

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

OPTIMALIZACE VSÁZEK JADERNÉHO PALIVA NA ELEKTRÁRNÁCH
S REAKTORY VVER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MIROSLAV ŠAJDLER

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Miroslav Šajdler

ID: 136586

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Optimalizace vsázek jaderného paliva na elektrárnách s reaktory VVER

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Přehledně zpracujte problematiku střední části palivového cyklu jaderných elektráren a popište její jednotlivé části.
2. Popište specifika střední části cyklu na jaderných reaktorech VVER a metodiku navrhování vsázek jaderného paliva.
3. Zpracujte přehled možných přístupů k optimalizaci vsázek na jaderných elektrárnách ve světě a na jaderných elektrárnách.
4. Provedte minimálně dvě variantní optimalizace definovaného cyklu 4. bloku Elektrárny Dukovany s proměnným nastavením parametrů a knihoven jaderných dat. Posuďte a zhodnoťte získané výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. Bečvář J. a kol.: Jaderné elektrárny, SNTL/ALFA Praha, 1988
2. Raček, J.: Jaderné elektrárny, VUT, Brno, 2008
3. Burket, D.: Palivové vsázky se zdokonaleným palivem na Jaderné elektrárně Dukovany, ČVUT v Praze, 2003
4. Hezoučký, F. a kol.: Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory, ČVUT v Praze, 2005

a další podle pokynů vedoucího a konzultantů práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 23.5.2014

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

Konzultanti diplomové práce: Ing. Jan Prehradný, FS ČVUT v Praze
Ing. Pavel Micoláš, CSc., ŠKODA JS, a.s., Odbor
Výpočty

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠAJDLER, M. *Optimalizace vsázek jaderného paliva na elektrárnách s reaktory VVER*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Katovský, Ph.D..

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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.

.....

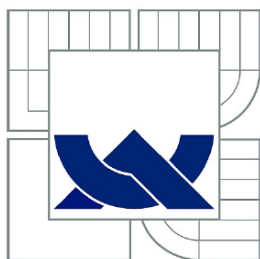
PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Karlovi Katovskému, Ph.D. a panu Ing. Janu Prehradnému za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále děkuji společnosti ŠKODA JS, a.s. za zapůjčení softwaru Moby-Dick a ATHENA.

Místo

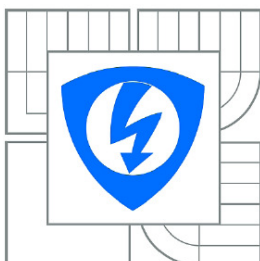
.....

(podpis autora)



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

OPTIMALIZACE VSÁZEK JADERNÉHO PALIVA NA ELEKTRÁRNÁCH S REAKTORY VVER

NUCLEAR FUEL LOADING PATTERNS OPTIMIZATION AT VVER REACTOR BASED NUCLEAR
POWER PLANTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MIROSLAV ŠAJDLER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL KATOVSKÝ, Ph.D.

KONZULTANT
CO-SUPERVISOR

Ing. JAN PREHRADNÝ

BRNO 2014

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá optimalizací palivových vsázek jaderných reaktorů VVER. Popisuje se zde průběh palivového cyklu a to jak uzavřeného tak otevřeného. Primárně se práce věnuje střední části palivového cyklu, do které spadá optimalizace palivových vsázek. Vedle toho se zabývá palivovými cykly jaderné elektrárny Dukovany od jejího vzniku. Optimalizace palivových vsázek je řešena pomocí programů Moby-Dick a ATHENA. V závěrečné části práce je vysvětlen program Athena pro optimalizaci palivových vsázek s praktickým výpočtem pro různé verze makrokódu Moby-Dick a jsou zde srovnány vypočtené hodnoty pro optimalizaci třetího bloku EDU.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optimalizace, palivový cyklus, střední část palivového cyklu, palivové cykly na EDU, optimalizační software, Athena Moby-Dick

ABSTRACT

This Master's thesis deals with optimization of loading patterns of nuclear reactors VVER. In the thesis is described the process of both types of fuel cycle – the closed and the open one. The middle part of fuel cycle containing the optimization process represents the crucial part of the thesis. The thesis is focused on the fuel cycles of the nuclear power plant Dukovany. The problem of the optimization is solved by using different programs. In the final part of the thesis, the program Athena for the loading patterns optimization is explained by a practical calculation for different versions of Moby-Dick macrocode and the calculated values for the optimization of the third unit of the nuclear power plant Dukovany are compared.

KEYWORDS

Optimization, fuel cycle, middle part of nuclear fuel cycle, fuel cycles in the nuclear power plant Dukovany, optimization software, Athena, Moby-Dick

OBSAH

Seznam zkratk	12
Úvod	13
1 Palivový cyklus jaderné elektrárny	14
1.1 Přední část palivového cyklu	14
1.2 Střední část palivového cyklu	15
1.3 Zadní část palivového cyklu	16
1.3.1 Uzavřený palivový cyklus	16
1.3.2 Otevřený palivový cyklus	17
2 Tlakovodní a lehkovodní reaktory	19
2.1 Tlakovodní reaktor VVER a PWR	19
2.2 Lehkovodní varný reaktor BWR	20
3 Problematika střední části palivového cyklu	22
3.1 Rozdělení středních částí palivového cyklu	22
3.2 Kontinuální provoz	22
3.3 Kampaňový provoz	22
3.3.1 Metoda out-in	23
3.3.2 Metoda in-out	24
4 Palivové cykly na EDU	26
4.1 Šestinová symetrie	26
4.2 Tříletý palivový cyklus	26
4.3 Čtyřletý palivový cyklus	29
4.4 Pětiletý palivový cyklus	29
4.5 Šestiletý palivový cyklus	32
5 Optimalizace palivových vsázek	33
5.1 Makrokód Moby-Dick	33
5.2 Optimalizační program ATHENA	35
5.2.1 Práce s programem ATHENA	36

6	Výsledky optimalizace s 9 čerstvými kazetami	38
6.1	Nový Moby-Dick	38
6.2	Starý Moby-Dick	40
6.3	Srovnání nový Moby-Dick versus starý Moby-Dick	42
7	Výsledky optimalizace s 11 čerstvými kazetami	49
7.1	Nový Moby-Dick	49
7.2	Starý Moby-Dick	50
7.3	Srovnání nový Moby-Dick versus starý Moby-Dick	51
8	Závěr	59
	Literatura	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Příklad palivové tabletky [4]	15
1.2	Složení paliva před vložení a po vyjmutí z reaktoru [10]	17
1.3	Otevřený a uzavřený palivový cyklus [4]	18
2.1	Základní schéma tlakovodního reaktoru [4]	20
2.2	Základní schéma lehkovodního reaktoru [4]	21
3.1	Reaktor CANDU s palivovým souborem	23
4.1	Číslování jednotlivých kazet v šestinové symetrii [13]	27
4.2	Kazety při tříletém palivovém cyklu [13]	28
4.3	Kazety při čtyřletém palivovém cyklu [13]	30
4.4	Kazety při pětiletém palivovém cyklu [13]	32
6.1	Vsázka s 9 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.1, délka kampaně 272,4279 dne, $Kr=1,555$	43
6.2	Vsázka s 9 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.2, délka kampaně 272,387 dne, $Kr=1,555$	43
6.3	Vsázka s 9 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.3, délka kampaně 272,4386 dne, $Kr=1,556$	44
6.4	Vsázka s 9 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.4, délka kampaně 272,4341 dne, $Kr=1,556$	44
6.5	Závislost nevyrovnanosti výkonu na čase s 9 čerstvými kazetami pro nový Moby-Dick	45
6.6	Vsázka s 9 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.1, délka kampaně 268,23 dne, $Kr=1,553$	46
6.7	Vsázka s 9 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.2, délka kampaně 268,15 dne, $Kr=1,565$	46
6.8	Vsázka s 9 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.3, délka kampaně 267,88 dne, $Kr=1,566$	47
6.9	Vsázka s 9 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.4, délka kampaně 268,26 dne, $Kr=1,571$	47
6.10	Závislost nevyrovnanosti výkonu na čase s 9 čerstvými kazetami pro starý Moby-Dick	48
7.1	Vsázka s 11 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.1, délka kampaně 304,1166 dne, $Kr=1,558$	53
7.2	Vsázka s 11 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.2, délka kampaně 302,6291 dne, $Kr=1,55$	53
7.3	Vsázka s 11 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.3, délka kampaně 302,5539 dne, $Kr=1,552$	54

7.4	Vsázka s 11 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.4, délka kampaně 301,9256 dne, $Kr=1,541$	54
7.5	Závislost nevyrovnanosti výkonu na čase s 11 čerstvými kazetami pro nový Moby-Dick	55
7.6	Vsázka s 11 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.1, délka kampaně 302,34 dne, $Kr=1,544$	56
7.7	Vsázka s 11 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.2, délka kampaně 302,06 dne, $Kr=1,553$	56
7.8	Vsázka s 9 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.3, délka kampaně 301,98 dne, $Kr=1,554$	57
7.9	Vsázka s 11 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.4, délka kampaně 301,95 dne, $Kr=1,557$	57
7.10	Závislost nevyrovnanosti výkonu na čase s 11 čerstvými kazetami pro starý Moby-Dick	58

SEZNAM ZKRATEK

AZ Aktivní zóna

EDU Elektrárna Dukovany

ETE Elektrárna Temelín

HRK Palivové kazety regulace výkonu a kompenzace reaktivity

SÚJB Státní úřad pro jadernou bezpečnost

VVER Vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor

ÚVOD

V dnešní době elektrická energie je součástí každého člověka vyspělé části světa, často na elektrické energii závisí lidské životy. S výrobou elektrické energie však vznikají nové problémy. Elektrickou energii lze získávat mnoha způsoby od tepelných elektráren spalující uhlí přes solární elektrárny. Zásoby uhlí nejsou neomezené a efektivita získání energie ze slunce je malá, proto jsou dnes velmi perspektivními jaderné elektrárny a s kritickým pohledem na věc, se bez nich do budoucna obejít nedokážeme.

Jaderné elektrárny pracují velmi efektivně, neboť pomocí jaderné reakce se dá dosáhnout mnohem většího zisku energie než při spalování uhlí. V jaderné elektrárně se produkuje velké množství radioaktivního vyhořelého jaderného paliva. Přestože vyhořelé jaderné palivo svým objemem zabírá přibližně jen 10 % radioaktivního odpadu na celém světě, obsahuje téměř 90 % radioaktivity veškerého odpadu.

Proto se zde nabízí otázka proč lépe nevyužít potenciál uchován v jaderném palivu. Tento problém do jisté míry řeší optimalizace vázek. Její hlavní úkole je, aby reaktor splňoval provozní a bezpečnostní chod, po výměně paliva. Vhodnou optimalizací však můžeme palivo v reaktoru využívat po delší dobu. Tím šetříme jednak náklady provozovatele, náklady na výrobu, ale hlavně neprodukujeme tolik vyhořelého jaderného paliva, při stejném množství vyrobené energie.

Samotná optimalizace je proces související s komerční jadernou energetikou již od počátku. Rozvoj tohoto procesu umožnila až výkonná počítačová technika. Optimalizační proces je velmi náročný na výpočty.

Tedy s rozvojem, počítačové techniky, vhodných algoritmu, dokážeme lépe a lépe optimalizovat palivové vsázky na jaderných elektrárnách. Tím získáme pozitivní dopad na celou společnost.

1 PALIVOVÝ CYKLUS JADERNÉ ELEKTRÁRNY

Palivový cyklus jaderné elektrárny je vše od těžby uranu, až po uložení vyhořelého paliva, či jeho přepracování. Palivo se vyrábí z rudy uranu. Tento proces nazýváme přední částí palivového cyklu. Po vyrobení se palivo aplikuje do reaktoru, kde tuto část palivového cyklu nazýváme střední částí. Po vyhoření paliva v reaktoru se palivo dále zpracovává, nebo ukládá. Zde mluvíme o zadní části palivového cyklu. Zadní část palivového cyklu také rozhoduje, zda se jedná o uzavřený či otevřený cyklus jak bude popsáno níže.[1][2][3]

1.1 Přední část palivového cyklu

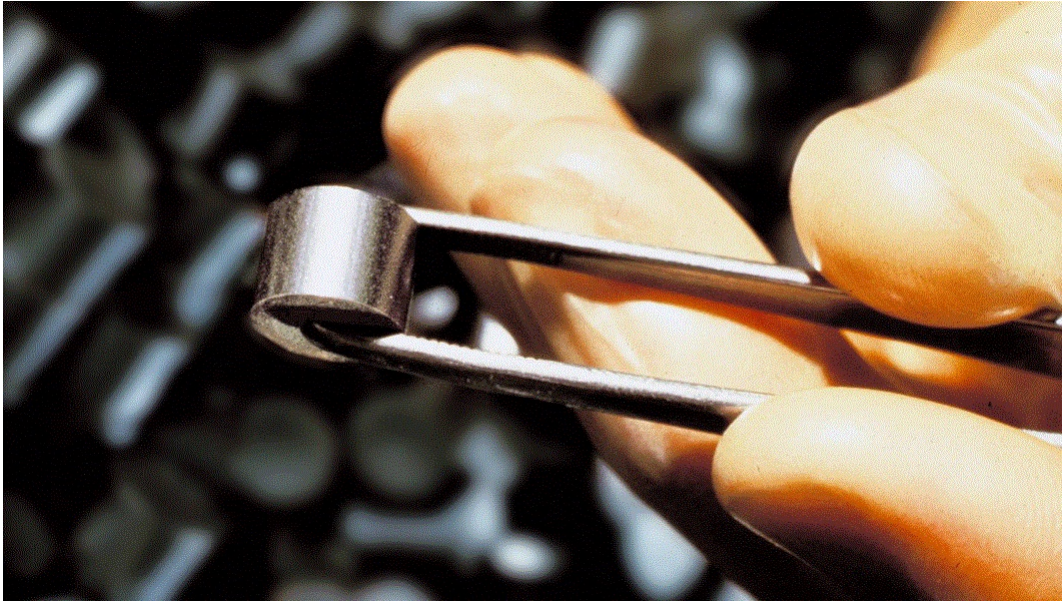
Aby palivo mohlo vzniknout, musí být prvotní surovina pro výrobu paliva. Pro jaderné elektrárny je nejčastěji využíván uran. Uran se získá vytěžením uranové rudy hlubinným či povrchovým způsobem.

