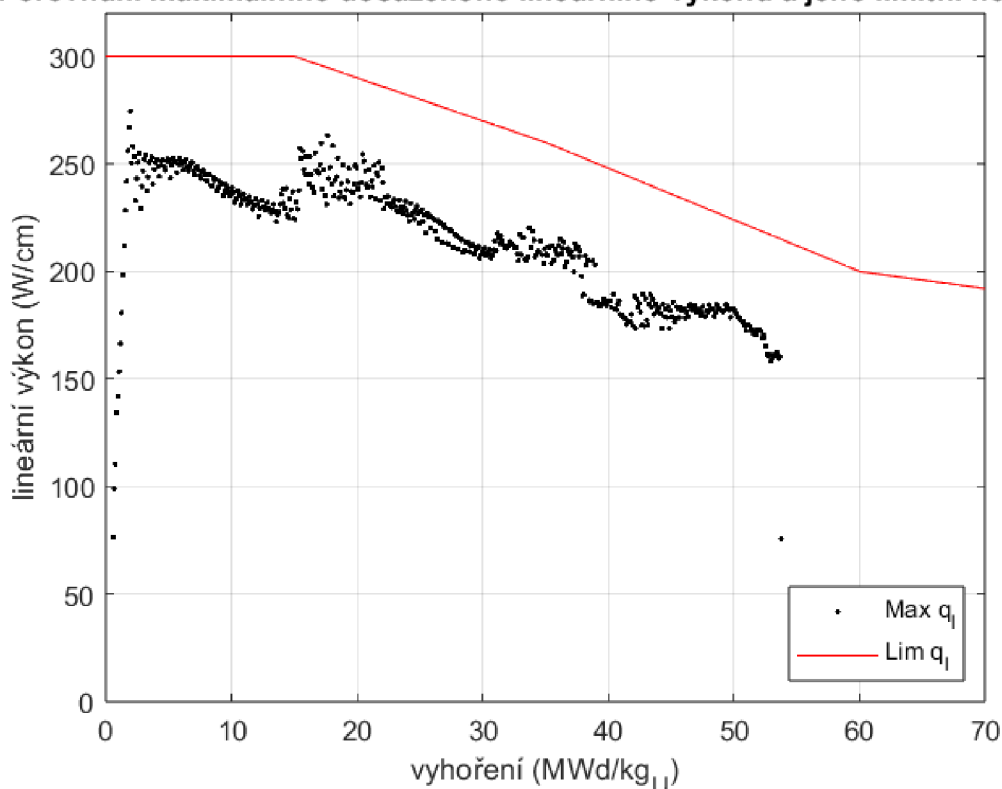
Obrázek 22: Příklad vyhodnocení lineárního výkonu pro referenční scénář

³⁶ V jedné kazetě se nachází 127 proutků, ale pouze ve 126 je palivo, centrální trubka je určena pro měřicí čidla. Relativní výkon je vztážen k průměrnému výkonu **palivového** elementu.

Z grafu (Obrázek 22) je patrné, že informace o nejzatíženějším proutku není dostatečná a je třeba ji dát do kontextu vyhoření proutku. Je důležité mít na paměti, že na ose x je vyneseno **průměrné** vyhoření **proutku**, nikoli vyhoření nejzatíženějšího elementu. Pro referenční scénář je nejmenší rezerva vyhoření k limitě dané výrobcem paliva **38,19 W/cm**.

Při provedení regulačního cyklu se maximální lineární výkon zvýší a přiblíží limitě:

Porovnání maximálního dosaženého lineárního výkonu a jeho limitní hodnoty.

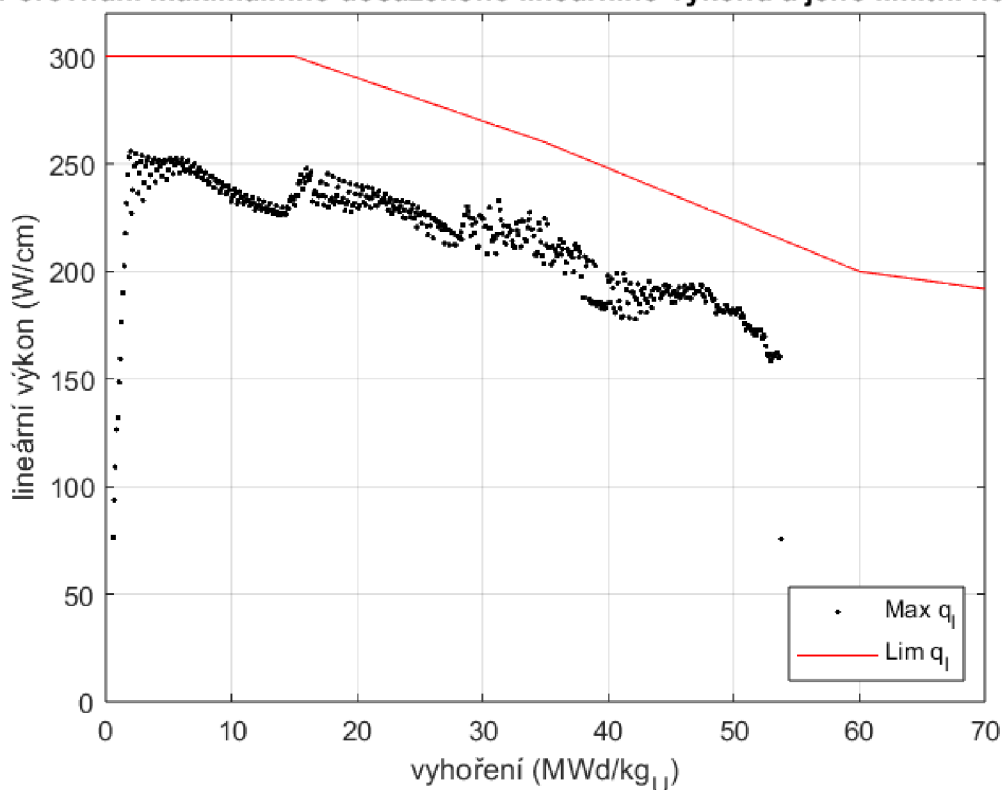


Obrázek 23: Vyhodnocení lineárního výkonu pro týdenní scénář na začátku kampaně s překompenzací

Jelikož zde provádíme regulaci výkonu na začátku kampaně, je zřejmé, že lineární výkon roste zejména pro čerstvé, málo vyhořelé palivo. Nejmenší rezerva k limitní hodnotě se zde oproti referenčnímu scénáři sníží na **25,46 W/cm**.

Oproti tomu regulační zásah na konci kampaně už nevede k tak významnému nárůstu lineárního výkonu, jak je vidět na grafu (Obrázek 24):

Porovnání maximálního dosaženého lineárního výkonu a jeho limitní hodnoty.



Obrázek 24: Zhodnocení lineárního výkonu během týdenního scénáře na koci cyklu s překompenzací c_B

Při provedení regulačního zásahu na konci kampaně se zvedá lineární výkon u palivových elementů se středním nebo vyšším vyhořením, což vede oproti referenčnímu scénáři ke snížení rezervy na **34,40 W/cm**.

V praxi je tento parametr automaticky kontrolován monitorovacím systémem AZ Scorpio. Jako orientační hodnotu z výstupu programu MOBY-DICK lze brát relativní výkon proutku K_r .

5.2.6 Kyselina boritá

Během kampaně se průběžně snižuje koncentrace kyseliny borité (c_B) v chladiči primárního okruhu. Toto ředění vyrovnává úbytek reaktivity vlivem vyhořívání paliva. O výhodách změn koncentrace H_3BO_3 spíše než změn polohy HRK už bylo pojednáno výše (viz 2.2.1).

Během simulovaných přechodových jevů byla, pokud možno, uvažována konstantní koncentrace kyseliny borité. Důvodem je, že program umožňuje počítat pouze jeden kritický parametr a hodnota c_B by se musela v každém okamžiku přechodného děje zadávat manuálně. Jelikož však během přechodného děje může docházet k vyhořívání jiným tempem než během nominálního provozu, muselo by se nakonec přistoupit k empirickému iteračnímu stanovení koncentrace pro každý krok simulace, což by významným způsobem ovlivnilo věrohodnost výsledků a interpretaci pozorovaných jevů.

Během regulačního cyklu však stále dochází k vyhořívání paliva, což je kompenzováno vysouváním HRK. Tuto skutečnost je třeba mít při interpretaci výsledků na paměti.

Pokud během výkonových změn dojde k podkročení limity pro polohu HRK, je nutné přidat kyselinu boritou pro snížení reaktivity. Tomuto zásahu se říká překompenzace a je nutný pro udržení reaktoru v kritickém stavu. Je snaha se překompenzací během provozu vyhnout, protože při změnách koncentrace kyseliny borité dochází k výměně velkého množství kapalného média, které je radiačně aktivované a jeho zpracování je technologicky náročné. Navíc tato výměna klade zvýšené požadavky na pomocné procesy a udržení chemického režimu v primárním okruhu. Potřeba zásahu souvisí s xenonovým přechodným jevem a většinou má tak poměrně krátké trvání, i proto jsou preferovány pomalé změny výkonu před rychlými. Provozní odhad říká, že změna reaktivity vyvolaná změnou c_B o 0,1 g/kg přibližně odpovídá posunu HRK6 o 10 cm³⁷.

Hodnotu c_B pro každý výpočtový krok lze získat z výstupního souboru (viz 3.2.3, Obrázek 7)

Pro posouzení provozních dopadů použití překompenzace je vhodné vypočítat množství koncentráту kyseliny borité V_{CB} pro zvýšení koncentrace, respektive množství čistého kondenzátu V_{CK} pro zředění na požadovanou hodnotu. Vypočtené Neutronově-fyzikální charakteristiky reaktoru [35] stanovují vzorec pro výpočet výsledné koncentrace kyseliny borité v závislosti na množství a koncentraci doplňovaného koncentráту. V diskrétní formě má tato rovnice tvar:

$$c_2 = c_{dop} \cdot \left(1 - e^{-\frac{V_{dop} \cdot \gamma_{dop}}{V_{IO} \cdot \gamma_{IO}}} \right) + c_1 \cdot e^{-\frac{V_{dop} \cdot \gamma_{dop}}{V_{IO} \cdot \gamma_{IO}}} \quad (10)$$

c_1 (g · kg⁻¹) - počáteční koncentrace H₃BO₃ v primárním okruhu

c_2 (g · kg⁻¹) - koncová koncentrace H₃BO₃ po doplnění / ředění

c_{dop} (g · kg⁻¹) - koncentrace H₃BO₃ v doplňovaném médiu

V_{dop} (m³) - objem doplněného média

γ_{dop} (kg · m⁻³) - hustota doplňovaného média

V_{IO} (m³) - objem chladiva v primárním okruhu

γ_{IO} (kg · m⁻³) - hustota chladiva v primárním okruhu

Jelikož pro potřeby výpočtu známe počáteční a koncovou koncentraci a počítáme objem média, upravíme rovnici do požadovaného tvaru:

$$c_2 = c_{dop} - c_{dop} \cdot e^{-\frac{V_{dop} \cdot \gamma_{dop}}{V_{IO} \cdot \gamma_{IO}}} + c_1 \cdot e^{-\frac{V_{dop} \cdot \gamma_{dop}}{V_{IO} \cdot \gamma_{IO}}}$$

$$c_2 - c_{dop} = (c_1 - c_{dop}) \cdot e^{-\frac{V_{dop} \cdot \gamma_{dop}}{V_{IO} \cdot \gamma_{IO}}}$$

³⁷ Přesné hodnoty závisí na množství dalších faktorů, zejména poloze HRK, prostorovém rozložení výkonu, vyhoření a teplotě chladicí vody.

$$\frac{c_2 - c_{dop}}{c_1 - c_{dop}} = e^{-\frac{V_{dop} \cdot \gamma_{dop}}{V_{IO} \cdot \gamma_{IO}}}$$

$$\ln\left(\frac{c_2 - c_{dop}}{c_1 - c_{dop}}\right) = -\frac{V_{dop} \cdot \gamma_{dop}}{V_{IO} \cdot \gamma_{IO}}$$

$$\frac{V_{IO} \cdot \gamma_{IO}}{\gamma_{dop}} \cdot \ln\left(\frac{c_2 - c_{dop}}{c_1 - c_{dop}}\right) = -V_{dop}$$

$$V_{dop} = -\frac{V_{IO} \cdot \gamma_{IO}}{\gamma_{dop}} \cdot \ln\left(\frac{c_2 - c_{dop}}{c_1 - c_{dop}}\right)$$

$$V_{dop} = \frac{V_{IO} \cdot \gamma_{IO}}{\gamma_{dop}} \cdot \ln\left(\frac{c_1 - c_{dop}}{c_2 - c_{dop}}\right)$$