Takto získaná ruda je rozemleta a rozdrčena na práškovou konzistenci. Chemickou úpravou získáme diuranát amonný $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, tato sloučenina se též nazývá žlutý koláč, neboť je zde koncentrovaný uran a tato sloučenina se vyznačuje žlutou barvou. Proto i tedy ten název. Žlutý koláč v sobě obsahuje přibližně 70 % uranu. Dalším zpracováním je uranový koncentrát vyčištěn a přeměněn na plynou formu UF_6 , tedy hexafluorid uranu.

V reaktorech je pro získání energie nejlépe využít ^{235}U , proto potřebujeme jeho vyšší koncentraci. Přírodní uran však obsahuje pouze 0,7 % ^{235}U . Tlakovodní reaktory potřebují obohacené palivo, proto je potřeba v procesu palivového cyklu palivo obohatit. K obohacení jsou dnes používány dvě metody. Difúzní metoda a metoda pomocí centrifugy. Obě metody jsou obrovsky finančně a energeticky náročné. V současnosti je používanější metoda pomocí centrifugy.

Hexafluorid uranu je v plynné formě. Zde se vloží do centrifugy. Vlivem velké odstředivé síly a faktu, že molekuly ^{235}U mají větší hmotnost, se tento izotop uranu nahromadí na okraji centrifugy, kde je sesbírán. Tento proces je mnohokrát opakován, dokud se nedocílí požadovaného obohacení. ¹

¹Obohacení je specifické pro každou elektrárnu. Případně pro její aktuální provoz.



Obr. 1.1: Příklad palivové tabletky [4]

Již obohacený hexafluorid uranu je konvertován na prášek oxidu uraničitého, dostáváme tedy UO_2 . Prášek je dále slisován na malé tabletky², příklad lze vidět na Obr.1.1, tabletky jsou vloženy do tyčí ze zirkoniové slitiny. Všechny tabletky v tyči jsou pak stlačovány pružinou umístěnou v nejvyšší části tyče. Ta je zde umístěna z důvodu kontinuity tabletek, neboť vlivem teploty by mohla být narušena. Jednotlivé palivové tyče jsou vkládány do mřížek, kde určitý počet palivových tyčí tvoří jednu palivovou kazetu. Kazety jsou různých druhů, každý typ reaktoru má svou specifickou velikost.³ Dále nejsou všechny kazety stejné, ale máme kazety regulační, bezpečnostní a měřicí. Jedná se zde o to, že jsou uzpůsobeny, pro měřicí přístroje či regulační tyče.[1][2][3]

1.2 Střední část palivového cyklu

Vyrobené kazety jsou dovezeny do jaderné elektrárny, kde se uloží do skladu čerstvého paliva a čekají na zavezení do reaktoru. Použité palivo se z reaktoru přesune do skladovacího bazénku, který je umístěn vedle reaktoru. Zde vyhořelé palivo zůstává po dobu asi 5 až 10 let než jeho radioaktivita poklesne na manipulační hodnotu a také než poklesne teplota na povrchu. Vyjmuté kazety jsou obrovským zdrojem

²Používá se také název peletky.

³V ETE a EDU jsou kazety tvaru symetrického šestihranu.

tepla. Více bude střední část palivového cyklu rozebrána v další kapitole.

1.3 Zadní část palivového cyklu

Palivo, jež se vyveze z ochlazovacího bazénu, již zařazujeme do zadní části palivového cyklu. Takto vyvezené palivo je umístěno do skladu použitého paliva. Sklad vyhořelého jaderného paliva bývá z ekonomického důvodu v areálu elektrárny, popřípadě v její blízkosti. Sklad je realizován dvěma způsoby. Jde buď o suchý nebo mokrý sklad.[1][2]

Mokrý sklad je mnohem náročnější na provoz. Vyhořelé palivo je ukládáno do bazénů. Odvod tepla, které kazety pořád vytvářejí, je zajištěn cirkulací vody v bazénu. Voda se však stává radioaktivní, zanáší se a pro její koloběh je opět potřebná jistá energie. Tím se mokrý sklad vyhořelého paliva stává finančně náročnější. [1][2][3]

Palivo v suchém skladu vyhořelého paliva je možno uložit dvěma způsoby. První způsob je vložení do kontejnerů a druhý, uložení do betonových sklípků. Pokud je palivo uloženo v kontejnerech, odvod tepla zajišťuje přirozená konvence vzduchu v okolí kontejnerů. Tím odpadnou jakékoliv energeticky náročné úkony.

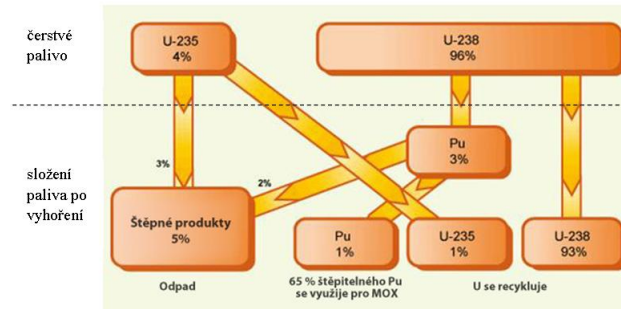
Ve skladech použitého paliva se palivo nechává přibližně 50 let kde je pak následně uloženo do hlubinného úložiště. Tato verze zacházení s palivem je nazývána jako otevřený palivový cyklus a bude probrána níže. Nebo lze palivo po pár letech vyjmout, přepracovat a opět je použít jako palivo do jaderné elektrárny. Tento způsob se nazývá uzavřený palivový cyklus.[1][2]

1.3.1 Uzavřený palivový cyklus

Jak již název napovídá, jde o uzavřený koloběh paliva. Palivo je znovu využíváno. Pro další použití je tedy nutné palivo přepracovat nebo transmutovat⁴. V dnešní době přepracování paliva obnáší velké finanční náklady a v porovnání se získáním nového paliva je přepracování dražší. Tímto faktem se tím zabývá pouze pár zemí. Nám nejbližší to jsou Francie, Anglie a Rusko. V Americe je přepracování dokonce zakázáno zákonem. Tyto země pak zajišťují přepracování i pro další země.[1]

Palivo vložené do reaktoru obsahuje přibližně 4 % uranu 235. Po tzv. vyhoření paliva v reaktoru se rapidně změní složení paliva. V palivu se vlivem jaderných reakcí objeví téměř celá periodická tabulka prvků. Jak se změní lze vidět na Obr.1.2. Obsahuje

⁴Jde o moderní technologii která je ve vývoji, jedná se o cílenou přeměnu jednotlivých prvků na prvky s malým nebo žádným poločasem rozpadu.



Obr. 1.2: Složení paliva před vložení a po vyjmutí z reaktoru [10]

asi 95 % uranu, 3 % štěpných produktů, 1% plutonia a 1 % minoritních aktinidů. Největší podíl na radioaktivitě paliva mají štěpné produkty. A však aktinidy vzniklé v palivu mají dlouhý poločas rozpadu a jsou to tedy prvky, které činí palivo tak dlouho radioaktivním.[1][2]

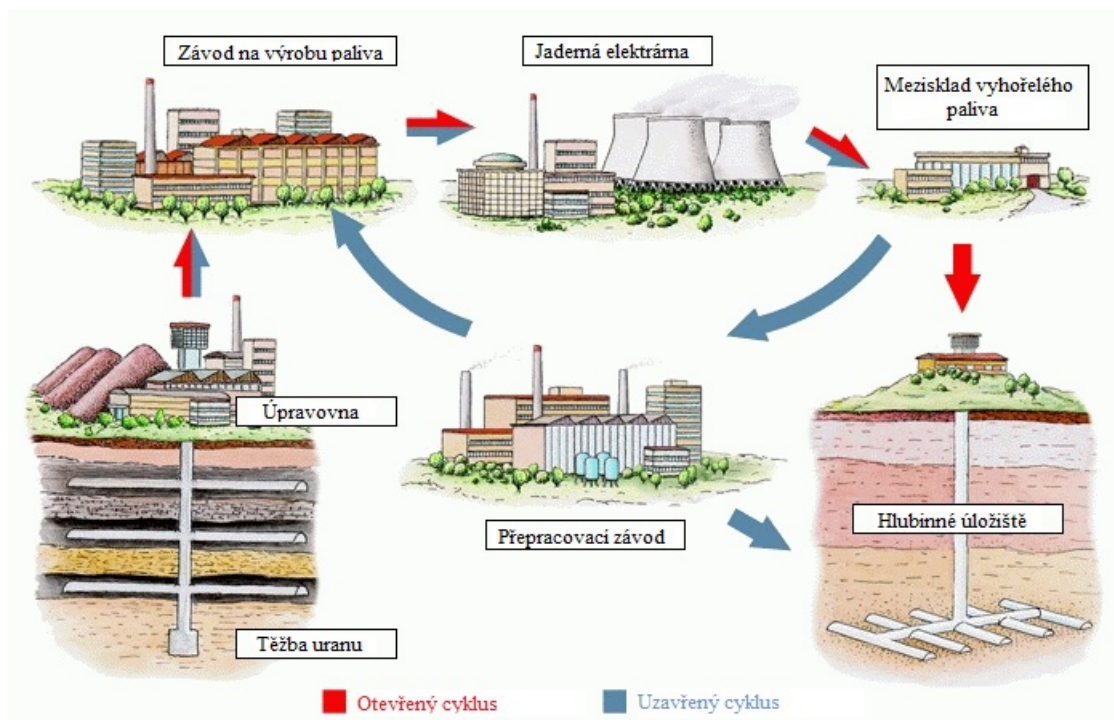
Jednou z metodou přepracování paliva je MOX, zkratka je mixed oxide fuel. Výroba MOX paliva spočívá v oddělení plutonia a 96 % uranu od zbytku vyhořelého jaderného paliva. Provádí se tak pomocí chemického procesu, tento proces je velmi složitý. Dalším možným způsobem je transmutace. Kdy pomocí externího neutronového zdroje se snažíme aktinidy transmutovat na prvky s malým poločasem rozpadu, nebo v nejlepším případě na stabilní prvky.

1.3.2 Otevřený palivový cyklus

Jedná se o cyklus, jež nemá další pokračování a proto tedy otevřený cyklus. Vyhořelé palivo, které je dostatečně dlouhou dobu uloženo v meziskladu vyhořelého jaderného paliva, obvykle se jedná o dobu okolo 50 let. Kdy radioaktivita a produkované teplo poklesne na danou mez. Je palivo převezeno do hlubinného úložiště.

Většina států na světě nemá doposud zbudována hlubinná úložiště. Jsou zatím ve fázi výzkumu. Zkoumají se různé druhy geologicky stabilních podloží. Nejčastěji jde o žulové podloží, jílové a solné podloží. Každá země se vydala jiným směrem, jde spíše o potenciál zeminy, co každá země může využít. V České republice doposud hlubinné úložiště není. Aktuálně jsou vybrány lokality pro možnou stavbu které jsou zkoumány.

Hlubinné úložiště má být přibližně je jeden kilometr pod zemským povrchem. V této hloubce budou vybudovány betonové prostory, do nichž bude palivo uloženo. Každý



Obr. 1.3: Otevřený a uzavřený palivový cyklus [4]

jednotlivý celek vyhořelého paliva bude napojen na senzory, jež budou hlídat aktuální teplotu a radioaktivitu. Předpokládá se, že palivo bude ponecháno do doby, než poklesne radioaktivita na přírodní úroveň, a však jedná se přece spíše o futuristické časy nám i našim generacím daleko vzdálené. Proto je zde uplatňována spíše myšlenka, že palivo zůstane do doby vývoje technologie, která je finančně nenáročná. Pro názornou představu je na Obr.1.3 zobrazen průběh otevřeného a uzavřeného palivového cyklu jaderné elektrárny.[1][2]

2 TLAKOVODNÍ A LEHKOVODNÍ REAKTORY

Tlakovodní reaktor je nejčastějším typem na světě. V únoru roku 2014 bylo provozováno celkem 274 tlakovodních reaktorů, pokud to vztáhneme k celkovému počtu, dostáváme podíl na výrobě asi 68 % ze všech energetických reaktorů provozovaných na světě. V České republice je šest energetických reaktorů a všechny jsou tlakovodní. Jelikož se níže zabýváme právě optimalizací na jednom z nich, je věcné si osvětlit danou problematiku.

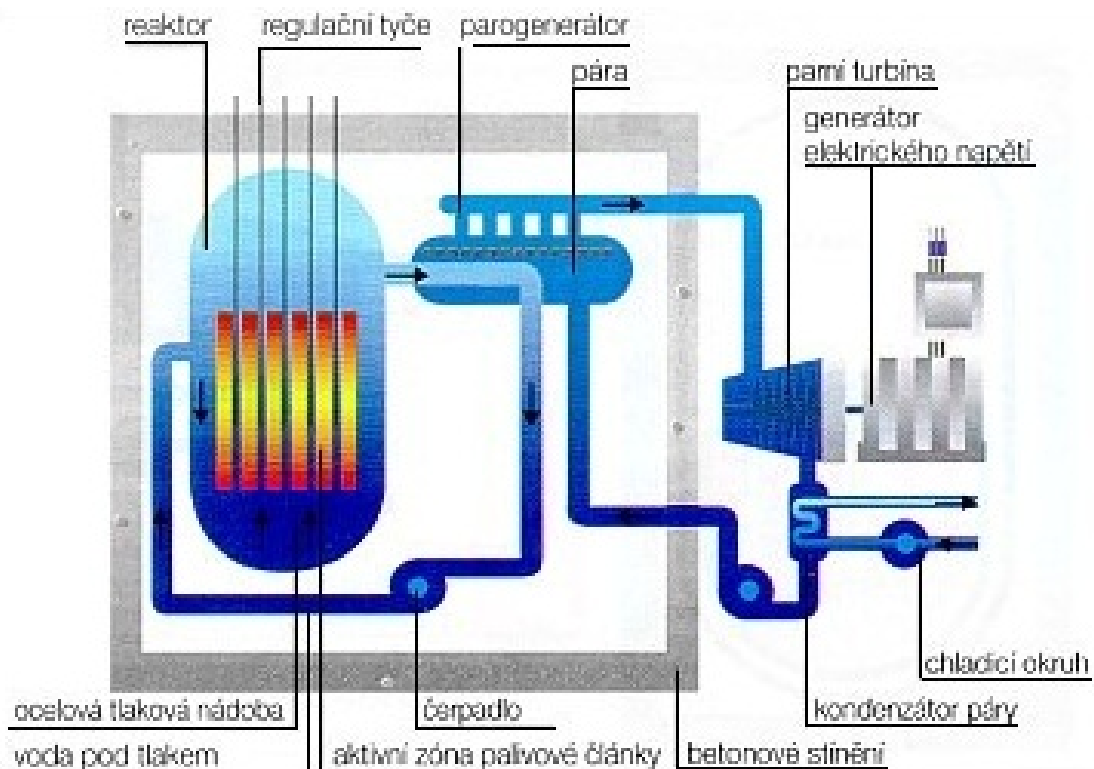
2.1 Tlakovodní reaktor VVER a PWR

Tlakovodní reaktory jsou jedním z nejčastěji používaných hned z několika důvodů. Nejdůležitějším je vysoká bezpečnost. Aktuálně je v provozu asi 68 % všech reaktorů na světě tlakovodních. Tlakovodní reaktory mají dvě koncepce a to východní nebo západní. Východní koncepce nese označení VVER (Vodo–Vodjano Energetičeskij Reaktor). Západní označení PWR (Pressurized light-Water moderate and colled Reactor).[1]

Tlakovodní reaktor byl vyvinut v USA. Záměrem tohoto reaktoru bylo pohánět jaderné ponorky. První využití reaktoru pro výrobu energie v elektrárně bylo v roce 1957 v Shippingport v USA. V roce 1961 byla pak do provozu uvedena první komerční elektrárna v Yankee v USA. Její elektrický výkon činil 134 MW.[7]

Východní koncepce VVER byla uvedena do provozu v roce 1964 v Novovoroneži s elektrickým výkonem 210 MW. V dnešní době je již tento reaktor odstaven. Aktuálně se v Novovoroneži staví druhá jaderná elektrárna s dvěma bloky. Dosahuje vysokých technických kvalit. Velkou výhodou je například jedna chladicí věž.

Jaderná elektrárna s tlakovodním reaktorem je bezpečná také z toho důvodu, že je dvouokruhová. V primárním okruhu je voda ohřívána v reaktoru kde následuje do parogenerátorů. Parogenerátor oddělí primární okruh od sekundárního. Pára vyrobená v parogenerátoru již není radioaktivní, a tudíž jsou zde mnohem příznivější podmínky pro manipulaci. Z parogenerátoru putuje do turbíny, kterou roztočí, kinetická energie turbíny pak dále energii předává generátoru, jež transformuje energii na ušlechtilou formu a to elektrickou. Vše je přehledně znázorněno na Obr.2.1



Obr. 2.1: Základní schéma tlakovodního reaktoru [4]

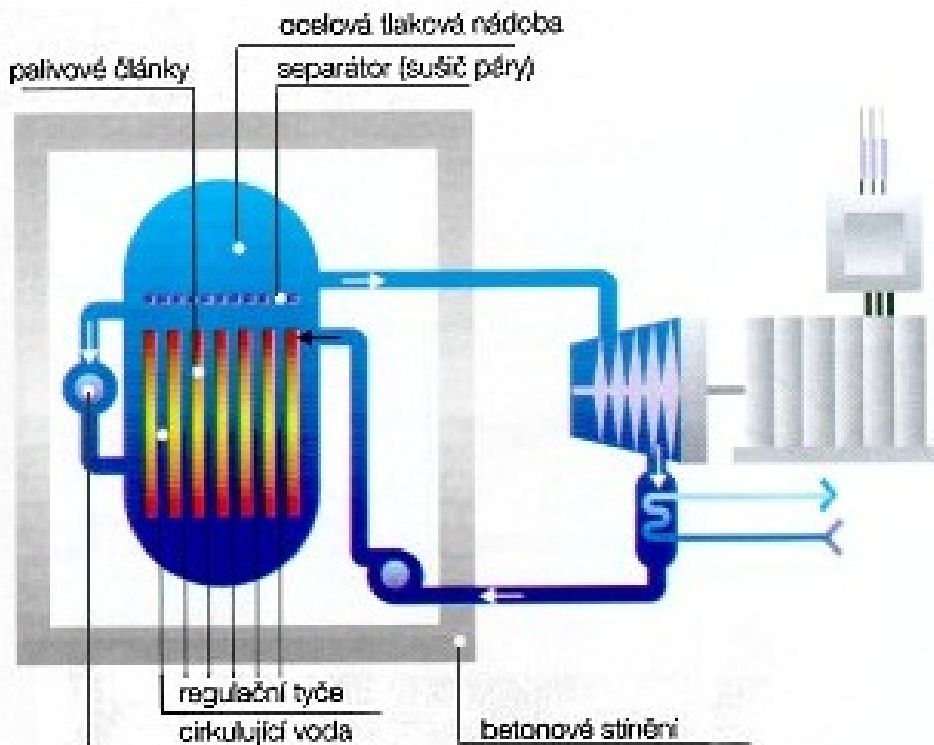
Jako palivo je zde použit mírně obohacený uran. Pro chladivo a moderátor je zde použita voda.

Rozdíly mezi východní a západní koncepcí jsou například v uspořádání primárního okruhu. Hlavním znakem v primárním okruhu je uložení parogenerátorů. Typ VVER má uložení horizontální, naopak typ PWR má uložení vertikální. Jako další rozdíl zde najdeme v počtu chladících smyček. Reaktory západní koncepce mají 2 až 4 chladící smyčky. Počet byl určen při vývoji. Reaktory VVER mají buď 4 nebo 6 chladících smyček. Reaktor VVER—1000 má 4 chladící smyčky.

Další a to velmi důležitým rozdílem je uspořádání aktivní zóny. Palivové kazety čtvercového průřezu využívají reaktory PWR, kdežto východní reaktory mají tvar šestihranu. Tedy nelze palivo zaměňovat.

2.2 Lehkovodní varný reaktor BWR

Jde o druhý nejrozšířenější typ jaderného reaktoru na světě. Je koncipována jako jednookruhová elektrárna, což sebou přináší jak výhody, tak nevýhody. Velkou vý-



Obr. 2.2: Základní schéma lehkovodního reaktoru [4]

hodou je, že pára se vyrábí přímo v reaktoru a tudíž nejsou potřebné žádné parní generátory. Takto vyrobená pára obsahuje v sobě ještě velké množství vodních kapiček. Tyto kapičky jsou odstraněny v sušičce, jak je vidět na Obr.2.2. Vysušená pára pak putuje přímo do turbíny. Chladivo, v našem případě voda, zůstává radioaktivní a jsou tedy kladeny zvýšené požadavky na potrubí a hlavně na turbínu. Zvýšené nároky jsou kladeny také na prostor v blízkosti potrubí, neboť je zde radioaktivita. [8][9]

Jako palivo je zde opět použit mírně obohacený uran ve formě tabletek. Oxid uraničitý UO_2 . Toto palivo je stejně jako u tlakovodních reaktorů uspořádáno do palivových proutků, a ty následně tvoří palivový soubor. Obohacení paliva oproti tlakovodnímu reaktoru je zde menší.

Takto vytvořený palivový soubor má čtvercový průřez. A jednotlivou kazetu tvoří tyče kruhového průřezu a jsou větší co do průměru od tlakovodních palivových tyčí. Zajímavým faktem je, že měrný výkon v reaktoru je asi o jednu třetinu menší než v reaktoru PWR. Je zde ještě jedna specifikace. Aktivní zónu tvoří moduly. Každý modul obsahuje čtyři palivové soubory a do středu je vkládána absorpční tyč křížového tvaru.

3 PROBLEMATIKA STŘEDNÍ ČÁSTI PALIVOVÉHO CYKLU

Pokud mluvíme o střední části palivového cyklu, mluvíme o palivu, které je uskladněno ve skladu čerstvého paliva až do doby dokud je vyvezeno do bazénu vedle reaktoru. Bohužel, ne všude se dá tato přibližná definice použít. Některé jaderné elektrárny z důvodu maximálního využití palivové kazety, používají kazety, které byly vloženy do bazénu vedle reaktoru zpět do aktivní zóny, čímž využijí ještě více daný potenciál kazety. Tedy střední část palivového cyklu jistě končí uložením paliva do meziskladu.

Nejdůležitější problematikou střední části palivového cyklu je navrhnout rozložení palivových souborů v aktivní zóně, tedy jde o optimalizaci vsázek palivových kazet jaderných reaktorů.[1][2]

3.1 Rozdělení středních částí palivového cyklu

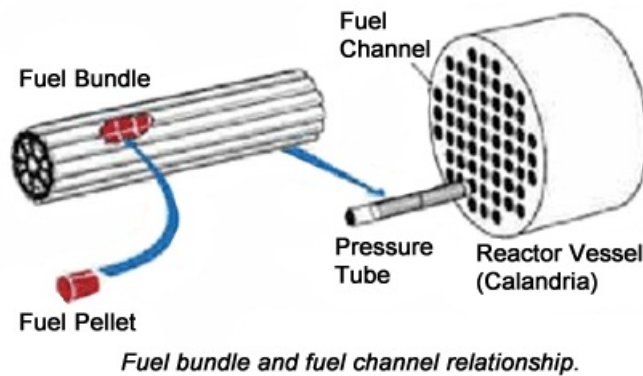
Dělit střední část palivového cyklu lze dle dvou kritérií. A to dle četnosti výměny paliva, pak ho nazýváme kampaňovitý a kontinuální. Druhým kritériem může být metoda in—out a out—in. Jde spíše o hrubé rozdělení. Jedno rozdělení překrývá druhé a jde tedy spíše o představu.

3.2 Kontinuální provoz

Má velkou výhodu v nenucenosti odstavení reaktoru. Výměna se provádí přímo za chodu reaktoru. Typickými zástupci jsou reaktory AGR, RBMK a CANDU. Výměna vyhořelého palivového souboru v reaktoru CANDU je realizována tak, že jsou soubory zasouvány v horizontálním směru. Výměna se dá provádět z obou stran a to z důvodu vyrovnání výkonu v reaktoru. Takovýto způsob výměny paliva je velmi technicky náročný a při výměně hrozí únik radioaktivních částic. Typický zástupce CANDU je na Obr.3.1 a je zde znázorněno jak se palivové soubory vsouvají do tlakovodních kanálů.

3.3 Kampaňový provoz

Při tomto provozu je určena doba, po kterou palivo zůstane v reaktoru. Tato doba je rozdělena pak na jednotlivé období, kde počet období přibližně určuje, jaká část paliva reaktoru se vymění. Obvyklé jsou kampaně dlouhé 3 až 5 částí, výjimečně



Obr. 3.1: Reaktor CANDU s palivovým souborem

6. Poté jedna část trvá v rozmezí 12 až 18 měsíců. Například v jaderné elektrárně Dukovany je palivový cyklus s pěti kampaněmi. Jedna kampaň trvá jeden rok. Tedy všechno palivo se obnoví za pět let a je pět výměn, to znamená, že se obnoví přibližně jedna pětina aktivní zóny každý rok. Tato jedna pětina nejvíce vyhořelých palivových kazet je vyvezena do bazénu vedle reaktoru. Dále jsou dle předchozí optimalizace vhodně zpřeházeny pozice stávajících palivových kazet tak, aby výkon reaktoru byl rovnoměrný v celém objemu nádoby. Následně jsou zavezeny čerstvé palivové kazety. Kazety jsou zaváženy při odstaveném reaktoru. Čas, který je potřebný k výměně paliva je velmi důležitý, neboť delší časové prodlevy znamenají finanční ztráty na elektřině, která již mohla být vyrobena. Výměna paliva v kampaňovitém období je typická pro reaktory VVER, BWR a PWR.