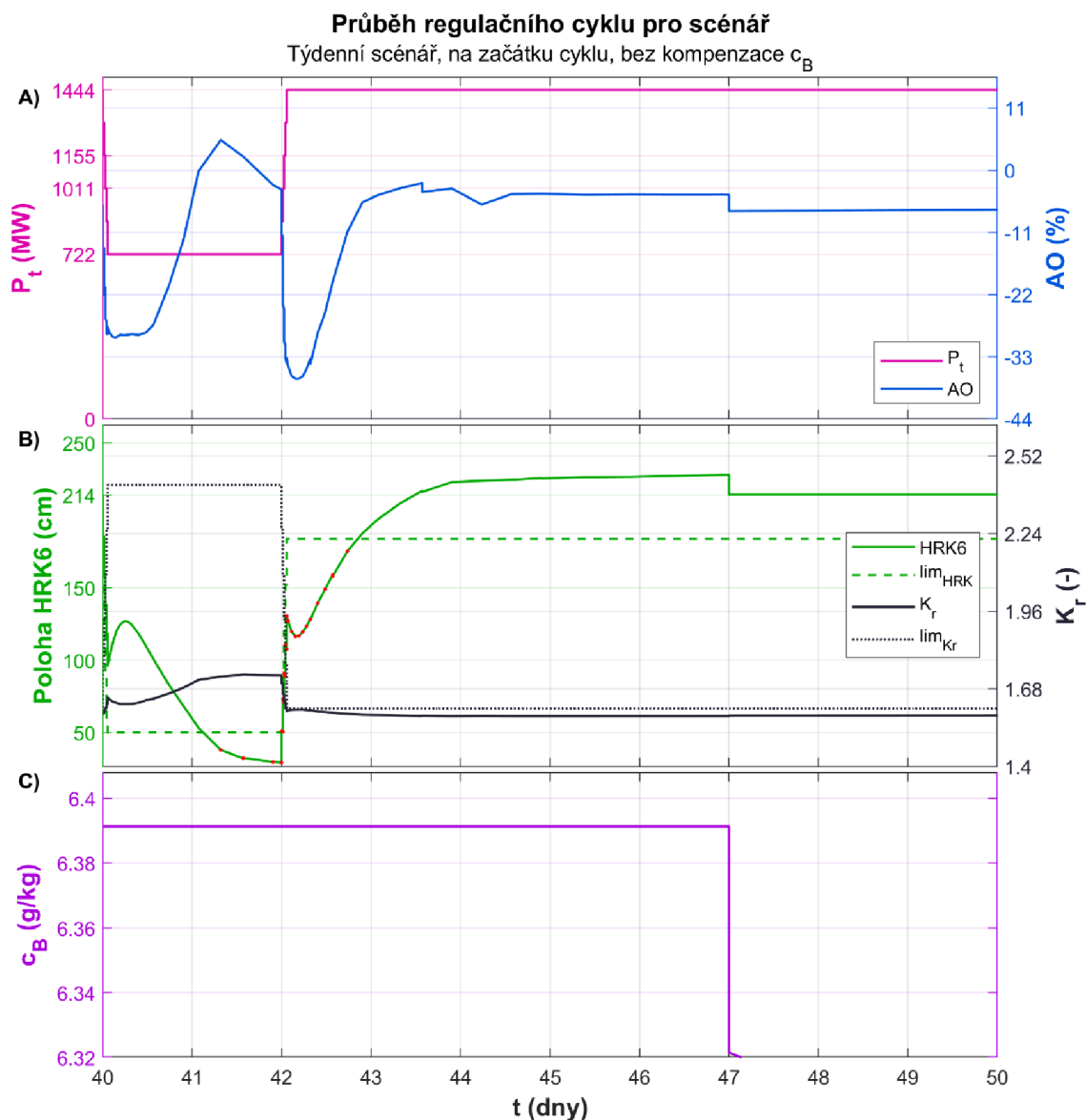
Rovnici v tomto tvaru lze použít jak pro výpočet objemu koncentráту H_3BO_3 , tak objemu čistého kondenzátu. Pro doplňování kyseliny borité se používá standardně koncentrát $c_{dop} = 40 \text{ g/kg}$. Při ředění je použito čisté médium o koncentraci $c_{dop} = 0 \text{ g/kg}$. Objem primárního okruhu bez kompenzátoru objemu je $V_{IO} = 207 \text{ m}^3$. Hustota vždy závisí na teplotě. Doplňované médium se uvažuje, že má vždy teplotu $50 \text{ }^\circ\text{C}$, při které je jeho hustota $\gamma_{dop} = 988 \text{ kg/m}^3$. Hustotu chladiva primárního okruhu je problematičtější určit, protože jeho teplota není konstantní, ale je závislá na výkonu reaktoru (viz 4.2.4) Pro výkonové změny od 50 % do 100 % N_{nom} se hustota pohybuje v rozmezí $774,9 \text{ kg/m}^3 \leq \gamma_{IO} \leq 779,8 \text{ kg/m}^3$.

Množství doplňovaného média tedy závisí nejen na požadované koncentraci, ale i na výchozí koncentraci. Lze dopočítat, že pro snížení koncentrace H_3BO_3 na nulu by bylo třeba nekonečné množství čistého kondenzátu. Provozně však není rozdíl mezi nulovou koncentrací a neměřitelně nízkou koncentrací. Tento jev je však důležitý při změnách koncentrace na konci kampaně, kdy jsou hodnoty c_B nízké a ředění chladiva primárního okruhu tak vyžaduje velké množství čistého kondenzátu, což vede k velkým objemům nízkoaktivního odpadu.

5.3 Pozorované jevy

5.3.1 Vyhoření během regulačního cyklu

Jak již bylo zmíněno výše, během regulačního cyklu uvažujeme c_B konstantní a vyhořívání paliva kompenzujeme vytahováním HRK6.

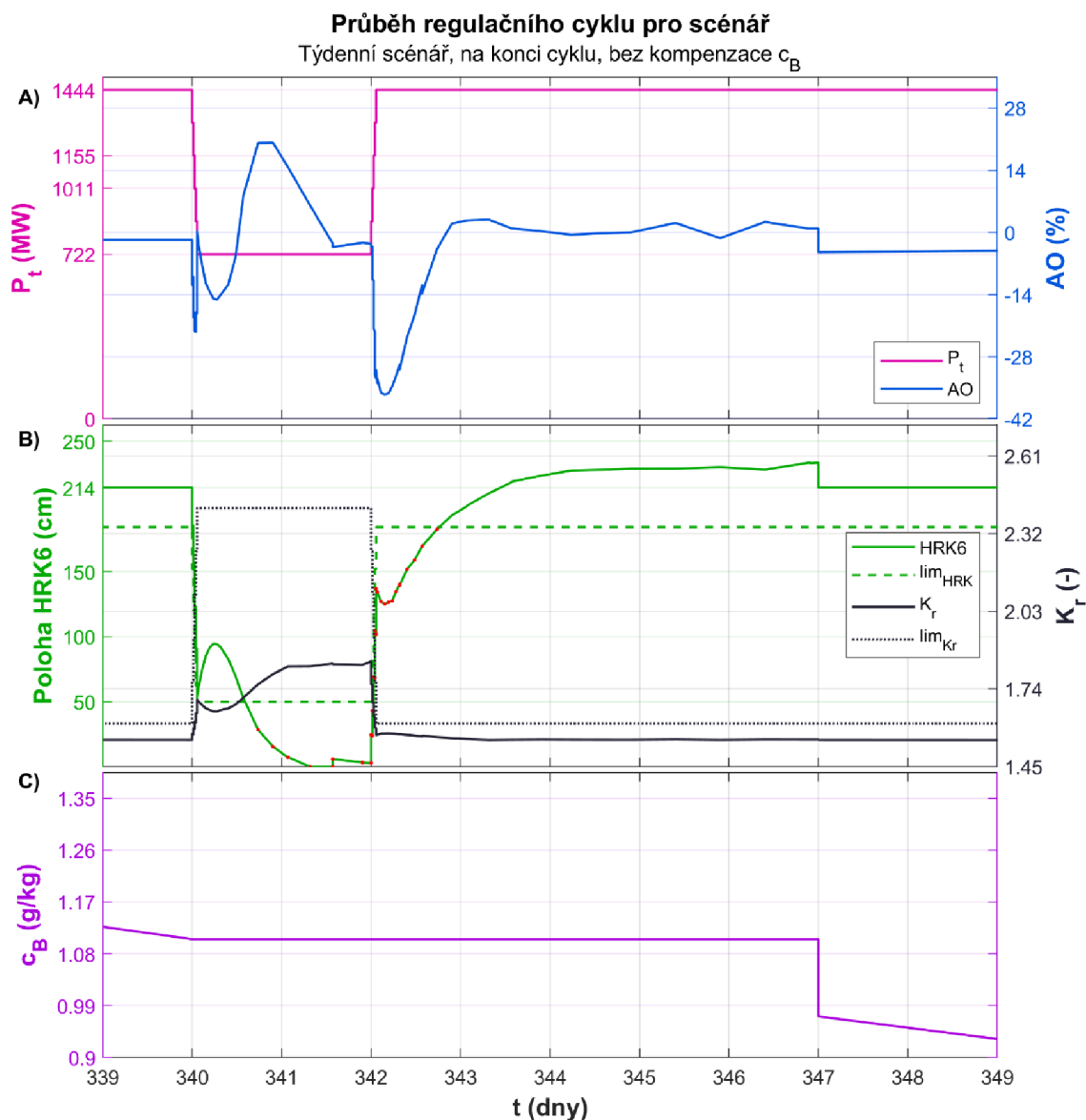


Obrázek 25: Týdenní scénář na začátku cyklu bez kompenzace c_B

Po ukončení regulačního zásahu se reaktor vrací do nominálního provozu s ustálenou polohou HRK na 214 cm a kompenzací vyhořívání pomocí c_B . Skokový pokles koncentrace tedy neodpovídá realitě, ale zde vyjadřuje vyhoření paliva za dobu regulačního cyklu. Úbytek reaktivity vyhořením je tedy ekvivalentní změny polohy tyčí o ~ 14 cm nebo snížení c_B o 0,07 g/kg. Pokles c_B vlivem kompenzace vyhoření je srovnatelný s referenční variantou za stejný časový úsek (viz Obrázek 21).

5.3.2 Xenonové přechodné jevy

Přechodné jevy způsobené xenonem jsou klíčovým elementem, který je třeba při simulování dějů uvnitř reaktoru uvažovat. Je tedy nutné na ně brát ohled jak při vytváření scénářů, tak při interpretaci výsledků.



Obrázek 26: Týdenní scénář na konci cyklu bez kompenzace c_B

Na průběhu (Obrázek 26) je vidět vliv xenonového přechodného děje jak po snížení výkonu, tak po jeho následném zvýšení. Přestože koncentraci xenonu přímo nesledujeme, je možné jeho vliv odvodit z vypočtené polohy HRK6. Po prudkém snížení výkonu se ihned začne projevovat efekt nestacionární xenonové otravy, v tomto případě tzv. jodové jámy³⁸. Na několik hodin naroste koncentrace ^{135}Xe , čímž je snížena reaktivita, a tím i potřeba potlačování výkonu regulačními kazetami. Po několika hodinách nicméně dojde k vyhoření xenonu, jehož hladina se postupně ustaluje na nové nižší hladině. Reaktor při

³⁸ V ustáleném stavu je rovnováha mezi procesem vyhořívání ^{135}Xe , které je závislé na výkonu a tvorbou ^{135}Xe z ^{135}I , která je závislá na výkonu s několikahodinovým zpožděním (viz 2.2.2). Při prudkém poklesu výkonu (např. při havarijním odstavení) tak dojde k vnosu velkého množství záporné reaktivity, která může na několik hodin zcela zamezit opětovnému zvýšení výkonu.