3.3.1 Metoda out–in

Čerstvé palivo vložené do reaktoru je zaváženo na okraj aktivní zóny. Obrovskou výhodou této metody je rovnoměrné rozložení výkonu v nádobě reaktoru. Cenou této cenné vlastnosti jsou velké neutronové toky na stěnu nádoby, což vede ke křehnutí nádoby. Tato špatná vlastnost velkého neutronového toku na stěnu nádoby, podstatně zkracuje životnost nádoby, po určité době se musí celá nádoba vyžít, aby splnila bezpečnostní požadavky. Proces vyžítání je velmi složitý a nákladný. Například na Slovensku již byla jedna reaktorová nádoba vyžítána. Proto je tato metoda méně používanou a je spíše z historických možností přístupu vsázky čerstvého paliva do reaktoru. Kdy nebylo možné pomocí výkonné výpočetní techniky získat nejlepší konfiguraci, pro optimální rozložení, kazet, výkonu a neutronového toku na nádobu. [2]

3.3.2 Metoda in–out

Jak již napovídá anglické název, tedy volně přeloženo do češtiny, dovnitř a ven. Palivo je zavezeno do středu aktivní zóny. Nejvíce vyhořelé palivo, je přeloženo na okraj aktivní zóny. Takovýmto způsobem je zajištěno lepší využití paliva a díky menším neutronovým tokům na stěnu nádoby, je i menší únik neutronů z reaktoru. Z toho důvodu se tato metoda také někdy nazývá nízkoúniková. Pokud neutrony neunikají z nádoby reaktoru, respektive jsou na stěnu reaktoru menší neutronové toky, důsledkem toho dochází k zvýšení životnosti nádoby reaktoru, neboť nedochází ke křehnutí a jiným materiálovým změnám, alespoň ne v takové míře.

Z prvního hlediska se jeví tento proces jako jednoduchý, však vsázka musí být precizně určena a polohy jednotlivých kazet dopředu spočítány. Je to z důvodu rovnoměrného rozložení výkonu v reaktoru. Pokud by byl výkon nerovnoměrně rozdělen, vznikly by lokální energetické špičky a mohlo by dojít k poškození palivového proutku či celé kazety. A s tím tedy související i bezpečnost celé elektrárny.

S rozvojem výpočetní techniky se rozvinuly možnosti lepšího přeskládání palivových souborů. A tedy jde o velmi sofistikovanou metodu, která se provádí pomocí různých programů, které budou popsány níže. S tímto způsobem lze při kampaňovitém způsobu přejít na víceletý provoz, lépe řečeno jde o ponechání paliva déle v reaktoru a tedy jeho lepší využití.

Při tomto provozu však vznikl nový problém, který se vykompenzoval zvýšením obohacení paliva. Avšak při zavezení paliva do aktivní zóny s vyšším obohacením. Palivo vykazovalo přebytek reaktivity, jde o relativně krátkou dobu po zavezení paliva, ale musí se řešit. Bohužel problém nebylo možné řešit přidáním kyseliny borité do chladiva. Proto byly použity vyhořívající absorbátory.

Úkolem vyhořívajících absorbátorů je snížení přebytečné reaktivity jež vznikne zavezením více obohaceného paliva.

Vyhořívající absorbátor je složen z prvků jež mají velký účinný průřez pro absorpci neutronů, ale po absorpci neutronů se stane tento účinný průřez tak malým že nepřijímá téměř žádné další. Při použití lehkovodních reaktorů jsou využívány dva prvky, bór a gadolinium. Jmenovitě jde o ^{10}B , ^{155}Gd a ^{157}Gd .

Co do použití vyhořívajících absorbátorů jsou využívány dva způsoby. Jde buď o blokové, nebo integrální řešení. Integrální řešení v sobě zahrnuje nanesení absorbátoru

na povrch palivové tabletky či přímým přimícháním do paliva. Při blokovém řešení jde buď o celý soubor, který plní funkci pouze absorbátoru nebo jednotlivé palivové proutky v palivovém souboru.[2] [6]

4 PALIVOVÉ CYKLY NA EDU

Jaderná elektrárna Dukovany leží asi 30 km jihozápadně od Brna. Je jednou ze dvou jaderných elektráren v České republice.

Aktivní zóna je složena z 349 palivových kazet. Z těchto 349 kazet obsahuje 37 kazet regulačních. Pro výpočet návrhu se využívá šestinová symetrie reaktoru. A tedy pro výpočet se tedy uvažuje pouze 59 palivových souborů, respektive 58+1. Jeden palivový soubor je společný pro všech šest částí, jde o středový soubor. V jedné šestině je tedy obsaženo 52 palivových a 7 regulačních souborů.

4.1 Šestinová symetrie

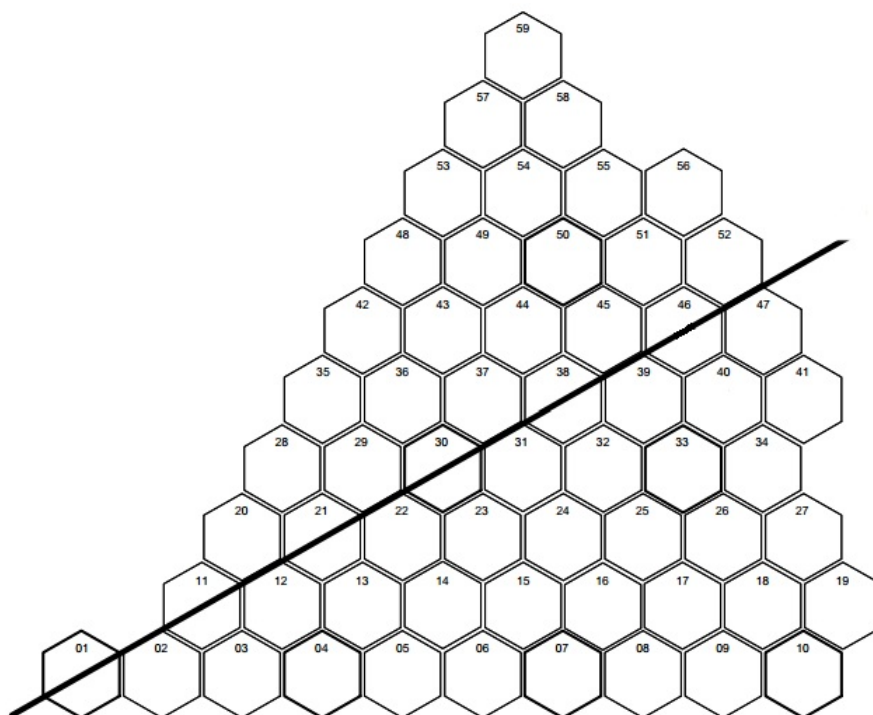
Pro návrh při výměně palivových kazet se využívá šestinová symetrie aktivní zóny. Jak jsme již řekli, aktivní zóna obsahuje 349 palivových souborů. A ty jsou rozděleny na symetrické šestiny. Tato šestina obsahuje 59 palivových souborů z čehož jeden je společný pro všechny šestiny. Jednotlivé soubory ze šestiny jsou rozděleny ještě do 12 skupin, dle vzdálenosti od stěny reaktorové nádoby. Do první skupiny spadají čtyři kazety, do druhé a třetí devět kazet, čtvrtá osm kazet, pátá sedm. Skupina s číslem šest pak obsahuje šest kazet, sedmá pět, osmá čtyři, devátá tři, desátá dvě a skupiny s číslem jedenáct a dvanáct v sobě skrývají po jedné kazetě.

Jednotlivé kazety v šestinové symetrii jsou označeny čísly. Tato čísla jsou zadávána po řádcích, kdy společná kazeta nese číslo jedna. Nejlepší představu si vytvoříme obrázkem. Číslování jednotlivých kazet je tedy zobrazeno na Obr.4.1 Rozdělení jednotlivých kazet do skupin je uvedeno v Tab.4.1. Skupiny jsou brány jako diagonální, tedy dostáváme 12 skupin, pomocí nichž můžeme hodnotit vhodnost palivové vsázky, neboť se jedná o jakési vrstvy od stěny reaktorové nádoby.

4.2 Tříletý palivový cyklus

Palivový cyklus této délky byl projektovaným cyklem již před započítáním výstavby jaderné elektrárny Dukovany. Při zavážení reaktoru čerstvým palivem byla využívána metoda out-in. V té době se však objevila nová metoda in-out, a proto se hned po dvou letech začal připravovat přechod na tři a půl roční palivový cyklus.

V době chodu tříletého palivového cyklu bylo zavezeno v prvních dvou letech 114 čerstvých palivových kazet, ve třetím roku to bylo již jen 121. Jedna kampaň trvala

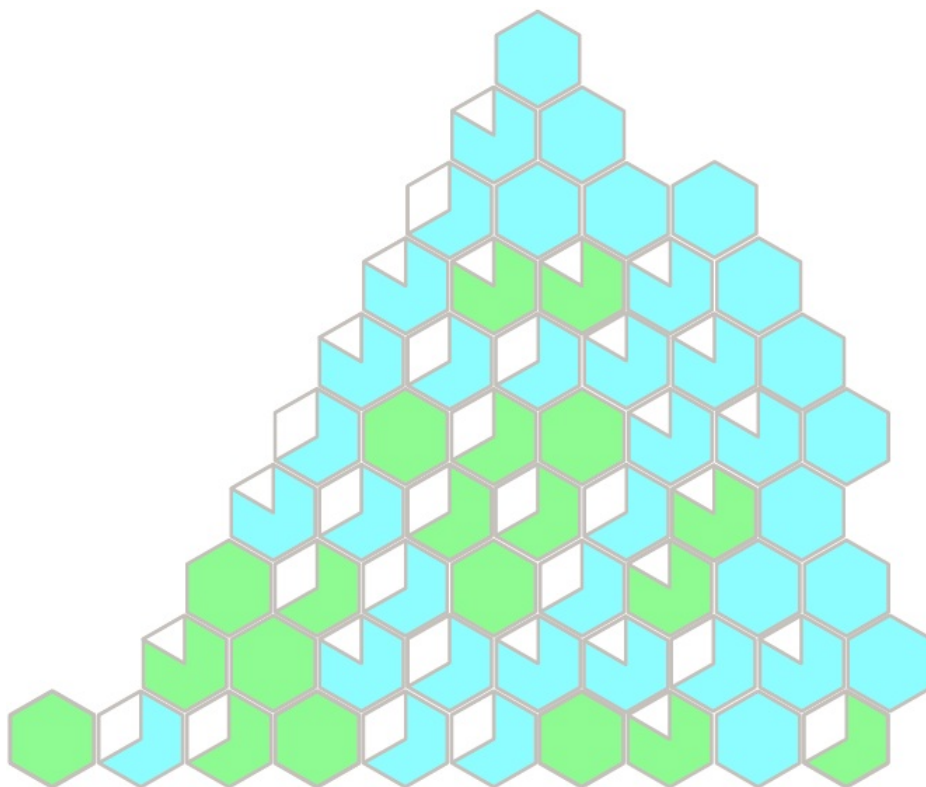


Obr. 4.1: Číslování jednotlivých kazet v šestinové symetrii [13]

Skupina	Palivové kazety	Regulační kazety	Celkem	Pozice
1.	4	0	4	41,47,52,56
2.	9	0	9	19,27,34,40,46,51,55,58,59
3.	6	3	9	10,18,26,33,39,45,50,54,57
4.	8	0	8	9,17,25,32,38,44,49,53
5.	7	0	7	8,16,24,31,37,43,48
6.	4	2	6	7,15,23,30,36,42
7.	5	0	5	6,14,22,29,35
8.	4	0	4	5,13,21,28
9.	2	1	3	4,12,20
10.	2	0	2	3,11
11.	1	0	1	2
12.	0	1	1	1

Tab. 4.1: Přehled rozdělení jednotlivých kazet do skupin

300 efektivních dnů a bylo zde použito palivo s obohacením 1,2, 2,4 a 3,6 %.



Obr. 4.2: Kazety při tříletém palivovém cyklu [13]

Do aktivní zóny byly zaváženy kazety na okraj. Tedy skupiny kterých se to týkalo byly 1,2,3,4,6,10. Názorné schéma které kazety byly měněny je znázorněno na Obr.4.2. Světle modrou barvou jsou vyznačeny kazety, jež byly vyměněny.[11]

Tento palivový cyklus měl své výhody i nevýhody. Nejdůležitější jsou vyjmenovány níže.

Výhody:

- Nižší obohacení paliva
- Jednoduchost návrhu aktivní zóny
- Jednoduchost paliva

Nevýhody:

- Obrovské neutronové toky na tlakovou nádobu a důsledkem toho křehnutí nádoby
- Nutnost žíhání tlakové nádoby přibližně po třiceti letech
- Rychlá obměna palivových soborů
- Ekonomicky nevýhodné

4.3 Čtyřletý palivový cyklus

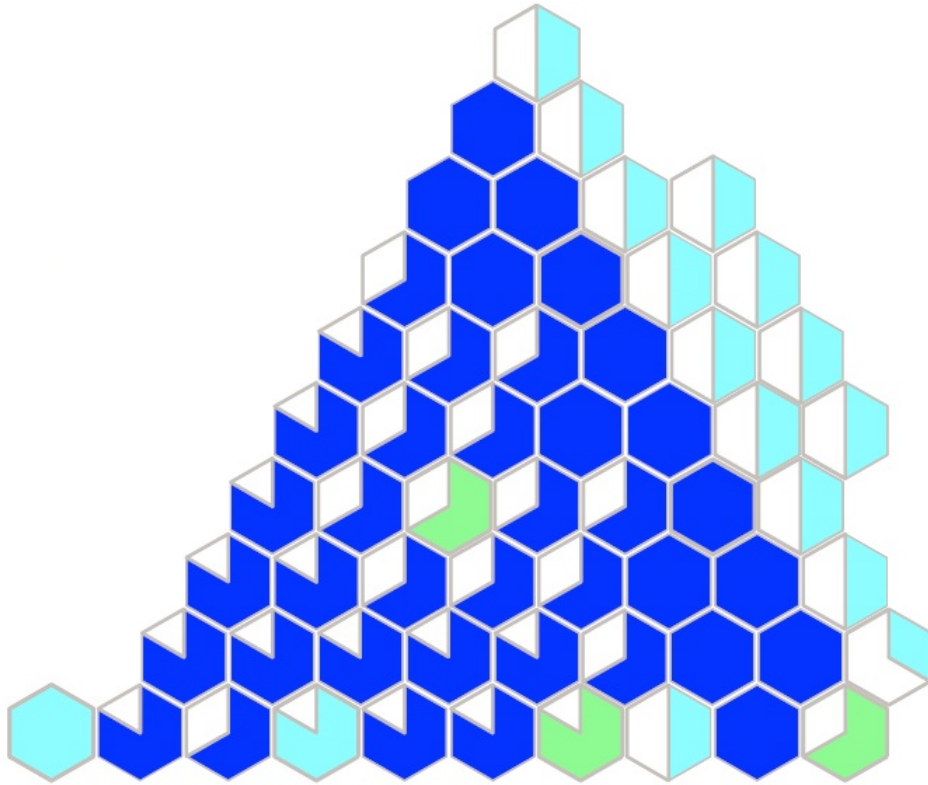
Na palivový cyklus této délky se začalo přecházet již po dvou letech provozu EDU, celkového přechodu se dosáhlo po deseti letech. Nepřešlo se rovnou na čtyřletý cyklus z důvodu, že bylo zatím málo informací s metodou in—out. Další velmi důležitým důvodem bylo obohacení paliva. Palivo se stávajícím obohacením nebylo schopné provozovat reaktor po čtyři roky. Proto byl nejprve zaveden tří a půl roční cyklus a postupně se přešlo na čtyřletý. Tomuto přechodu, ale přecházelo vyšší obohacení paliva. Bylo použito nové radiálně profilované palivo. Jmenovité obohacení bylo 3,82 %. Dnes je tento cyklus již zastaralý a používá se vesměs jen v Rusku, kde mají přepracovavací závody na vyhořelé jaderné palivo. Při přechodu na čtyřletý cyklus je využívána metoda in—out. Tedy do první a druhé skupiny palivových kazet jsou vloženy nejstarší kazety. Pro lepší využití paliva lze vzít kazety s vysokým obsahem ^{235}U a vložit je do druhé skupiny, což vede k obrovským snížením nákladů. D o třetí skupiny pak lze umístit jednu kazetu, která pobyla v reaktoru dva roky a ostatní musí být čerstvé. Takto bývá vyřešena i čtvrtá skupina. Poslední čerstvá regulační kazeta je umístěna na první pozici. Ve skupině pět jsou poté uloženy dvouleté a jedna trojletá. Šestá a sedmá skupina obsahují tři roční a jsou doplněny dvouletými. Výhradně jednoleté kazety jsou použity v dalších dvou skupinách, tedy devět a jedenáct. Desátá obsahuje tři kazety, jednu roční a zbytek dvouleté. Pokud se tedy podíváme na výměnu, vidíme, že je potřeba vyměnit 13 pracovních kazet a buď jednu, nebo dvě regulační. Při čtyřletém cyklu lze tedy použít například tento logický proces vyměněny. V první roku bude vyměněno 13+2, ve druhém 13+1, ve třetím 13+2, stejně jako ve čtvrtém.[11] Názorně je vyobrazeno na Obr.4.3.

4.4 Pětiletý palivový cyklus

Cyklus této délky je aktuálně využíván jak na EDU. Zatím se ukazuje jako nejekonomičtější. Jako v ostatních případech, nastává zde problém s obohacením paliva. Obohacení, jež pokrývalo čtyřletý cyklus je zde opět nedostatečné a muselo se tedy přistoupit ke zvýšení. Přešlo se tedy z obohacení 3,82 % na obohacení 4,38 %.

Zvýšení obohacení přineslo již avizovaný problém. Zvýšení reaktivity po vložení čerstvého paliva. Důsledkem vysoké reaktivity vzniká nerovnoměrnost rozložení výkonu v reaktorové nádobě. Řešením jsou výše popsané absorbatory, které jsou vyrobeny z gadolinia, proto také označení paliva Gd-1.

Další adaptací bylo vytvoření paliva s označením Gd-2. Toto palivo má nižší obo-



Obr. 4.3: Kazety při čtyřletém palivovém cyklu [13]

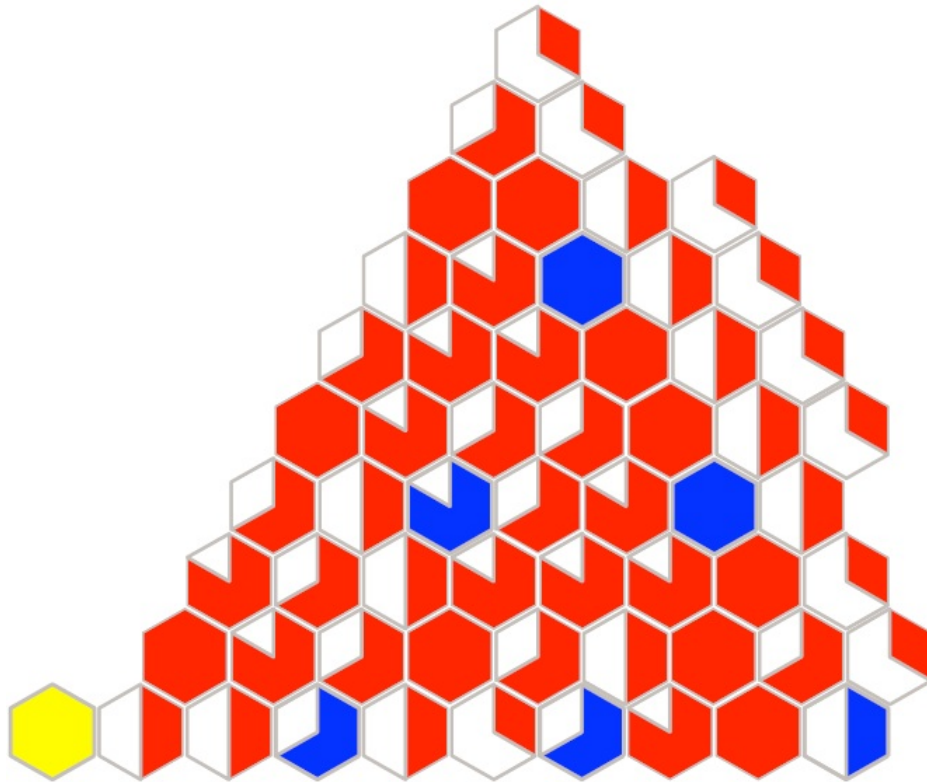
hacení než Gd-1 a proto bylo třeba vytvořit změny, které by to vykompenzovaly. Byl zlepšen vodo-uranový poměr a palivový proutek v palivu byl prodloužen o šest centimetrů. Díky tomu byla zvýšena i efektivní délka kampaně z původních 320 dnů na 330. Prodloužení tedy opět vedlo k lepší ekonomii paliva, ale klade větší nároky na rychlost a preciznost při odstávce a výměně paliva.

Při další inovaci paliva se na návrzích podílela ŠKODA JS, a.s. a tím dala vzniknout novému palivu s označením Gd-2+. Dalším palivem bylo palivo Gd-2M, které opět mělo pozitivní dopad na zvýšení výkonu a prodloužení efektivní doby kampaně. Díky tomuto palivu byl zvýšen výkon o 5 % a efektivní doba cyklu prodloužena na 340 dnů. Palivo s tímto označením je aktuálně používáno na EDU. Díky tomuto palivu a dalším změnám je výkon na jednom bloku 500 MW. Tedy byl navýšen na 113 % oproti plánovanému. Zvýšení výkonu bylo dosaženo díky modernizaci a byly modernizovány zařízení jako nízkotlaká a vysokotlaká část turbíny. Při použití pětiletého cyklu je naplánováno vyměnit každý cyklus 72 kazet. Jde pouze o přibližnou hodnotu, neboť pokud by se každý rok vyměnilo 72 kazet, tak za pět let by se celkem vyměnilo 360 z 349 kazet v reaktoru. Důvodem je menší obohacení

regulačních kazet, které je pouhých 3,82 %. Toto obohacení není schopné reaktor pět let. Proto při pětiletém cyklu jsou po dobu pěti let v reaktoru kazety pracovní, ale regulační ne vždy. Pro lepší ekonomii provozu reaktoru, lze ještě využít kazety, které byly odloženy v bazénu. Jde pouze o některé, ale narušuje to teoretickou pravidelnost. Dále je zde faktor poruchy kazety. Poškozená kazeta či jinak porouchaná je zaměněna za novou. V historii EDU byly vyměněny 4 poškozené kazety.

Aktuálně se vkládá každou kampaň jiný poměr pracovních a regulačních kazet. Nejčastěji je vkládáno 60 pracovních + 12 regulačních a další kampaň je vloženo 66+6. Tyto poměry se střídají. Závazka je realizována samozřejmě metodou in-out.

Do první skupiny jsou vloženy nejstarší, čtyřleté kazety. V druhé skupině převažují tříleté, které jsou vkládány do středu a po krajích jsou čtyřleté. Třetí skupina obsahuje tři regulační, dále tři s dvouletým vyhořením a čerstvé kazety. Do čtvrté skupiny se provádí podobná skladba jako u třetí je s rozdílem že v ní nejsou regulační kazety. Pátá skupina obsahuje jednoletou až tříletou kazetu, do šesté skupiny se vkládají jako do páté jen bez tříletých kazet. Sedmá skupina v sobě skrývá dvě čerstvé, tři dvouleté a čtyřleté kazety. Osmá skupina je složena ze tří dvouletých a jedné tříleté. Devátá má jednu regulační a dvě roční kazety. Do desáté je vkládána jedna čerstvá a jedna tříletá kazeta, která je taky v jedenácté skupině. A poslední skupina má čistě regulační kazetu.[11] [12] Grafické vyobrazení rozložení kazet v jedné šestině je znázorněno na Obr4.4.



Obr. 4.4: Kazety při pětiletém palivovém cyklu [13]

4.5 Šestiletý palivový cyklu

Jde spíše o teoretickou možnost pro Českou republiku. Společnost ŠKODA JS, a.s. Plzeň navrhla palivo s obohacením 4,78 %, které by vedlo k šestiletému cyklu. Zvýšení obohacení sebou nese značné finanční zatížení v jiných oblastech. Se zvýšeným obohacením je třeba zvýšit obsah gadolinia, pro snížení reaktivity v počátku kampaně. Tím by bylo potřeba zesílit stěny kontejneru CASTOR pro dočasné uložení vyhořelého jaderného paliva. Dalším hlediskem je značná složitost při návrhu aktivní zóny. Nejpodstatnějším faktorem je ale asi cena, kterou navrhovala společnost TVEL. Třetí blok EDU, kde jsou zatím nejlepší výsledky, má některé kazety v aktivní zóně i po dobu šesti let. Slovenska republika se snaží přiblížit šestiletému cyklu a to tím že v elektrárně Bohunice zavezla palivo se středním obohacením 4,87 %. Aktuálně se tak děje i v elektrárně Mochovce.[11]

5 OPTIMALIZACE PALIVOVÝCH VSÁZEK

Jde o jeden z nejobtížnějších problémů při provozu jaderného reaktoru. Tato obtížnost plyne z náročnosti výpočtu, obrovské množství možných řešení, minimalizace počtu a doby řešení. Z těchto předpokladů se vyloučily přesné exaktní matematické výpočty, které jsou nejpřesnější, ale časová náročnost je neúnosná. Proto se pro výpočty využívají heuristické algoritmy.[13]

Heuristika je jako metoda využívána z důvodu poskytování dosti přesných výsledků v krátkém čase, které nelze jednoduše matematicky odvodit. O rozvoj těchto algoritmů se zasloužila potřeba řešit problémy, které jsou popsány složitými průběhy. Průběhy obsahující mnoho extrémů a jsou ovlivňovány mnoha parametry. Na takovéto problémy již nepostačovali deterministické algoritmy, a proto byla rozvinuta heuristika.[13]

Optimalizace jako taková existuje již od dob rozvoje komerčních jaderných elektráren. Principem je různé uspořádání palivových kazet tak, aby byl nalezen optimální poměr mezi bezpečnostním a ekonomickým aspektem. Jak již bylo zmíněno výše, ekonomický aspekt se dá nejvíce ovlivnit délkou cyklu, proto se u reaktorů VVER přecházelo postupně z tříletého na pětiletý cyklus. Dále jde o využití jaderného paliva a také namáhání reaktorové nádoby. Velký důraz je vždy kladen na bezpečnostní hledisko a je důkladně kontrolováno v České republice SÚJB.

K výslednému rozložení jednotlivých kazet je využito optimalizačního programu s výpočetním makrokódem. Efektivitu přesouvání palivových kazet zajišťuje optimalizační algoritmus. Výsledné návrhy aktivní zóny jsou poté použity jako základ při výpočtu makrokódu, ten svým výpočtem získá fyzikální veličiny. Ty jsou nazpět předány optimalizační části a ta opět dle fyzikálních veličin rozhodne. Pro různé typy reaktorů jsou používány různé výpočetní makrokódy a optimalizační algoritmy.[14]

V našem případě si podrobně probereme makrokód Moby-Dick a hlavně výpočetní program ATHENA. Pomocí těchto programů byl realizován celý praktický výpočet.

5.1 Makrokód Moby-Dick

Pro výpočet neutronově-fyzikálních vsázek reaktorů VVER se používá program Moby-Dick, Program dovoluje výpočet reaktoru VVER-440 a také VVER-1000. Základem je algoritmus, který je založen na diferenčním řešení více grupové soustavy

difúzních rovnic pro hustotu neutronového toku. Tuto soustavu rovnic umožňuje řešit modulární struktura programu pro různé typy prostorových sítí. Jde o trojúhelníkovou, pro hrubo síťové řešení, šestiúhelníková pro jemno síťové řešení. Dále můžeme využít různých geometrií a to 2D a 3D. Pro symetrii aktivní zóny můžeme využít funkcí od 30° symetrie až po výpočet celé aktivní zóny.[12]

Pokud zvolíme hrubo síťové řešení, můžeme volit počet bodů po průřezu palivového souboru. Od 6 do 216. Při trojrozměrném řešení se využívá regulární dělení po výšce aktivní zóny s počtem bodů nejčastěji 42. Na okraji aktivní zóny však musíme nadefinovat okrajové podmínky, a to se učiní pomocí tzv. gama-matic. Moby-Dick neobsahuje pouze neutronově-fyzikální model, ale obsahuje také jednoduchý teplo-technický modul, jež v sobě zahrnuje zpětnou vazbu teploty, která působí od chladiva.