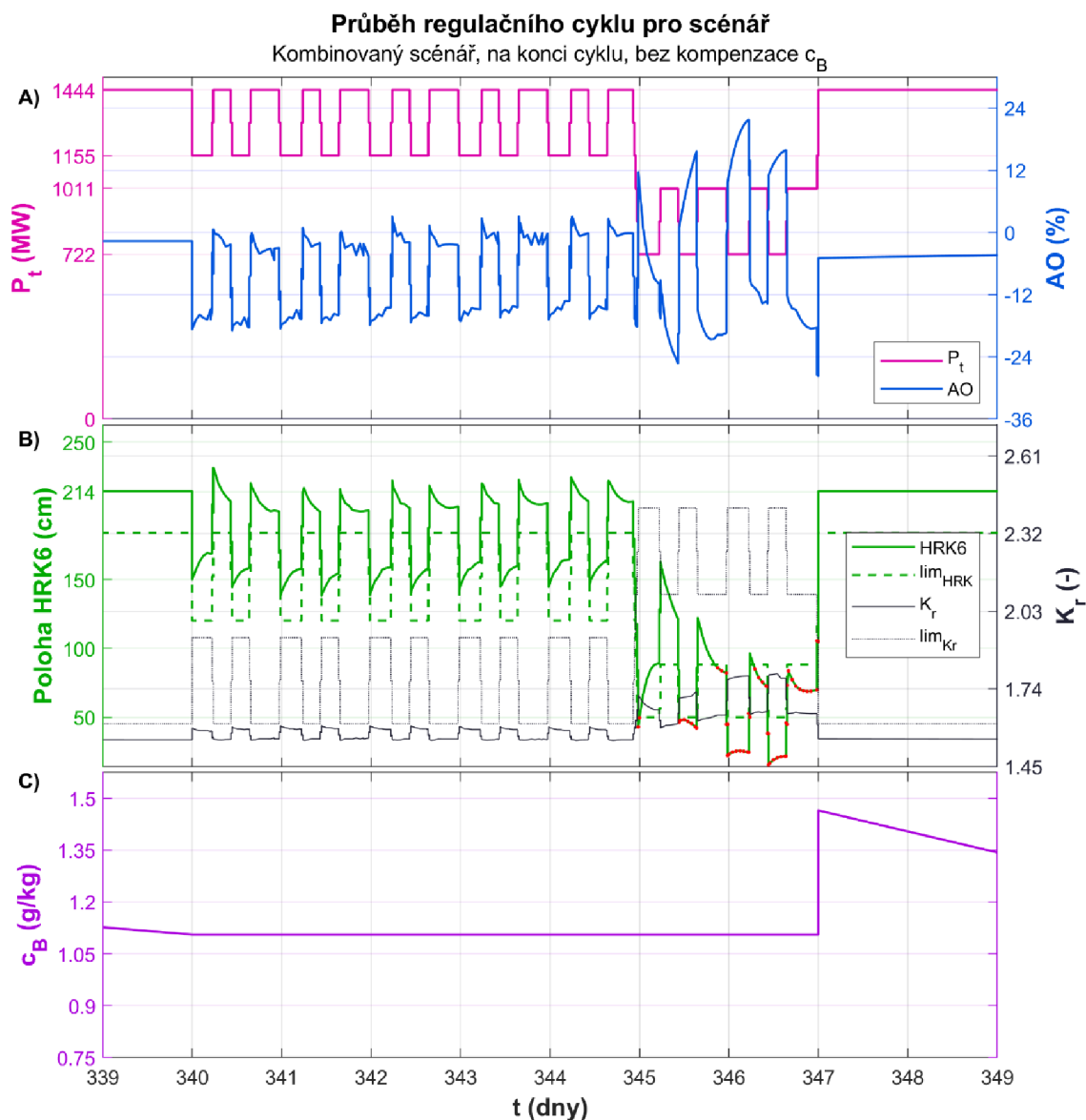
nižším výkonu má vyšší reaktivitu než na plném výkonu³⁹. Tuto přebytečnou reaktivitu regulují kazety dalším zasouváním až pod limitu danou *Limitami a Podmínkami bezpečného provozu reaktoru* [33], stěžejním provozním dokumentem. Zde je na místě poznamenat, že průběh v grafu (Obrázek 25 a Obrázek 26) **neodpovídá bezpečnostním podmínkám** a v praxi je nutné tento přechodový jev provést jiným způsobem (viz 5.3.3). Podobný efekt lze vidět po prudkém zvýšení výkonu zpět na 100 % N_{nom} . Dochází nejprve ke zvýšení reaktivity vlivem vyhoření nahromaděného xenonu a teprve po několika hodinách ke snížení reaktivity díky vyšší produkci jódu, který se mění na xenon. Na tento přechodový jev reagují regulační kazety opět způsobem, který se neslučuje s předepsanými podmínkami, jelikož jejich poloha významně podkročuje stanovenou limitu. Po odeznění přechodného jevu dochází k ustalování polohy HRK v poloze blízké nominálnímu stavu (214 cm). Tento jev souvisí s ustalováním stacionární xenonové otravy na hladině, která je srovnatelná se stavem před regulací výkonu.

Průběh xenonového přechodného děje má vliv i na hodnotu axiálního ofsetu. Jeho hodnota je z největší části diktována polohou HRK6, přesto dojde v jednu chvíli k přelítí výkonu výrazně a výjimečně do horní poloviny. To je způsobeno předcházejícím vytlačněním výkonu do spodní poloviny absorpčními kazetami a vybudováním vyšší zásoby xenonu právě v dolní polovině (xenonové oscilace). Když následně došlo k zasunutí regulačních kazet hlouběji pod polovinu aktivní zóny (v rozporu s limitami), setřel se rozdíl mezi reaktivitou horní a spodní části a vliv xenonu převládl nad vlivem HRK6. Z hlediska bezpečnosti je zde podstatné, zda xenonové oscilace po ukončení přechodového jevu samovolně odezní, nebo zda se reaktor výkonově „rozkýve“, tedy kmitání pokračuje dalších několik dní nebo se dokonce zvětšuje jeho amplituda⁴⁰. Zde je vidět, že výkmit odezní po první půlperiodě po ukončení přechodového děje. Znamená to tedy, že z hlediska tlumení xenonových oscilací je reaktor dobře tlumený a bezpečně stabilní.

V okamžik, kdy je těžiště výkonu v horní části, ale konec HRK blízko dna aktivní zóny je z hlediska bezpečnosti problematický, protože změna polohy HRK má jen malý vliv na změnu výkonu. Pokud by tak došlo k nárůstu neutronového toku, regulační systém by nemohl dost rychle reagovat a mohlo by dojít k havarijnímu odstavení. Proto je dodržování limit pro polohu HRK důležité.

³⁹ Záporný výkonový koeficient reaktivity je jednou z hlavních podmínek bezpečného provozu reaktoru.

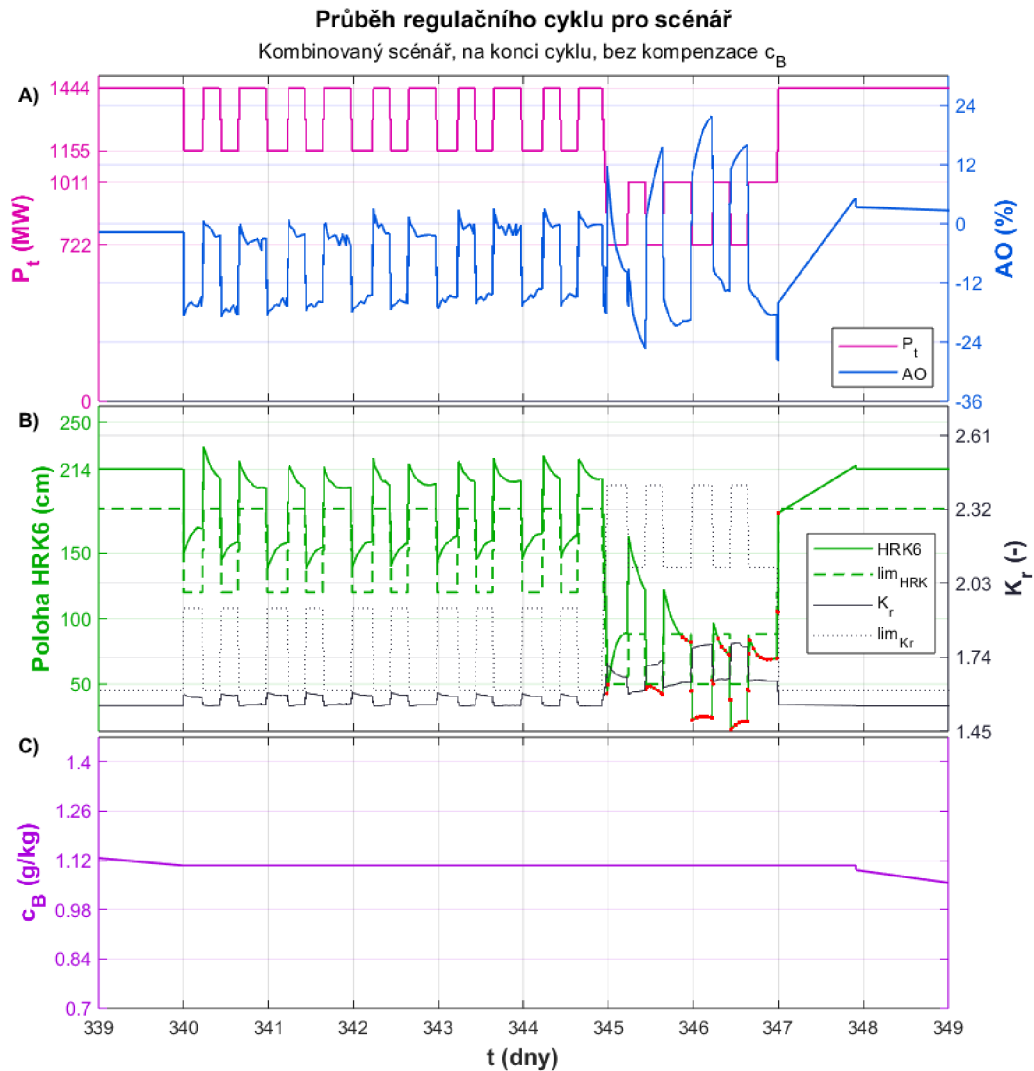
⁴⁰ V takovém případě by bylo třeba oscilace aktivně tlumit a znamenalo by to významné bezpečnostní riziko. Lokálně by totiž mohlo dojít k překročení lineárního výkonu proutku nebo maximální teploty pokrytí paliva i při nominálním výkonu reaktoru jako celku.



Obrázek 27: Kombinovaný scénář na konci cyklu bez kompenzace c_B

Vliv xenonu je vidět i na grafu (Obrázek 27), který představuje průběh kombinovaného scénáře. Každá změna výkonu vyvolává přechodný jev, který má charakter exponenciálně tlumeného zákmitu a je kompenzovaný polohou HRK6. Během víkendového snížení výkonu vidíme podobný jev jako u jednoduššího týdenního scénáře (Obrázek 26), tedy postupné vykompenzování snížené stacionární xenonové otravy pomocí HRK6 až pod limitní polohu. Další nesrovnalosti, která s xenonovým přechodným jevem souvisí, je průběh po skončení regulačního cyklu. Zde je výpočtově nastavena poloha HRK6 na 214 cm, ale jelikož reaktor není v ustáleném stavu, program dopočítá koncentraci H_3BO_3 pro kritický stav. Tento velký rozdíl, přibližně 0,4 g/kg c_B plus vyhoření během regulačního cyklu, které také snižuje reaktivitu. Vliv xenonu je tedy velký a nelze jej jen tak zanedbat. Abychom se tohoto zkreslujícího jevu alespoň částečně zbavili, prodloužíme výpočet pro polohu HRK6 jako kritický parametr o další den, aby bylo

možné přejít na výpočet kritické koncentrace kyseliny borité. Hlavním zdrojem zkreslení je totiž nárůst c_B , což neodpovídá realitě. Plné odeznění přechodného děje je však dlouhodobou záležitostí, kterou se nebudeme zabývat - pro srovnání na začátku kampaně se počítá s ustálením stacionární xenonové otravy a zastruskování po 40 dnech provozu na konstantním výkonu. Částečné vyhlazení přechodu na výpočet s konstantní polohou HRK6, které je zapříčiněno odbouráním značné části xenonu, je zobrazeno na následujícím grafu (Obrázek 28):

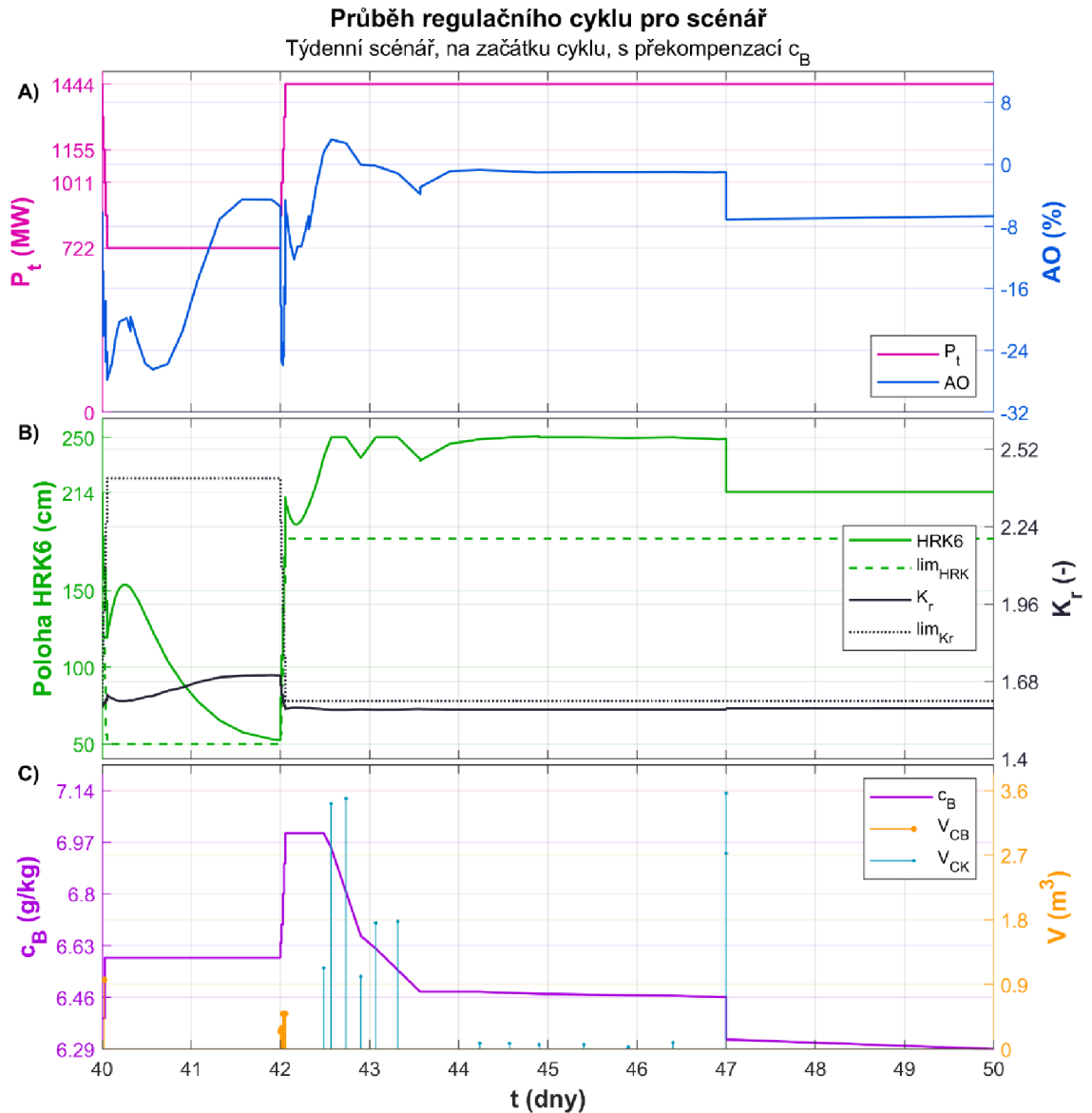


Obrázek 28: Kombinovaný scénář na konci cyklu bez kompenzace c_B s vyhlazením přechodu

5.3.3 Překompensace c_B

Jak bylo zmíněno výše, překompensace pomocí kyseliny borité je nástroj, kterým se kompenzuje nárůst reaktivity při změnách výkonu v okamžiku, kdy kompenzace regulačními kazetami není kvůli limitní poloze možná. Jelikož výpočetní program MOBY-DICK s limitními polohami HRK nepočítá, je nutné ve vhodném výpočetním kroku zadat zvýšenou koncentraci do vstupního souboru manuálně. Z důvodů, které již

byly uvedené, je snaha změny koncentrace H_3BO_3 minimalizovat na nezbytné minimum, proto je stanovování kýžené hodnoty c_B iteračně-empirický proces bez unikátního správného řešení.

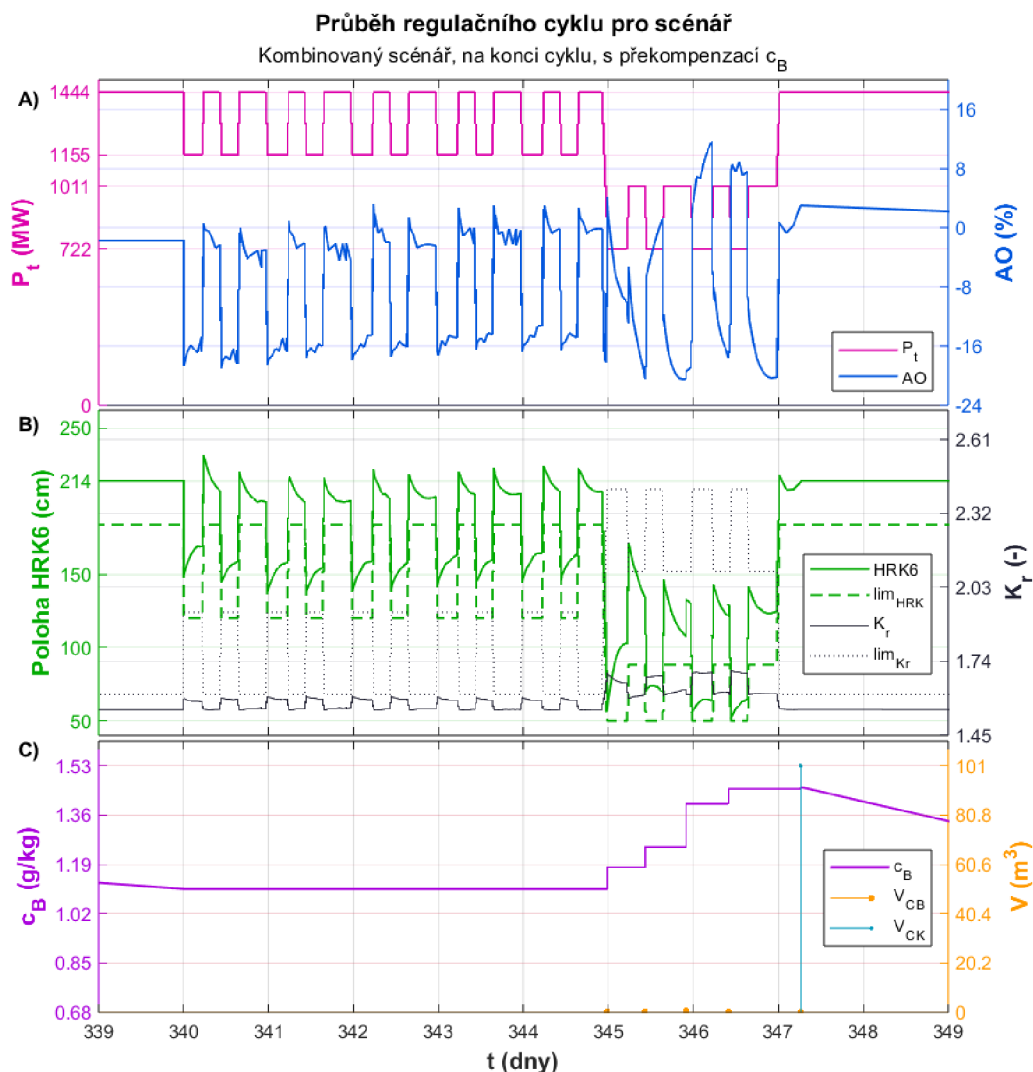


Obrázek 29: Týdenní scénář na začátku cyklu s překompensací c_B

Zvyšování koncentrace probíhá v několika krocích v časech, kdy by podle výpočtu bez použití překompensace (Obrázek 25) došlo k podkročení limitní polohy. Celkově došlo k navýšení koncentrace z počátečních 6,39 g/kg na 7,0 g/kg. Následně byla koncentrace opět postupně snižována, jelikož po skončení přechodného jevu poklesne reaktivita v aktivní zóně z důvodu stacionární xenonové otravy, jak je popsáno výše (2.2.2). Změny reaktivity jsou vyrovnávány přednostně vytahováním kazet HRK, ale po jejich vytažení do horní koncové polohy (250 cm) přechází výpočetní program MOBY-DICK automaticky na výpočet kritické koncentrace kyseliny borité. Pro další vnos kladné

reaktivity je tedy třeba naředit chladivo primárního okruhu čistým kondenzátem, čímž se sníží c_B . Celkové množství koncentráту 40 g/kg, které bylo použito pro překompensaci není vysoké, jsou to necelé 4 m³. Množství čistého kondenzátu, který je potřeba na opětovné zředění chladiva primárního okruhu, je podstatně vyšší, jelikož rozdíl koncentrací chladiva a doplňovaného média je menší.

Podobným způsobem je provedena překompensace pro kombinovaný scénář zmíněný výše (Obrázek 28):



Obrázek 30: kombinovaný scénář na konci cyklu s překompensací c_B

Zde je na místě upozornit na to, že toho, že je průběh ve variantě na konci kampaně a množství doplněné kyseliny borité je poměrně velké, zředění chladiva primárního okruhu na původní hodnotu plus kompenzace vyhoření za dobu regulačního cyklu vyžaduje přidání 100 m³ čistého kondenzátu⁴¹.

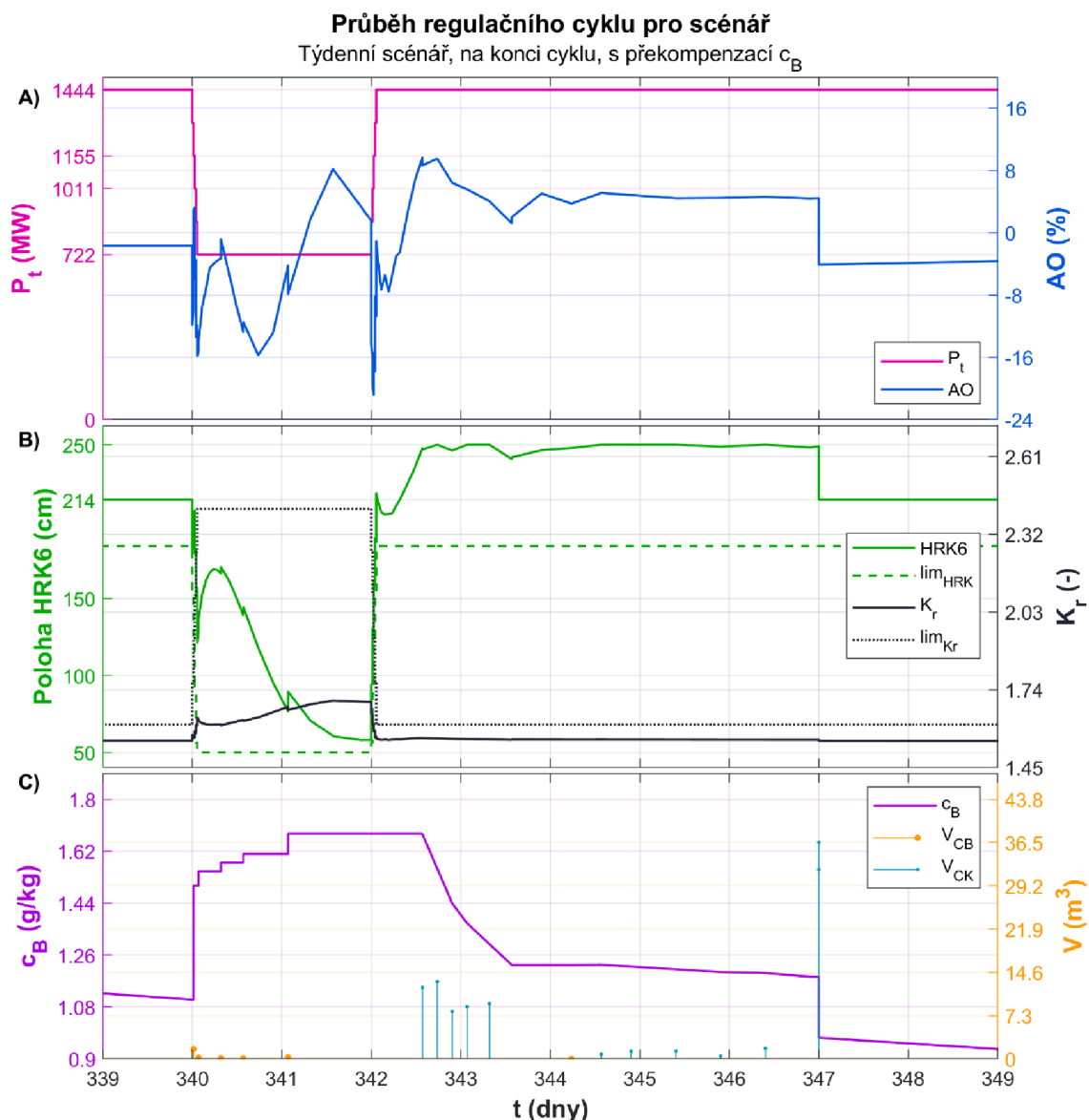
⁴¹ To také znamená nutnost zpracovat 100 m³ tekutého radioaktivního odpadu.