Při výpočtu se využívají knihovny malogrupových konstant, jež jsou připraveny pomocí transportního mnoho grupového kódu WIMS. Kód je z Velké Británie a využívá základní neutronová data. Výsledky tohoto výpočtu pro jednotlivé typy paliva a pro celý rozsah provozních parametrů jsou aproximovány díky polynomům. Provozními parametry jsou teplota chladiva a moderátoru, výkon, koncentrace bóru, vyhoření a další. Takto vzniklé polynomy jsou charakterizovány svými koeficienty. Koeficienty jsou ukládány v binárním tvaru do knihovny difúzních dat kódu Moby-Dick, vlastní polynomy jsou zabudovány přímo do algoritmu kódu. Výpočet těchto polynomů se neprovádí na EDU. Knihovny jsou objednány od ŠKODA JS, a.s Plzeň. Škoda je průběžně modernizuje a obnovuje.[15]

Dle zadaného typu výpočtu je možné získat následující základní výsledky:

- vyhoření, teploty chladiva a paliva, pole specifických výkonů, koncentrace izotopů otravy a neutronových toků v zóně (s detailností odpovídající použité síti a grupovému systému)
- účinnosti a kritické parametry regulačních prostředků (mechanická a chemická regulace)
- integrální charakteristiky výkonové distribuce (hodnoty souborových a kanálových koeficientů nevyrovnání, axiální offset)
- efektivní kinetické parametry
- koeficienty charakterizující vstupní parametry chladiva (tlak, teplota, průtočné množství), efekty a koeficienty reaktivity (výkonový, včetně jeho jednotlivých složek), koeficienty, jež odpovídají změnám parametrů v každém bodě o stejnou hodnotu (teplota a hustota moderátoru a teplota paliva)
- veličiny úměrné odezvě ionizační komory (neboli hustotě toku tepelných ne-

utronů v místě ionizační komory)

- odchylky od lineárního výkonu a změny lineárního výkonu v proutku od limitních hodnot závislých na vyhoření, tyto veličiny bývají označovány také jako Briqovy veličiny.
- průběh výkonu a dalších charakteristik reaktoru při kinetickém výpočtu s uvažováním vlivou zpožděných neutronů.
- hustota toku rychlých neutronů v místě svědečných vzorku a v oblasti tlakové nádoby (na vnitřním povrchu ve čtvrtině tloušťky tlakové nádoby, v polovině, na vnějším povrchu a za návarem) a jejich časový integrál

Moby-Dick má systém archivů, které efektivně využívají organizování výpočtů s návazáním na libovolný archiv, včetně využití paliva již vyvezeného z aktivní zóny do skladovacího bazénu. Je to z důvodu že palivo již vyvezené lze ještě vrátit do aktivní zóny reaktoru. Základní parametry stavů, jež byly analyzovány, jsou v binárních, nebo textových souborech. V textových souborech jsou ve formě tabulek základních parametrů charakterizujících příslušný stav, map aktivní zóny s informacemi o hodnotách parametru navoleného ve vstupních datech v jednotlivých souborech. Pokud bychom chtěli získat další informace o dalších parametrech, jsou k tomu určeny jednoúčelové programy z archivních souborů.[12]

5.2 Optimalizační program ATHENA

Je určen k optimalizaci návrhů palivových vsázek dle zadaných omezujících kritérií. Výsledkem je dosažení požadované délky kampaně při minimalizaci čerstvých palivových kazet při dodržení kritérií. Je tvořena dvěma stěžejními částmi[12]:

- optimalizace palivové vsázky
- fyzikální model AZ pomocí makrokódu Moby-Dick

ATHENA je program, který je součástí optimalizačního systému OPAL, nyní je samostatně vyvíjen ve spolupráci ŠKODA JS, a.s., ČEZ a.s. a Západočeské univerzity v Plzni. Vývoj si klade za cíl program, který by byl schopen navrhnout funkční a kvalitní vsázku jaderného paliva nejlépe v kratším čase, než dokud používané programy. Primárně je určen pro reaktory VVER, avšak není tím omezen a může být použit i pro jiné typy reaktorů a také může být využito jiného makrokódu než Moby-Dick.[16]

V současnosti je program otestován pro optimalizaci EDU a také i nově na ETE. V aktuální verzi je doporučováno využít automatického výpočtu optimalizované vsázky, kdy uživatel zadá sadu palivových článků a kritéria na limit parametru Kr. Průběh výpočtu je s automatikou využití generované počáteční vsázky, která určuje párování kazet ve 30-ti stupňové symetrii. Hlavním parametrem pro optimalizaci je

dodržení limitu Kr. Jedná se o parametr nevyrovnosti výkonu po proutcích. Jde o bezrozměrnou jednotku, která je počítána jako aktuální výkon v daném proutku ku průměrnému výkonu.[16]

5.2.1 Práce s programem ATHENA

Ke komunikaci s programem slouží příkazový řádek a předávání údajů pomocí vstupních a výstupních souborů.

Pracovní adresář a adresář atwell

Musí obsahovat soubory vstupních parametru a to *parameter_base.inp* a *parameter_user.inp* a adresář *atwell*, který musí obsahovat všechny ostatní soubory – knihovna palivových článků, soubory rozhraní, fyzikální makrokód a jeho vstupní soubory. Po spuštění programu rozkopíruje tyto soubory do pracovních adresářů ve tvaru *at0*, *at1*, atd.

Pro uživatele je nejdůležitější nastavit vstupní soubor *parameter_user.inp*, proto si nyní vysvětlíme nejdůležitější nastavitelné parametry a uvedeme jaké nastavení jsme použili pro náš výpočet. Soubor *parameter_user.inp* tedy obsahuje tyto nastavitelné parametry[15]:

- *SYMETRY*–zahrnuje typ rotační symetrie, zvolili jsem 30-ti stupňovou symetrii
- *ALGORITHM_TYPE*–volba optimalizační metody, zvolena byla plně automatická optimalizace s využitím všech dostupných módů makrokódu.
- *NUMBER_OF_CORES*–udává počet současně spuštěných fyzikálních makrokódu, v našem případě jsem zvolili 2.
- *USE_EXTERNAL_INITIAL_SOLOUTION*–parametr který určuje, zda první vsázku načteme z externího souboru
- *IDENTIFICATION_FILE_INITIAL_SOLUTION*–název externího souboru pro první vsázku
- *INITIAL_SOLUTION*–je to vektor jež určuje prvotní vsázku
- *NO_MOVE_POSITIONS*–určuje zafixování určitých palivových článků, my jsme zafixovali pozice 1,4,7,10,30,33,50.
- *NUMBER_OF_COMPUTATIONS*–udává kolik výpočtu se má spočítat,
- *KQ_UPPER_LIMIT*– jde o nastavení horní hranice nevyrovnanosti výkonu, po kazetách v našem případě je horní hranice dána hodnotou 1,48
- *KR_UPPER_LIMIT*–jedná se opět o horní hranici nevyrovnanosti výkonu, nyní po proutkách, zvoleno 1,55, jde o jeden s nejdůležitějších parametrů

- *KQ_MODE_SETTING*– přesnost výpočtu pro určení K_q , zvoleno pro 3D výpočet
- *KR_MODE_SETTING*–přesnost výpočtu pro určení K_r , zvoleno poproutkově

Rozhraní s fyzikálním makrokódem

Pro komunikaci s makrokódem je použito jedno řešení, pokud jsme nastavili parametr *NUMBER_OF_CORES* na hodnotu větší jak jedna, výpočet probíhá paralelně v oddělených adresářích.

Komunikaci mezi optimalizačním programem a makrokódem zajišťují dva soubory, jeden soubor je výstup z optimalizačního programu. Ten v sobě nese informace o počtu řešení a počtu uvažovaných pozic, tedy délku řešení. Vstupní soubor optimalizačního programu předává informace o nevyrovnání výkonu, koncentrace kyseliny borité, vyhoření a další potřebné hodnoty. Tento proces se stále opakuje.[15]

Výstupní soubory optimalizace

Výstupních souborů je hned několik, slouží pro rozbor chování algoritmů jako vstupní soubory pro grafické znázornění. V našem případě je nejdůležitější soubor *current.out*, obsahuje údaje pro všechna procházená aktuální řešení. První číslo udává krok řešení, dále pořadové číslo vsázky při generování, odhad počtu zbývajících řešení, mód fyzikálního makrokódu, hodnotu, délku kampaně, parametr K_q , tedy nevyrovnanost výkonu po kazetách, dále parametr K_r , nevyrovnanost výkonu po proutcích, koncentraci kyseliny borité a dále jen vektor jež zahrnuje rozmístění kazet v aktivní zóně. [15]

6 VÝSLEDKY OPTIMALIZACE S 9 ČERSTVÝMI KAZETAMI

Výpočet byl prováděn pro 4. blok na EDU. Před výpočet jsme vzali tyto parametry, na kterých reaktor poběží. Vstupní teplota do reaktoru 267,1 °C, tepelný výkon reaktoru 1444 MW a poloha HRK¹ 214 cm. Dále jsme uvažovali výpočet s dvěma verzemi Moby-Dick a to upgrade5 revize 17, tuto verzi budeme pro lepší rozlišení označovat jako starou. Nová verze Moby-Dick nese verzi s označením 09k5m2. Výpočet byl proveden se stejným optimalizačním programem i totožným nastavením, jen fyziku reaktoru obstarával makrokód nové a staré verze. Všechny programy potřebné pro tento výpočet byly zapůjčeny od ŠKODA JS, a.s Plzeň.

Jako vstupní hodnoty pro výpočet je soubor *gafuel.lib*, který v sobě zahrnuje kazety, jež byly použity při výpočtu optimalizace.

V souboru je devět čerstvých kazet s označením 6800 typ kazety je SUP43PS3, dále vkládáme dvě čerstvé HRK kazety s typem SUR42RRI. Z bazénu byla použita jedna kazeta s označením DB3C21EX. V reaktoru zůstávají dvě kazety šestým rokem, 7 kazet rokem pátým a z toho je jedna kazeta HRK, 14 kazet čtvrtým rokem, dvě jsou typu HRK. Třetím rokem je zde 12 kazet, jedna HRK. Rokem druhým je zde kazet 13, přičemž jedna kazeta je HRK. Prvním rokem uvažujeme kazety čerstvé.

6.1 Nový Moby-Dick

Výpočet byl proveden s novou verzí Moby-Dick a to 09k5m2. Níže jsou uvedeny výsledky optimalizace s devíti čerstvými kazetami.

Byly vybrány vhodné konfigurace a to dle nejdelší doby kampaně a nejmenšího Kr. První a nejlépe vyhovující konfigurace je zobrazena na Obr.6.1. Barvy reprezentují vyhoření jednotlivých kazet, tmavě modrá barva zastupuje nulové vyhoření, dále jde přes světle modrou, zelenou, oranžovou až po červenou. Právě červená zastává největší stupeň vyhoření. Kazety jež mají černé obtažení jsou kazety typu HRK. Vsázku budeme hodnotit dle skupin, jednotlivé označení skupin je v Tab4.1 a označení jednotlivých kazet je na Obr. 4.1.

Ve skupině 1 jsou kazety nejvíce vyhořelé, což je velmi dobře, neboť nebudou vytvářet velký neutronový tok na nádobu, skupina číslo dva zahrnuje v sobě taky jednu

¹Havarijní a regulační kazety

z nejvíce vyhořelých kazet, jak je vidět uprostřed skupiny jsou méně vyhořelé, což dává jakési odstupňování od stěny reaktorové nádoby, skupina tři obsahuje 6 čerstvých kazet, dvě jsou HRK. Na krajích této skupiny jsou kazety velmi vyhořelé jedna z nich je typu HRK. Skupina 4 obsahuje dvě kazety čerstvé a většinu kazet, které jsou už rok v reaktoru. Ve skupině 6 jsou umístěny dvě kazety HRK, všechny kazety HRK mají předem své pevné místo, proto se kolem HRK kazety na pozici 30 ve skupinách 4,5,6 shromažďují kazety, které jsou v reaktoru dva a tři roky, do skupiny 8 jsou umístěny dvě čerstvé kazety, skupina devět obsahuje jednu HRK kazetu, která je již tři roky v reaktoru. Skupina 10 obsahuje zajímavě jednu kazetu čerstvou a jednu, která je zde čtyři roky. Skupina 12 obsahuje HRK kazetu, která v reaktoru již bude čtvrtým rokem.

Na Obr.6.2 je možno vidět druhou nejlepší vsázkou pro nový Moby-Dick s devíti čerstvými kazetami. Na obrázku je vidět s porovnání s první konfigurací, že jsou si velmi podobné. To je znakem správného výsledku, kdy optimalizační program se pokoušel docílit nejlepší vsázky přehozením kazet stejného vyhoření. V našem případě jsou dle první konfigurace proházeny kazety ve skupinách 4,5,6,7 a 9. Pokud se podíváme pozorněji, zjistíme, že kazety jsou přehazovány dle středové symetrie, která je znázorněna na Obr. 4.1. Tímto prohozením jsme o zkrátily délku kampaně asi o necelou hodinu při zachování stejného Kr.