Překompenzace má také vliv na ostatní parametry, zejména axiální ofset a koeficient nerovnoměrnosti K_r . Axiální ofset je z největší části řízen polohou HRK, proto není překvapivé, že je ovlivněn i koncentrací c_B , která právě pohyb HRK kompenzuje. Kompenzace kyselinou boritou má za následek snížení rozptylu axiálního ofsetu, jehož výkyvy dosahují přibližně o třetinu menších hodnot. Je to dáno tím, že oproti snižování reaktivity pomocí HRK dochází k potlačování výkonu více rovnoměrně⁴². Těžiště výkonu tak zůstává blíže fyzickému středu aktivní zóny, což přispívá stabilitě z hlediska xenonových oscilací. Vlivem menších výkonových rozdílů je tak nižší i nerovnoměrnost výkonu K_r , a to přibližně o 5 %. Tyto parametry sice nejsou pro uvažovaný scénář omezující, ale ilustrují komplexní děje v aktivní zóně.

5.3.1 Vliv fáze kampaně

Na sledované veličiny má zásadní vliv to, ve které fázi kampaně dojde k provedení regulačního cyklu. Parametrem, který tento rozdíl reflektuje, je vyhoření paliva. Vyšší vyhoření paliva má za následek konsekvence nižší koncentraci kyseliny borité, což vede k vyšším objemům čistého kondenzátu na ředění c_B , jak je vidět v grafu (Obrázek 31). Pro srovnání, stejný průběh na začátku kampaně (Obrázek 29) vyžadoval na ředění chladiva primárního okruhu přibližně jednu desetinu objemu čistého kondenzátu. Na konci cyklu je také potřeba nepatrně méně koncentráту kyseliny borité, která je nutná pro doplnění o požadovanou koncentraci, ale tento rozdíl není příliš znatelný.

⁴² Kyselina boritá působí v celém objemu přibližně stejnou měrou, zatímco efekt regulačních kazet je silně lokální.



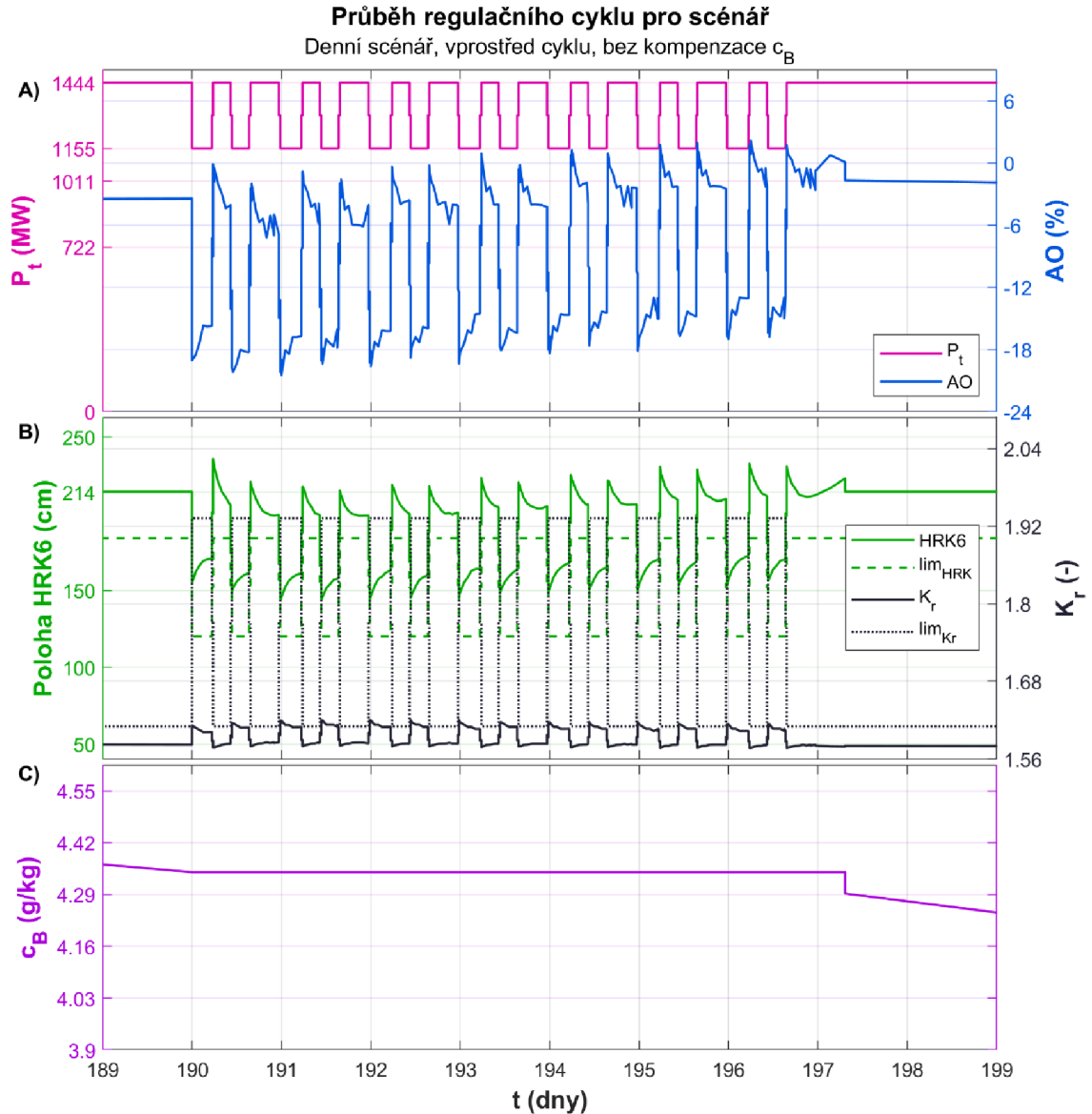
Obrázek 31: Týdenní scénář na konci cyklu s překompenzací c_B

Dalším parametrem, který je ovlivněn fází kampaně, je axiální ofset, tedy těžiště výkonu aktivní zóny. Oproti průběhu na začátku kampaně je posunut o jednotky procent směrem k horní polovině. Je to způsobeno především tím, že spodní polovina, která má standardně vyšší výkon než horní polovina, dosahuje na konci kampaně vyššího vyhoření, zatímco v horní části je palivo relativně čerstvější. Stále je však výkon dominantně realizován ve spodní části aktivní zóny, pokud jsou HRK ve výchozí poloze 214 cm.

S rozložením výkonu souvisí i koeficient K_r , který dosahuje na konci kampaně o něco nižších hodnot. To je způsobeno tím, že palivo v nejexponovanějších oblastech ve středu aktivní zóny a na okrajích kazet už dosáhlo poměrně velkého vyhoření, takže nemá takovou reaktivitu.

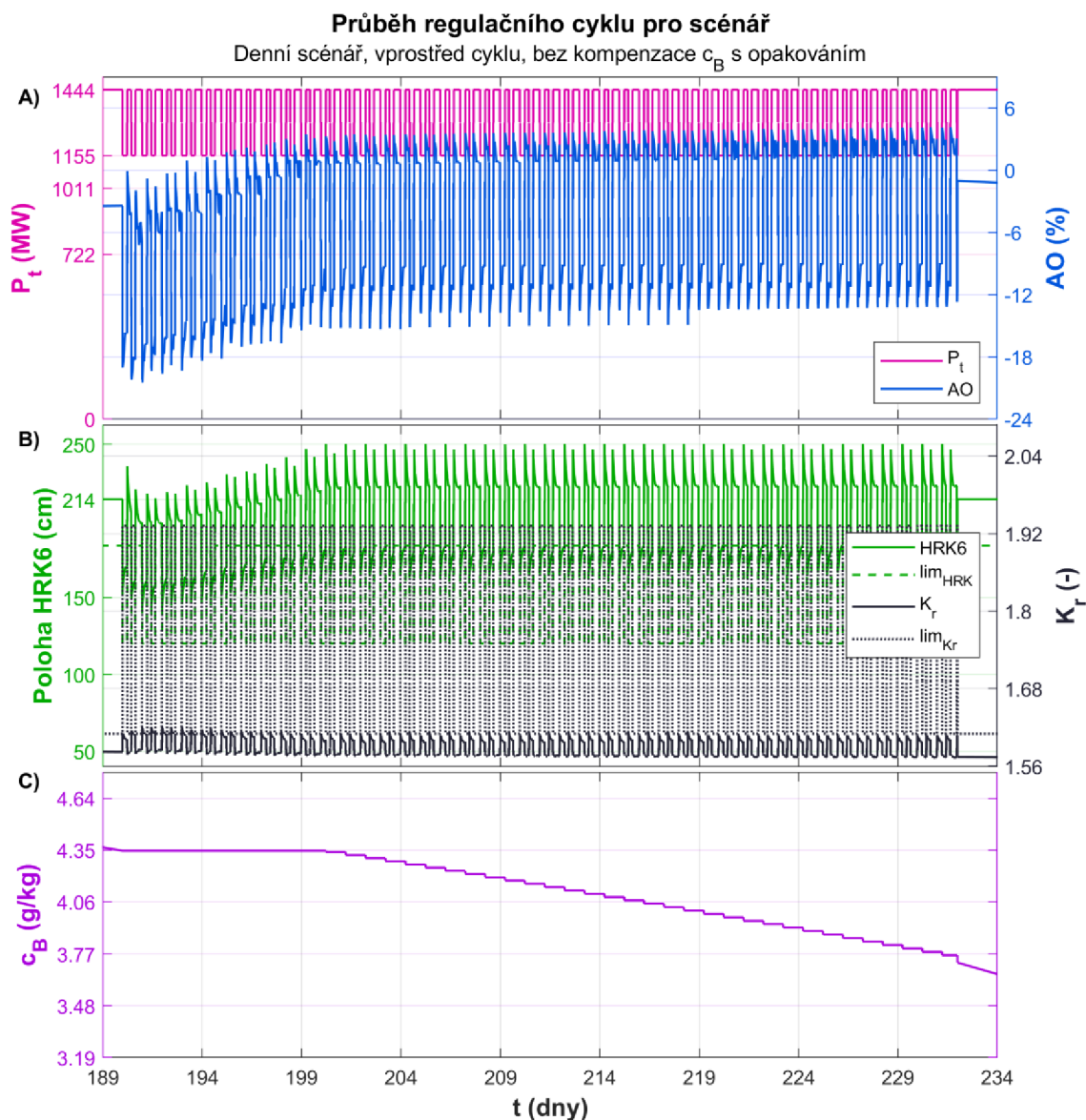
5.3.2 Opakování regulačních cyklů

Některé dlouhodobější jevy a vlivy související s vyhořením se projeví až při několika opakovaných průbězích regulačního cyklu.



Obrázek 32: Denní scénář vprostřed cyklu bez kompenzace c_B

U denního scénáře byl největší předpoklad pro vznik xenonových oscilací, vlivem podobné frekvence kmitů a plánovaných výkonových změn. Podle grafu (Obrázek 33) se ale tato možnost nepotvrdila, zejména proto, že dukovanský reaktor je pro vznik nestabilních oscilací příliš malý.