Konfigurace č.3 je na Obr. 6.3. V porovnání s předchozí konfigurací, tedy konfigurací číslo 2, nastaly jen velmi malé změny. Jmenovitě jde o prohození kazet ve skupině 7 a byly zaměněny kazety na pozicích 6 a 35. Dále ve skupině 9 jsou zaměněny kazety na pozicích 20 a 12. Tímto způsobem jsem docílili prodloužení o více než hodinu, avšak je to za cenu zhoršení nevyrovnání výkonu na hodnotu $Kr=1,556$.

Poslední vybraná konfigurace č.4 je na Obr.6.4. Tato konfigurace v porovnání s konfigurací č.3, respektive se všemi předchozími konfiguracemi vykazuje asi největší změnu zpřeházení kazet. Kazety byly měněny ve skupinách 3,4,5,6,7 a 10. Zde jsou už také zaměňovány kazety, které v reaktoru jsou již čtyři roky. Tady ta konfigurace je méně vhodná, neboť oproti předešlé konfiguraci zkrátila kampaň asi o 6 minut při zachování stejné hodnoty Kr. Toto zkrácení je zanedbatelné, zde je krásný příklad toho, že kazety na různě umístěných pozicích můžou dosáhnout téměř stejného výsledku. Ve srovnání s první konfigurací, kterou jsme zvolili, jako nejvhodnější se nevyrovnanost výkonu změnila z 1,555 na 1,556 a vsázka prodloužila o 8 minut. Při tak malém změně délky kampaně je pro nás rozhodující koeficient nevyrovnanosti výkonu.

Pří komplexním pohledu na vybrané konfigurace, je vidět že vsázky 1,2,3 se jen velmi málo od sebe liší, což ukazuje na fakt, že byla vybrána vhodná konfigurace. Vsázka č.1 je nejvhodnější z důvodu dlouhé doby kampaně a malého nevyrovnanosti výkonu.

Nevyrovnanost výkonu po proutkách je časově závislý parametr, je velmi ovlivňován gadoliniem v palivu, kdy právě gadolinium zajišťuje jeho snížení na přijatelnou mez. Jak gadolinium vyhořívá, začne opět narůstat i Kr. Pro korektní představu je vynesena průběh Kr na čase v průběhu kampaně.

Na Obr. 6.5 je vynesena tento průběh. Z grafu je patrné že největší nevyrovnanost je na začátku kampaně, Kdy v průběhu několika desítek hodnot nevyrovnanost rapidně poklesne. Konfigurace č.1 a č.2 mají téměř totožný průběh. Můžeme zde vidět, že nabývá dvou lokálních extrémů, jeden nastane asi v 70 dnu kampaně a druhý asi kolem 190. dne kampaně. Druhý lokální extrém má značnou hodnotu a dosahuje téměř maximální hodnoty nevyrovnanosti výkonu. Od této chvíle pak téměř lineárně klesá. Pro konfiguraci č.3 a č.4, je nevyrovnanost výkonu téměř po celou dobu větší než pro předchozí dvě konfigurace, sdílí také lokální extrém ve 190 dnu kampaně, poté je opět jen lineárně klesá.

6.2 Starý Moby-Dick

Výpočet byl proveden se starou verzí Moby-Dick, verze upgrade5 revize 17. Níže jsou výsledky optimalizace s devíti čerstvými kazetami.

Z všech vypočtených optimalizací byly vybrány čtyři nejvhodnější konfigurace s ohledem na nejdelší dobu kampaně a nejmenší nevyrovnanost výkonu po proutkách. Konfigurace jsou seřazeny vzestupně od nejvíce vyhovující délce kampaně a nevyrovnanosti výkonu. Jsou vyjádřeny graficky, kde každá barva zachycuje i délku kazety v aktivní zóně.

První zvolena konfigurace je na Obr. 6.6. První a druhá skupina zahrnuje kazety nejvíce vyhořelé, je to opět dobře, neboť nebudou velké neutronové toky na stěnu reaktorové nádoby. Třetí skupina v sobě zahrnuje šest čerstvých kazet, další skupina má dvě čerstvé kazety a zbytek je doplněn kazetami, které byli v reaktoru jednu kampaň. Šestá skupina obsahuje dvě HRK, kdy je jedna v reaktoru rok a druhá dva. Okolo jednoleté kazety jsou naskládány dvou a tříleté kazety. Skupina 8 je tvořena dvěma čerstvými kazetami a jednou jednoletou a druhou tříletou. Skupinu deset

tvoří dvě kazety. Jedna čerstvá a jedna dvouletá. Ve skupině 12 je HRK, která je v reaktoru již tři kampaně. Délka kampaně byla stanovena na 268,23 dne s koeficientem nevyrovnanosti výkonu 1,553.

Konfigurace č.2 je na Obr. 6.7. Zde můžeme vidět značné změny hlavně v záměně dvouletých a tříletých pozic. V této konfiguraci oproti první jsou zaměněny kazety z pozice 36 na 37 a naopak. Dále z pozice 23 na 31 a naopak. Dalšími významnými změnami v této konfiguraci je skupina 4 a 5. Tyto změny vedli k nepříznivému vlivu jak k délce kampaně, tak i k velikosti nevyrovnanosti výkonu. Vlivem změn se délka kampaně zkrátila o dvě hodiny a nevyrovnanost výkonu vzrostla na hodnotu 1,565.

Další konfigurací je č.3, která je zachycena na Obr. 6.8. Vůči předchozí konfiguraci nastali změny ve skupinách 4,5,6,7 a 9. Nejvýznamnější změny jsou ve skupině 5, kde byly zaměněny všechny kazety kromě pozice 8. Další významnou změnou této konfigurace je záměna kazet na pozicích 37, 42 a 31, 15 zde byli zaměněny kazety, které v reaktoru jsou dva a tři roky. Výsledek této konfigurace oproti minulé je zkrácení délky kampaně a zhoršení nevyrovnanosti výkonu. Kampaně se zkrátí o 6 hodin a koeficient nevyrovnanosti stoupa na hodnotu 1,566.

Poslední konfigurací z byla vybrána konfigurace č.4 na Obr. 6.9. Tato konfigurace je velmi podobná konfiguraci č.2. Jedná se jen o záměnu kazet stejného stáří. Rozdílné jsou v množství vyhoření. Tato konfigurace sice získá delší dobu kampaně avšak za cenu zvýšení nevyrovnanosti výkonu. Délka kampaně bude prodloužena o 9 hodin a nevyrovnanost výkonu dosáhne na hodnotu 1,571. Tak velká nevyrovnanost výkonu po proutkách je nepřístupná pro vsázku.

Opět je vhodné se také podívat na průběh nevyrovnanosti výkonu vzhledem k času. Tento průběh je zachycen na Obr 6.10. Zde je vidět, že nevyrovnanost na začátku kampaně bude mít velkou hodnotu, během několika desítek hodin rapidně poklesne. Konfigurace č.1 má nejpříjemnější hodnotu Kr, ale se značnou změnou v průběhu kampaně. V asi 155 dnu dosáhne svého lokálního maxima, které převyšuje i počáteční nevyrovnanost. Od této chvíle téměř lineárně klesá. Konfigurace č.1 je výhodná, ale se značnými změnami v nevyrovnanosti výkonu v průběhu kampaně. Konfigurace č.2 má téměř totožný průběh jen s přičtením konstanty. Zbylé dvě konfigurace mají obrovskou počáteční nevyrovnanost výkonu, ale poté s určitou simplifikací můžeme říct, že klesá lineárně.

6.3 Srovnání nový Moby-Dick versus starý Moby-Dick

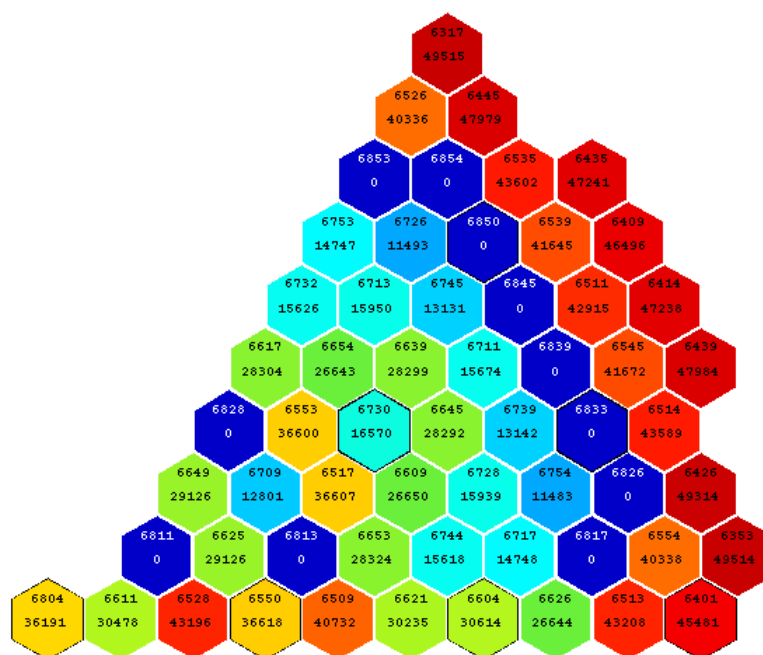
Optimalizace s rozdílnými makrokódy, respektive s jejich rozlišnými verzemi nám dala výsledky, které lze komparovat. První veličinou je délka kampaně. Nyní srovnáváme pouze námi vybraná čtyři konfigurace od daných verzí Moby-Dick. Pro nový Moby-Dick nám vyšla délka kampaně v rozmezí od 272,387 do 272,4386 dnů. Výsledky se tedy liší pouze o 5 setin. Pro starý Moby-Dick nám vyšla délka kampaně od 267,88 do 268,26 dnů. Zde se dané výsledky liší pouze o 0,04 dne. Hlavním faktorem je, ale rozdíl jednotlivých verzí. Nový Moby-Dick nám vypočítal délku kampaně o více jak 4 dny delší, než stará verze Moby-Dick.

Dalším kritériem, které lze komparovat je nevyrovnanost výkonu po proutkách, jedná se o koeficient Kr. Pro nový Moby-Dick nám vyšel v rozmezí od 1,555 do 1,556. Tedy liším se pouze o jednu tisícinu. Starý Moby-Dick dal rozmezí od 1,553 do 1,571, zde se liší výsledky o téměř dvě setiny, což je proti výsledkům od nového Moby-Dicku značný rozdíl.

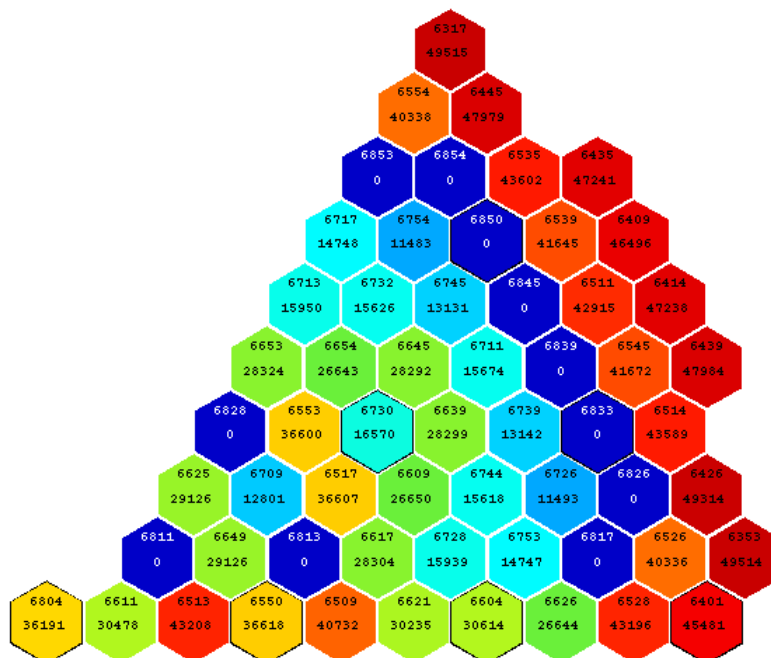
Lze také srovnávat časovou závislost nevyrovnanosti výkonu po proutcích, jednotlivé průběhy jsou na Obr. 6.5 pro nový Moby-Dick a na Obr. 6.10. Z porovnání grafů nám můžeme říct, že nový Moby-Dick má průběhy jednotlivých konfigurací téměř podobné, kdežto u starého Moby-Dick jsou dosti různorodé.

Pro další porovnání vybereme námi zvolené konfigurace od jednotlivých verzí Moby-Dicku. Zvolíme od každého konfiguraci č.1, které je dle našich kritérií nejvhodnější. Pro starý Moby-Dick je konfigurace na Obr. 6.6 a pro nový na Obr. 6.6. Srovnáním vidíme, že čerstvé kazety zaujímají totožné pozice, jde tedy o nejvýhodnější pozici. Dále skupina 1 a 2 jsou si velmi podobné. Tedy nejvíce vyhořelé jsou u stěny nádoby. Nejvýraznější změny jsou ve skupinách kazet 6,7,9 a 10. Nová verze ve skupině 10 použila čtyřletou kazetu, kdežto stará verze Moby-Dicku zde využila kazetu dvouletou. Podobná situace nastala ve skupině devět na pozicích kazet 20 a 12. Stará verze Moby-Dicku se jeví jako více kontinuálnější co do stáří kazet.