Obrázek 33: Periodicky opakovaný denní scénář vprostřed cyklu

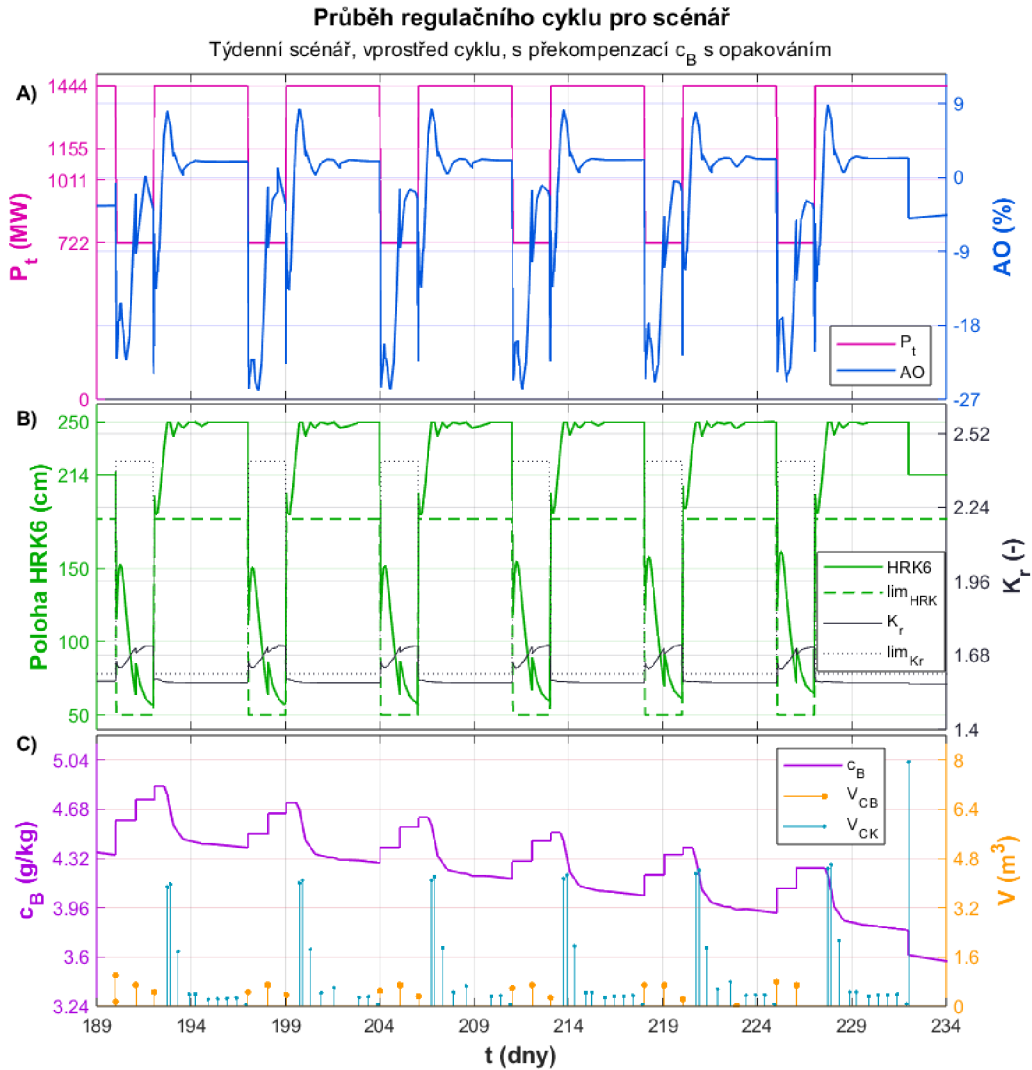
Z průběhu opakovaného denního scénáře (Obrázek 33) je vidět, že z režimu s konstantní koncentrací kyseliny borité přešel výpočet do kombinovaného režimu. Vlivem vyhoření paliva a neustálé potřeby vnosu kladné reaktivity se HRK6 neustále vysouvaly až dosáhly horní koncové polohy. V tu chvíli výpočet přešel na stanovení kritické hodnoty c_B , která opět zůstala konstantní do dalšího okamžiku, kdy si během zvýšení výkonu xenonový přechodný jev vynutil vytažení HRK na 250 cm. Působením tohoto výpočtového přechodu můžeme jednak posoudit rozdíl mezi kompenzací vyhořívání pouze pomocí HRK a pomocí c_B , jednak se můžeme zamyslet nad dalšími efekty, které toto uspořádání způsobuje.

V prvních přibližně deseti dnech provozu s řízením výkonu se postupně vysouvají HRK až do svého maxima. S tím souvisí posun axiálního offsetu k vyšším hodnotám, tedy přesun výkonu blíže středu aktivní zóny. Při dosažení horní koncové polohy dochází ke

stabilizaci průběhů jak polohy HRK, tak axiálního offsetu, které nyní oscilují kolem konstantní hodnoty podle změn výkonu. Z hlediska vyhoření je posun těžiště výkonu blíže fyzickému středu (přibližně kolem -5 %) aktivní zóny pozitivní. Lze tedy poznamenat, že provoz s vyšší koncentrací H_3BO_3 má z dlouhodobého pohledu pozitivní vliv na rovnoměrnost vyhořívání paliva.

Zároveň je setrvání na konstantní hodnotě c_B během vyhořívání paliva jedinou možností, jak zvýšit podíl kyseliny borité na omezování reaktivity bez nutnosti doplňování koncentráту H_3BO_3 . Zobrazený průběh, přestože jeho přesná podoba je dána především omezeními plynoucími ze zadání výpočtu, může v jistém ohledu odpovídat případnému provoznímu procesu. Je však nutné poznamenat, že pro každý provozní stav je třeba splnit řadu dalších bezpečnostních hledisek, které souvisí s dynamikou reaktoru a jsou mimo rámec této práce.

Trochu jiná situace nastává v následujících případech, které simulují opakování regulačních cyklů týdenního a kombinovaného scénáře.

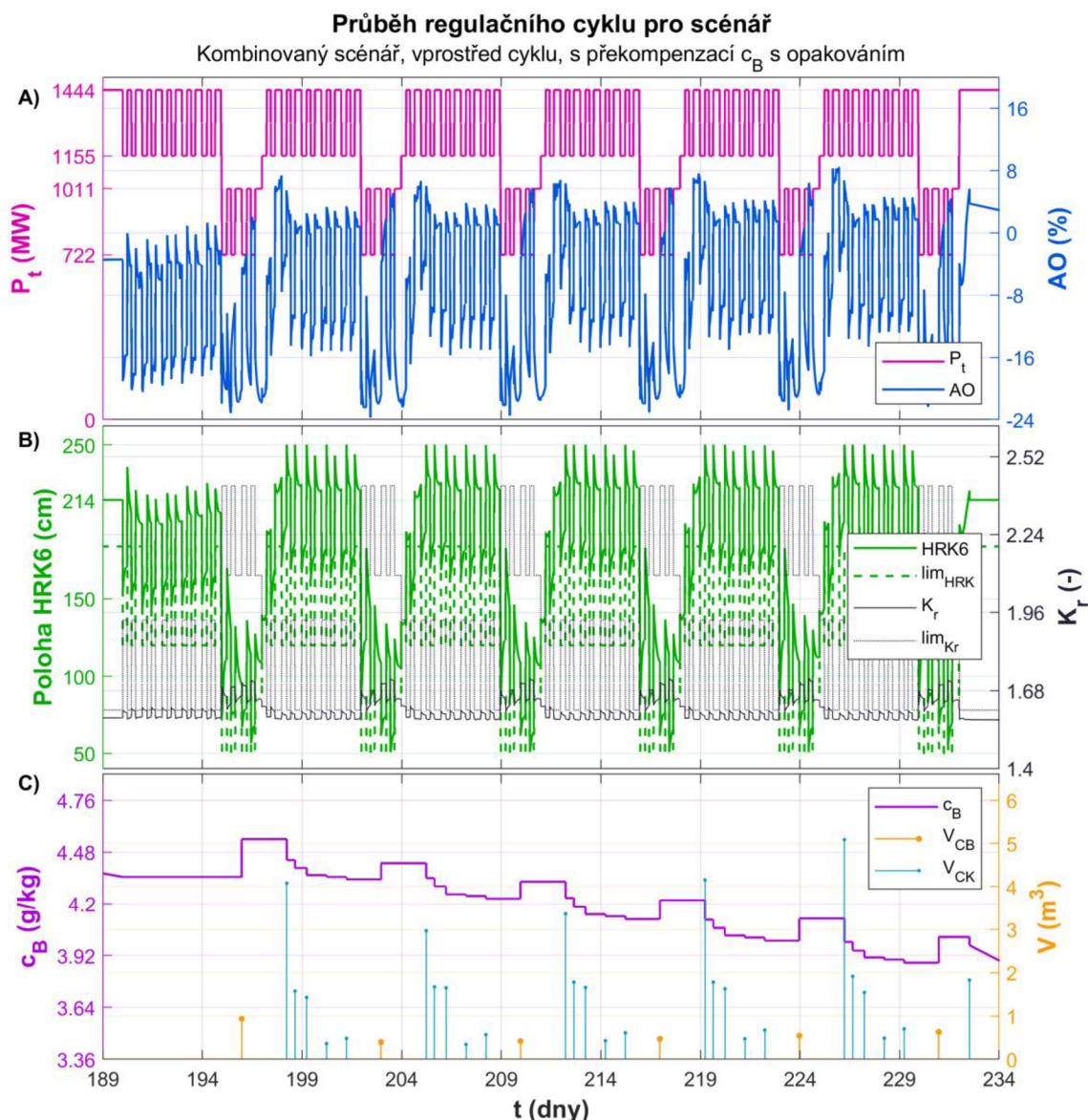


Obrázek 34: Týdenní scénář uprostřed cyklu s překompensací c_B a s opakováním

V grafu (Obrázek 34) je vidět, jak by vypadalo šest po sobě jdoucích regulačních cyklů týdenního scénáře někdy uprostřed kampaně. Je znát, že v rámci každého víkendového provozu je třeba kompenzovat nárůst xenonu zvýšením koncentrace H_3BO_3 , aby nebyly překročeny stanovené limity pro polohu HRK6. Zároveň je však vidět, že potřebná koncentrace c_B se každý odsimulovaný týden snižuje, jak roste vyhoření paliva. Zároveň je ovšem třeba po opětovném dosažení nominálního výkonu a stabilizaci stacionární xenonové otravy na vyšší úrovni hodnotu c_B opět snížit, protože HRK6 dosahují horní koncové polohy a stále je třeba zvýšit reaktivitu. Dochází tak k opakovanému doplňování a ředění kyseliny borité v chladivu primárního okruhu. Nelze se tomu vyhnout, protože neexistuje jedna koncentrace, která by mohla být konstantní po celou dobu regulačního cyklu, nebo jeden trend, se kterým by se mohla snižovat. Na jedné straně narážíme na provozní limity, které brání dalšímu zasunutí HRK⁴³, na straně druhé na stav, kdy je třeba přidat kladnou reaktivitu ještě i přes to, že jsou HRK plně vytaženy. Jak již bylo vysvětleno výše, při provozu je snaha změny koncentrace H_3BO_3 co nejvíce omezit kvůli náročnosti pomocných systémů a množství vzniklých radioaktivních materiálů.

Vlivem velkých výkonových změn je poloha HRK6 během provozu na plném výkonu téměř stále v horní koncové poloze, což má za následek posun axiálního offsetu směrem vzhůru. Zároveň jsou zde vidět „zákmity“ v poloze HRK6. Mohlo by se zdát, že se jedná o tlumené xenonové oscilace, ale není tomu tak. Zákmity jsou dány výpočtovým krokem, se kterým se snižuje koncentrace c_B a který je v tomto případě v rozmezí 4-8 hodin. Z hlediska požadavků rozlišení výpočtu je tento krok dostatečný; pokud by byl významně zkrácen, došlo by k neúměrnému navýšení výpočetního času.

⁴³ Vzhledem k malé „váze“, kterou má poslední část kazety by ani zasunutí do spodní koncové polohy nemuselo stačit na uřízení reaktoru.



Obrázek 35: Kombinovaný scénář vprostřed cyklu s překompenzací c_B a opakováním

Na průběhu (Obrázek 35) jsou vidět podobné efekty jako v předchozím případě (Obrázek 34). Oproti předchozímu případu je zde výraznější efekt, kdy s klesající koncentrací kyseliny borité roste objem čistého kondenzátu, který je potřeba na ředění chladiwa primárního okruhu. Tento dojem může být však zkreslený tím, že hodnota koncentrace c_B pro překompenzaci je empiricky zjištěná. Proto velikost „schodu“ v koncentraci, se kterou objem média souvisí podle rovnice (10), může být v závislosti na úspěšnosti iteračního procesu vyšší, než by bylo nebytně nutné.

5.3.3 Posun axiálního ofsetu

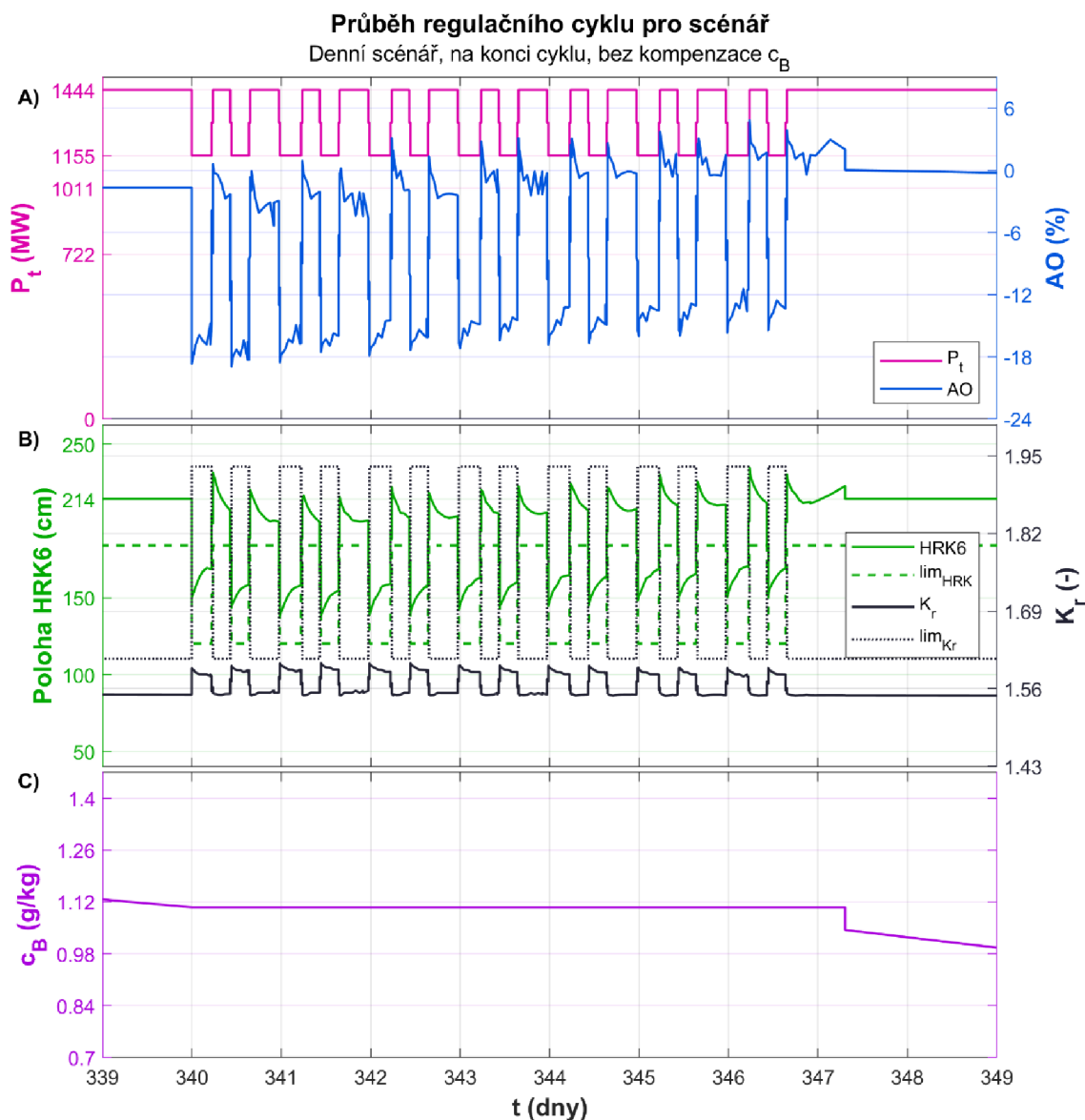
Při snížení výkonu dojde vždy i ke snížení hodnoty axiálního ofsetu. Jednak je v horní části výkon výrazně potlačen zasunutím absorpčního materiálu regulačních kazet, jednak

je reaktivita ve spodní části povzbuzena vtokem ještě studenější vody⁴⁴ s lepšími moderačními vlastnostmi. Tento jev je zřejmý a je důvodem, proč je pro dlouhodobé řízení reaktivity vhodnější používat rozpustné absorbatory.

Ve všech dlouhodobých průbězích (viz Obrázek 21, Obrázek 33, Obrázek 34, Obrázek 35) je dále vidět, že průběh axiálního offsetu se posouvá směrem nahoru. Tento posun je způsoben tím, že je těžiště výkonu dominantně ve spodní polovině aktivní zóny, což vede k vyššímu vyhoření právě ve spodní polovině a následnému posunu výkonu nahoru. Tento jev je zejména patrný, když dojde k úplnému vytažení HRK, čímž dojde k uvolnění kladné reaktivity v méně vyhořelém palivu v horní polovině.

Dalším jevem, který má na axiální offset také vliv je konec regulačního cyklu. Na následujícím grafu (Obrázek 36) je vidět, že po skončení regulačního cyklu a navrácení HRK6 do původní polohy je těžiště výkonu posunuto o něco výše než před započítím přechodného děje.

⁴⁴ S klesajícím výkonem klesá i teplota primárního okruhu, zatímco tlak v sekundárním okruhu zůstává konstantní (viz 2.2.4)



Obrázek 36: Denní scénář, varianta na konci cyklu bez překompenzace

Nárůst hodnoty axiálního offsetu není velký, jedná se přibližně o 1,5 %, ale ani zdaleka jej nelze většinou přisoudit většímu vyhořívání spodní poloviny aktivní zóny. Tento efekt, jak lze odpozorovat z průběhu pro referenční scénář (Obrázek 21), způsobuje posun hodnoty o 4 % za celou kampaň, nejvíce pak během první poloviny. Tento nevýrazný, ale patrný posun připadá na vrub xenonu. Během regulačního cyklu totiž docházelo k posunu regulačních kazet častěji do nižších poloh než standardních 214 cm, což vedlo k realizaci výkonu více ve spodní části aktivní zóny. Z průběhu je vidět, že axiální offset, jehož hodnota byla před započítáním regulačního cyklu zhruba $-1,5\%$, během výkonových změn osciloval kolem hodnot -6% až -8% . Důsledkem toho bylo postupné nahromadění xenonu, který se během období plného výkonu nestačil zcela ustálit. Když tedy po skončení řízení výkonu došlo k opětovnému vytažení HRK6 do výchozí polohy, výkon se posunul o jeden a půl procentního bodu vzhůru. Na zmíněném grafu (Obrázek

36) není vývoj proměnných po skončení regulačního cyklu příliš patrný, ale v dalším výpočetním kroku se vlivem ustálení stacionární xenonové otravy axiální offset opět sníží.

5.4 Prodloužení kampaně

Je dobré popsat efekt, ke kterému dochází, když dojde ke snížení výkonu reaktoru na samém konci kampaně. Pokud se na krátký čas (v řádu vyšších jednotek až desítek hodin) sníží výkon, je možné potom protáhnout kampaň až za konec bóru⁴⁵ na plném výkonu bez provozu „na efektech“ (viz 3.1.1). Je to způsobeno tím, že při poklesu výkonu se sníží stacionární xenonová otrava, což umožní najet na plný výkon, i když je palivo už vyhořelé do té míry, že dlouhodobý provoz na 100 % N_{nom} už není možný. S tím, jak se koncentrace xenonu opět zvyšuje, je potom nutné přejít na provoz na efektech. Prodloužení doby kampaně tímto způsobem je ovšem neekonomické, jelikož energie, kterou získáme „navíc“, je menší než energie, kterou ztratíme předchozím snížením výkonu.

⁴⁵ Okamžik, kdy jsou HRK plně vytaženy a koncentrace H_3BO_3 je rovna nule

6. ZHODNOCENÍ

6.1 Bezpečnostní hledisko

Při vyhodnocování efektů poskytování flexibility je třeba vždy zvážit na prvním místě bezpečnostní hledisko. Bezpečnostní parametry jsou z hlediska provozu jaderné elektrárny pochopitelně nejdůležitější, ale díky její konstrukci jsou to také parametry, které mají největší rezervu a jejich překročení při dodržení předepsaných rychlostí není pravděpodobné. Jelikož jsme tedy při tvorbě scénářů respektovali maximální možnou rychlost změny výkonu, teplotu chladiva a další parametry, nedošlo v žádném z případů k překročení sledovaných bezpečnostních parametrů. Většina bezpečnostních parametrů, které byly sledovány, se týkají paliva - zejména výkonu a jeho rozložení, z čehož plyne teplota palivového pokrytí.

Koeficient nerovnoměrnosti výkonu K_r , který reprezentuje relativní výkon nejzatíženějšího proutku, byl pod povolenou limitou za všech okolností. Vlivem toho, že limitní hodnota je výkonově závislá, byla rezerva dokonce během výkonových změn větší než při nominálním provozu, a to u všech popsaných scénářů.

Lineární výkon elementu má oproti koeficientu K_r větší potenciál být na výkonové změny citlivý, protože nejzatíženější element po výšce je více závislý na pohybu HRK. Pro scénáře, kde byl lineární výkon vyhodnocen, nedošlo k překročení limitní hodnoty, přestože se rezervy oproti referenční variantě snížily přibližně o třetinu. Velký vliv na tento parametr má zejména fáze kampaně, ve které k regulačnímu zásahu dochází. Čerstvé palivo je v tomto ohledu významně náchylnější k vyšším lineárním výkonům než palivo s vyšším stupněm vyhoření v pozdějších fázích kampaně. V tomto parametru mají reaktory VVER oproti západním PWR obecně výhodu, protože mají menší hustotu výkonu - na stejný výkon mají větší objem. Na jeden element paliva potom připadá menší výkon a reaktor je tak z hlediska výkonové rezervy výrazně bezpečnější.

Posledním kritériem, které jsme zkoumali a které lze označit za bezpečnostní, je vyhodnocení xenonových oscilací. Podle předpokladu se zde prakticky neprojeví, protože dukovanský reaktor je na ně příliš malý. Všechny sledované xenonové přechodné jevy odezněly v první půlperiodě, nedošlo tedy k žádnému rozvoji nestability.

Při interpretaci bezpečnosti navrženého postupu je potřeba mít na paměti, že se jedná o výčet některých parametrů, který není kompletní a pro stanovení bezpečnosti by bylo třeba vypočítat i dynamické bezpečnostní parametry. Jedním z nich, který je důležitý pro bezpečnostní hodnocení, je bezpečnostní zásoba podkritičnosti, která vyjadřuje schopnost reaktoru bezpečně zastavit řetězovou štepňovou reakci v kterémkoli okamžiku i při zaseknutí regulačního orgánu s největší vahou.

6.2 Ekonomicko-provozní hledisko

Z provozního pohledu je třeba kompenzovat polohu HRK koncentrací kyseliny borité, aby nedošlo k podkročení její limity. Jak už bylo řečeno výše, překompence kyselinou boritou je problémem zvláště z hlediska náročnosti pomocných systémů, vzniku radioaktivního odpadu a omezené rychlosti doplňování. Překompencaci je tedy vhodné se vyhnout, pokud to je možné. Z tohoto hlediska jsou opakované průběhy, které překompencaci vyžadují, pro provoz nevhodné.

Z výsledků je zřejmé, že denní scénář v žádné své variantě překompencaci nevyžaduje, jelikož při něm nedochází k tak výrazným výkonovým skokům. Naproti tomu týdenní scénář je nutné kompenzovat při každém průběhu poměrně výrazně, přibližně o 0,7 g/kg. Obzvláště při opakovaném cyklování přes několik týdnů je to problematické, protože to klade zvýšené nároky na celý systém doplňování H_3BO_3 a udržování chemického režimu. Kombinovaný scénář ve všech svých variantách také vyžaduje pro splnění provozních limit polohy HRK6 překompencaci, množství doplňované kyseliny borité je ale menší než u týdenního scénáře, a to přibližně o polovinu. Je to dáno zejména tím, že vlivem častějších změn není stacionární xenonové otrava během pracovního týdne tak vysoká a během víkendu neklesá tak hluboko.

Pokud bychom tedy brali v úvahu pouze vliv doplňování a ředění c_B , nejvhodnější pro opakované cyklování by bylo využití denního scénáře poskytování flexibility, případně kombinovaného a nejméně vhodné potom použití týdenního scénáře. Pokud by bylo třeba provádět i větší výkonové změny, je lépe je provádět na začátku kampaně, kdy pro změnu koncentrace kyseliny borité není třeba použít tolik média a negativní dopady ředění jsou tak méně významné než na konci kampaně. Z hlediska bezpečnosti je při výkonových změnách s čerstvým palivem sice menší ale stále dostatečná rezerva lineárního výkonu.

Ještě důležitějším kritériem, které má vliv zejména na ekonomickou stránku regulace, je však množství nedodané energie. Jelikož elektrická energie je komodita, jejíž prodej elektrárně zajišťuje veškerý příjem, je jakékoli snížení výkonu zásadním zásahem do ekonomiky. Tím spíše, že elektrárna má velmi nízké variabilní náklady související s výstupním výkonem oproti fixním nákladům. Pro porovnání můžeme vyhodnotit množství nedodané energie jako integrál z nedodaného výkonu za jeden regulační cyklus (jeden týden provozu).

Týdenní scénář počítá se snížením výkonu na 50 % N_{nom} po dobu dvou dnů, nedodaná energie tedy činí přesně 1 efektivní den⁴⁶.

Denní scénář předepisuje snížení výkonu na 80 % N_{nom} po dobu 11 hodin každý den, nedodaná energie činí v souhrnu 0,64 efektivního dne za každý simulovaný týden.

⁴⁶ Vyrobená energie za jeden den provozu na 100 % N_{nom}

Kombinovaný scénář je v tomto ohledu nejvýznamněji ovlivněn, jelikož nedodaná energie za jeden týdenní cyklus oproti referenčnímu scénáři činí 1,21 efektivního dne⁴⁷.

Vzmemme-li tedy ohled zejména na tento parametr, nejefektivnější variantou je stále cyklování podle denního scénáře, dále s odstupem týdenní scénář, a nakonec kombinovaný scénář, u něž by bylo pro udržení smysluplného provozu třeba finančně kompenzovat největší množství nedodané energie.

⁴⁷ Hodnoty jsou počítány včetně postupných změn výkonu po rampě dolů a nahoru (viz 5.2.1)

7. ZÁVĚR

V práci byly navrženy a popsány různé scénáře poskytování flexibility, podle kterých byla provedena simulace řízení výkonu. Výsledky ukázaly, že použití jaderného reaktoru v Dukovanech pro poskytování výkonové flexibility je možné, nevede k narušení sledovaných bezpečnostních limit a lze jej provést i v rámci současného provozního uspořádání. Jako zdaleka nejvhodnější se ukazuje varianta denního scénáře bez velkých výkonových skoků. Z hlediska ekonomického se však zdá být tato služba poměrně nákladná a v současné době, kdy je na trhu stále dostatek fosilních výroben, které jsou schopny flexibilitu poskytovat jednodušeji a levněji, se její využívání u současných bloků nezdá být perspektivní.

Nejprve byl podrobně vysvětlen důvod potřeby flexibility v síti a různé podoby služeb, které tuto potřebu naplňují. Dále byl popsán mechanismus řízení výkonu v lehkovodních reaktorech se zvláštním zaměřením na tlakovodní reaktory. Společně s možnostmi regulace byly představeny i omezující parametry, které jsou specifické pro jaderné elektrárny. Následně byly popsány zkušenosti s poskytováním flexibility z ostatních zemí, zejména z Německa a Francie.

V další kapitole byla popsána specifika jaderné elektrárny Dukovany se zaměřením na bezpečnostní parametry, na které jsou reaktory navrženy a které jsou implementovány do provozních předpisů. Pro objasnění výpočetní metodiky byl představen program MOBY-DICK, princip jeho funkce a struktura vstupního a výstupních souborů v takové formě, která umožňuje podrobné sledování a replikování použitého postupu bez předchozí znalosti výpočetního softwaru.

Ve čtvrté kapitole byly podrobně představeny relevantní parametry, jejichž hodnota je sledována a omezena provozně-bezpečnostními předpisy. Dále bylo přistoupeno k vytvoření tří scénářů poskytování flexibility s několika variantami, které jsou založeny nejen na ekonomickém základě, ale jsou srovnány i s dostupnými historickými daty ukazujícími praxi v jiných evropských zemích a v rychlosti a rozsahu výkonových změn respektují deklarované schopnosti dukovanských bloků.

V následující kapitole potom byly představeny výsledky simulací s důkladným popisem sledovaných veličin zaměřeným na postup získání a zpracování dat z výstupních souborů. Při popisu jevů, které během aplikace scénářů probíhají, je kladen důraz zejména na jejich srozumitelnou interpretaci, rozlišení vlivu použitého softwaru a upozornění na možné zavádějící dojmy plynoucí ze sledovaných průběhů.

V poslední kapitole práce představuje zhodnocení dosažených výsledků ze dvou úhlů pohledu: bezpečnostního a provozně-ekonomického. V rámci bezpečnostního hodnocení konstatuje, že ze sledovaných scénářů žádná varianta provozu nepřekračuje limitní hranici stanovenou bezpečnostními dokumenty. Zároveň však nebere v úvahu důležité parametry, které by bylo třeba zpracovat softwarem specializovaným na bezpečnostní hodnocení a bez kterých nelze dospět ke kvalifikovanému závěru. Z hlediska provozně-

ekonomického jsou předpokládány jako hlavní vlivy množství nedodané energie a potřeba opakovaného doplňování a ředění kyseliny borité v chladivu primárního okruhu. Z popsaných hledisek potom vyplývá i doporučení aplikovat řízení výkonu na denní bázi s menšími výkonovými změnami.

Relevantní rozvoj této práce může spočívat zejména v tom, že bude provedena zevrubná bezpečnostní analýza pomocí specializovaného programu, která nejlépe přesně stanoví limitní způsob provozu nebo zcela vyloučí možnost narušení bezpečnostních limit popsanými výkonovými změnami. Dále by bylo vhodné podrobněji rozpracovat model sítě, ve kterém spolupracují obnovitelné zdroje s jadernými a zhodnotit chování sítě a benefity plynoucí z poskytování flexibility jaderným zdrojem. Nakonec autor doporučuje provést detailní ekonomickou rozvahu, která zohlední všechny relevantní náklady plynoucí z poskytování této služby a dojde transparentním postupem ke stanovení přiměřené kompenzace.

LITERATURA

- [1] NUCLEAR ENERGY AGENCY. *Technical and Economic Aspects of Load Following with Nuclear Power Plants*. Online. OECD. 2011. Dostupné z: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/load-following-npp.pdf>. [cit. 2023-11-28].
- [2] CANY, C.; MANSILLA, C.; MATHONNIÈRE, G. a DA COSTA, P. Nuclear contribution to the penetration of variable renewable energy sources in a French decarbonised power mix. Online. *Energy*. 2018, roč. 150, s. 544-555. ISSN 03605442. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.122>. [cit. 2023-11-28].
- [3] SKLENKA, Lubomír a HERALTOVÁ, Lenka. *Provozní reaktorová fyzika. 2.* přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05901-2.
- [4] *ELECTRIC GRID RELIABILITY AND INTERFACE WITH NUCLEAR POWER PLANTS*. Online. IAEA, 2012. ISBN 978-92-0-126110-6. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1542_web.pdf. [cit. 2023-11-28].
- [5] GORGJIJEV, Blaže a ČEPIN, Marko. *Nuclear Power Plant Load Following: Problem Definition and Application*. Online. Nuclear Energy for New Europe, 2011. Dostupné z: <https://arhiv.djs.si/proc/nene2011/pdf/506.pdf>. [cit. 2023-11-28].
- [6] *Operating Experience Assessment - Effects of Grid Events on Nuclear Power Plant Performance*. Online. NRC, 2003. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML0335/ML033530400.pdf>. [cit. 2023-11-28].
- [7] LAMARSH, John R. a BARATTA, Anthony J. *Introduction to nuclear engineering*. Third edition. Pearson new international edition. Harlow: Pearson, 2014. ISBN 978-1-29202-581-0.
- [8] *Keeping the balance: How flexible nuclear operation can help add more wind and solar to the grid*. Online. MIT Energy Initiative. 2018. Dostupné z: <https://energy.mit.edu/news/keeping-the-balance-how-flexible-nuclear-operation-can-help-add-more-wind-and-solar-to-the-grid/>. [cit. 2023-11-28].
- [9] *Zapojení českých jaderných elektráren do systému regulace činného výkonu*. Online, Bakalářská práce, vedoucí doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2015. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/39695/final-thesis.pdf?sequence=1>. [cit. 2023-11-28].
- [10] LOCATELLI, Giorgio; FIORDALISO, Andrea; BOARIN, Sara a RICOTTI, Marco E. Cogeneration: An option to facilitate load following in Small Modular Reactors. Online. *Progress in Nuclear Energy*. 2017, roč. 97, s. 153-161. ISSN 01491970. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.12.012>. [cit. 2023-11-28].
- [11] ČEPS. Pravidla provozování přenosové soustavy. Kodex PS. 2021.

- [12] ČESKO. Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon) - znění od 1. 7. 2023.
- [13] *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV, Příloha 3 kvalita napětí v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení*. Online. 2011. Dostupné z: <https://www.egd.cz/sites/default/files/2019-01/p%C5%99%C3%ADloha%203%20Kvalita%20nap%C4%9Bt%C3%AD%20v%20distribu%C4%8Dn%C3%AD%20soustav%C4%9B%20%E2%80%93%2011%202011.pdf>. [cit. 2023-11-28].
- [14] *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2017/1485 ze dne 2. srpna 2017, kterým se stanoví rámcový pokyn pro provoz elektroenergetických přenosových soustav*. Online. 2017. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R1485>. [cit. 2023-11-28].
- [15] RYGL, Sebastian. *Analýza dopadů změny řízení sekundární regulace - aFRR*. Diplomová práce. Praha: ČVUT, 2020.
- [16] LOKHOV, Alexey. *Load Following with Nuclear Plants*. Online. OECD - NEA, 2011. Dostupné z: <https://www.oecd-nea.org/nea-news/2011/29-2/nea-news-29-2-load-following-e.pdf>. [cit. 2023-11-28].
- [17] *Nuclear Power in France*. Online. WORDL NUCLEAR ASSOCIATION. 2021. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx>. [cit. 2023-11-28].
- [18] *Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ 2022)*. Online. ČEPS, 2022. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2023/5/Hodnoceni-zdrojove-primerenosti-elektrizacni-soustavy-CR-2022.pdf>. [cit. 2023-11-28].
- [19] *Electricity maps*. Online. 2023. Dostupné z: <https://app.electricitymaps.com>. [cit. 2023-11-28].
- [20] *ÉCO2mix - Toutes les données de l'électricité en temps réel*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.rte-france.com/eco2mix>. [cit. 2023-11-28].
- [21] *Additional Costs for Loadfollowing Nuclear Power Plants*. Online. ELFORSK, 2012. Dostupné z: <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/21094/additional-costs-for-load-following-nuclear-power-plants-elforskrapport-12-71.pdf>. [cit. 2023-11-28].
- [22] DAVID POLESNÝ, Marek Lutonský. *Z čeho vyrábíme elektřinu v Česku a jak je na tom Evropa. Větrm proti uhlí!*. Online. VTM.cz. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/z-ceho-vyrabime-elektřinu-v-cesku-a-jak-je-na-tom-evropa-vetrem-proti-uhli/sc-870-a-202450/default.aspx>. [cit. 2024-04-13].
- [23] *Energostat*. Online. Online data z energetiky. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energostat>. [cit. 2024-04-13].
- [24] *Table of Nuclides*. Online. Dostupné z: <https://atom.kaeri.re.kr/nuchart/?zv=1#>. [cit. 2023-11-28].

- [25] STACEY, Weston M. *Nuclear reactor physics*. 2nd ed., completely rev. and enlarged. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. ISBN 978-3-527-40679-1.
- [26] *Lastföljning i kärnkraftverk*. Online. ELFORSK, 2011. Dostupné z: <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/19886/lastfoljning-i-karnkraftverk-elforskrapport-2012-08.pdf>. [cit. 2023-12-02].
- [27] *Nuclear Plant Operation and Maintenance*. Online. Westinghouse Electric Company. 2023. Dostupné z: <https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/ap1000-pwr/operations-and-maintenance>. [cit. 2023-12-02].
- [28] *AREVA Design Control Document Rev. 2 - Tier 2 Chapter 03 - Design of Structures, Components, Equipment and Systems - Section 3.9 - 3.9.1*. Online. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1025/ML102571030.pdf>. [cit. 2023-12-02].
- [29] IAEA. *PRIS - Power Reactor Information System*. Online. IAEA. 2023. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/>. [cit. 2023-12-02].
- [30] *Non-baseload Operation in Nuclear Power Plants: Load Following and Frequency Control Modes of Flexible Operation*. Online. IAEA, 2018. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1756_web.pdf. [cit. 2023-12-19].
- [31] Inženýring a servis JE/Výpočty, ŠKODA JS a.s. *Příručka k programu MOBY-DICK*. Rev. 4. Plzeň, 2010.
- [32] MÁČA, Pavel. *Výpočetní analýza aktivní zóny jaderného reaktoru VVER-440*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2023.
- [33] *Limity a podmínky bezpečného provozu, A004a*. Blok 3. Jaderná elektrárna Dukovany, 2023. [cit. 2024-01-06].
- [34] *Yearly Report - English*. Online. OTE ČR. 2024. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/en/statistics/yearly-market-report?date=2023-01-01>. [cit. 2024-01-10].
- [35] *Neutronově-fyzikální charakteristiky - 35. cyklus, 3A006j*. Jaderná elektrárna Dukovany, 2022. [cit. 2024-03-06].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

ČR	Česká republika
ČEPS	Česká elektroenergetická přenosová soustava
FCR	frequency containment reserve (rezerva pro udržení frekvence)
FRR	frequency restoration reserve (rezerva pro obnovení frekvence)
aFRR	automatic FRR (automatická rezerva pro obnovení frekvence)
mFRR	manual FRR (manuální rezerva pro obnovení frekvence)
RR	replacement reserve (zálohy pro náhradu)
ENTSO-E	Evropské sdružení provozovatelů přenosových soustav
PWR	tlakovodní reaktor západního typu
VVER	tlakovodní reaktor východního typu
EdF	Électricité de France
HRK	Havarijní a regulační kazeta
EDU3	3. blok jaderné elektrárny Dukovany
OZE	obnovitelné zdroje energie
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii

Symbole:

f	frekvence	(Hz)
U	napětí	(V)
I	proud	(A)
P	činný výkon	(W)
Q	jalový výkon	(Var)
S	Zdánlivý výkon	(VA)
c_B	koncentrace H_3BO_3	(g/kg)
N, P_t	tepelný výkon reaktoru	(MWt)
V	objem	(m ³)
BU	vyhoření jaderného paliva	(MWd/kg _U)