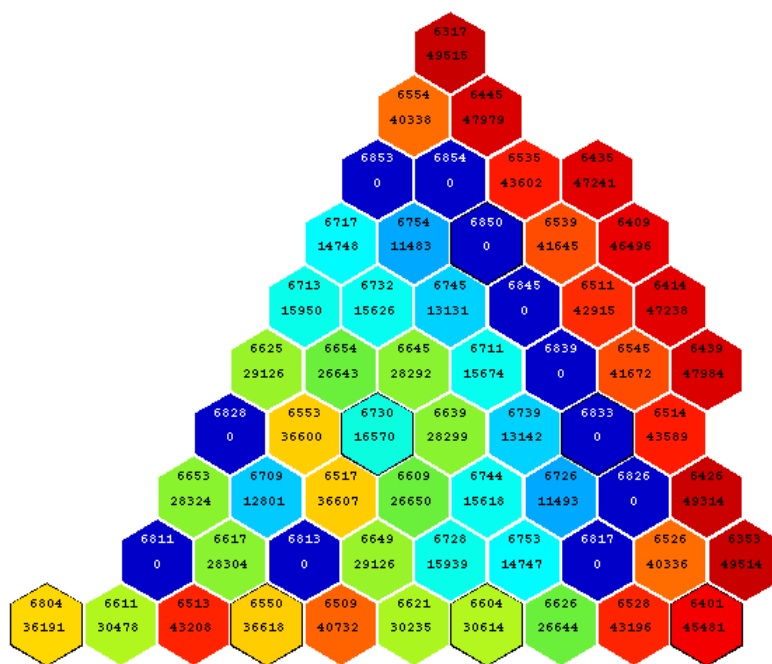
Výše popsané výsledky nám dávají možnost jednotně rozhodnout o tom, která verze dává přijatelnější výsledky. Nový Moby-Dick, má delší dobu kampaně okolo 272 dnů, nevyrovnanost výkonu okolo 1,555, časová závislost nevyrovnanosti výkonu je rovnoměrněji rozložená ale rozložení kazet je méně sourodé. Tedy nová verze Moby-Dicku je pro výpočet lepší.



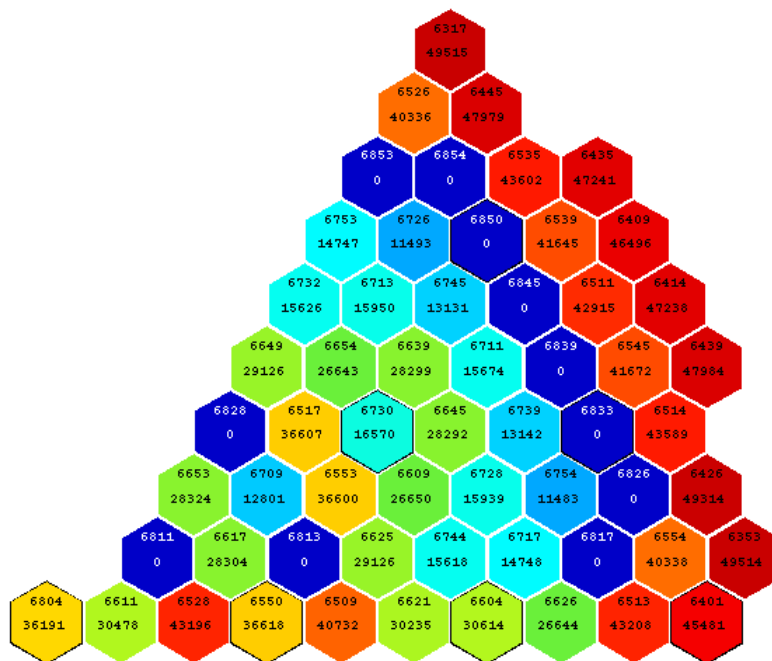
Obr. 6.1: Vsázka s 9 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.1, délka kampaně 272,4279 dne, Kr=1,555



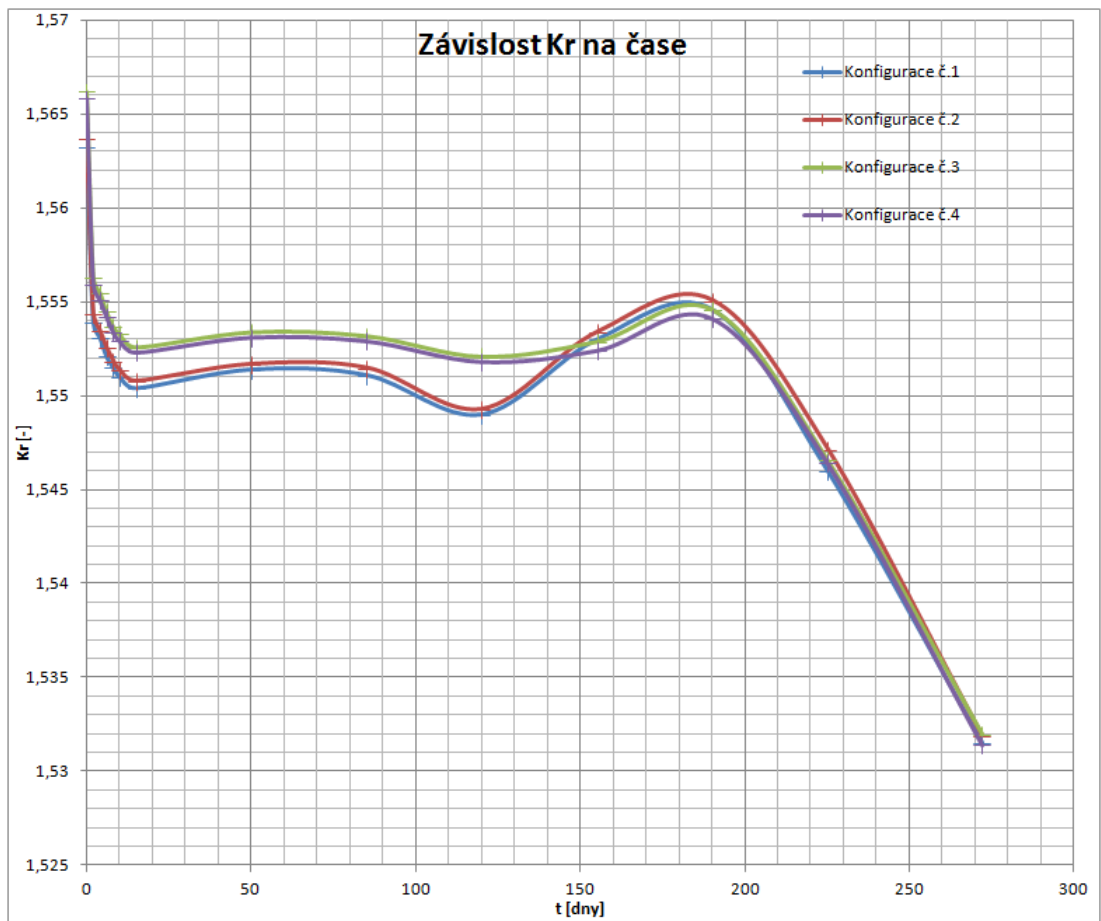
Obr. 6.2: Vsázka s 9 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.2, délka kampaně 272,387 dne, Kr=1,555



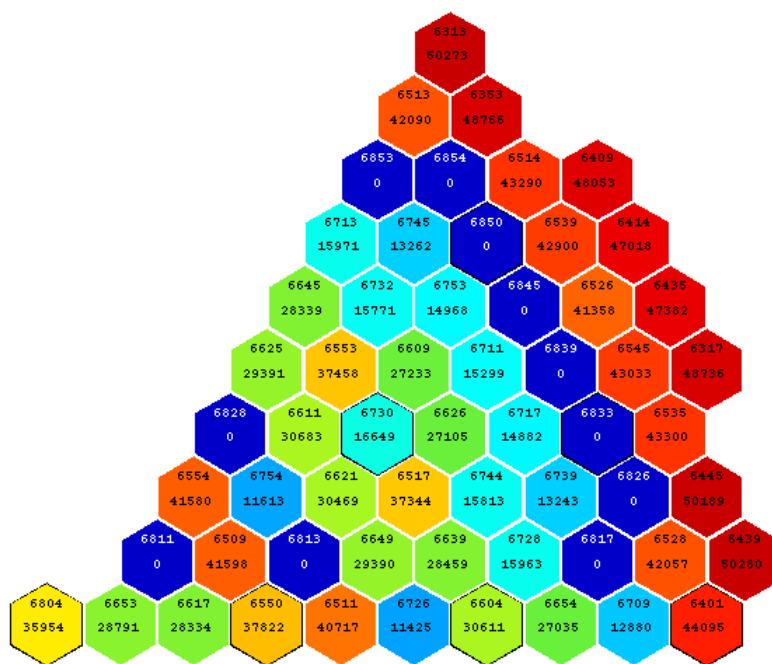
Obr. 6.3: Vsázka s 9 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.3, délka kampaně 272,4386 dne, Kr=1,556



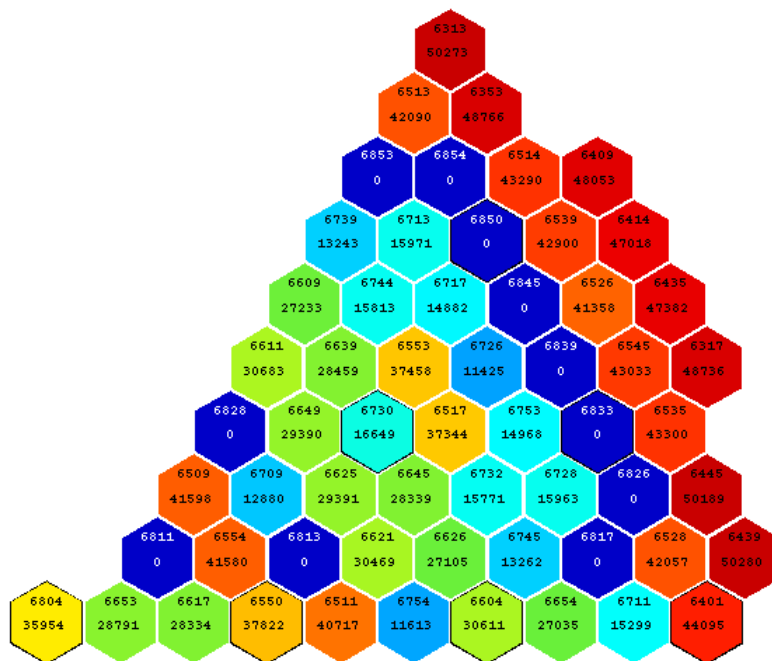
Obr. 6.4: Vsázka s 9 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.4, délka kampaně 272,4341 dne, Kr=1,556



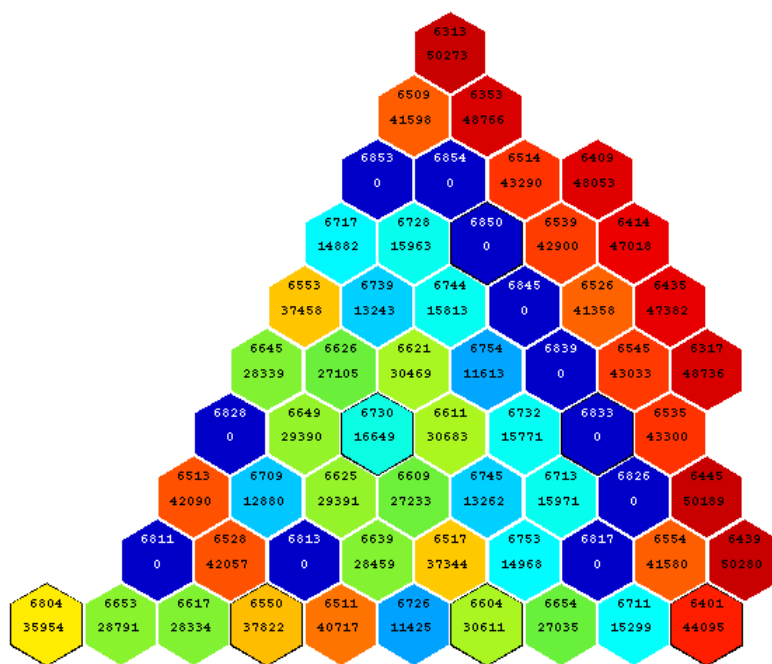
Obr. 6.5: Závislost nevyrovnanosti výkonu na čase s 9 čerstvými kazetami pro nový Moby-Dick



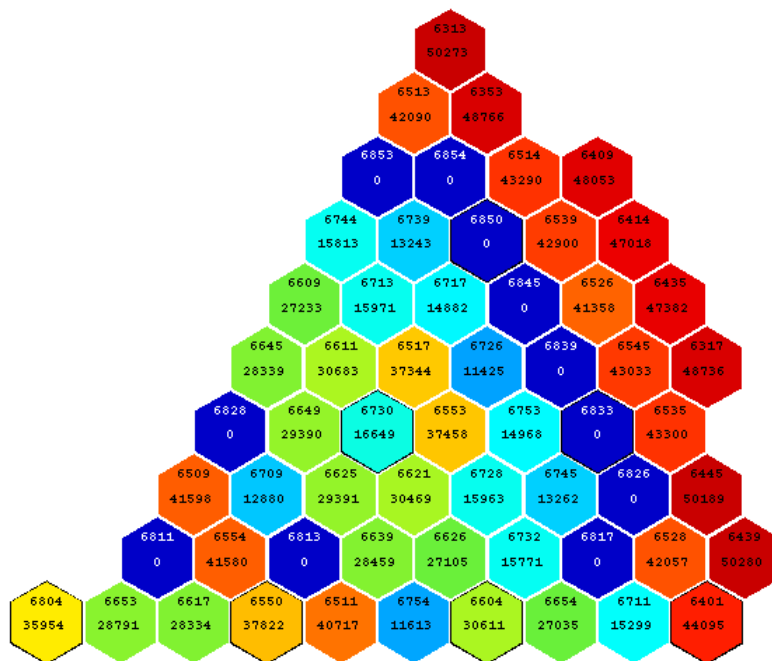
Obr. 6.6: Vsázka s 9 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.1, délka kampaně 268,23 dne, $Kr=1,553$



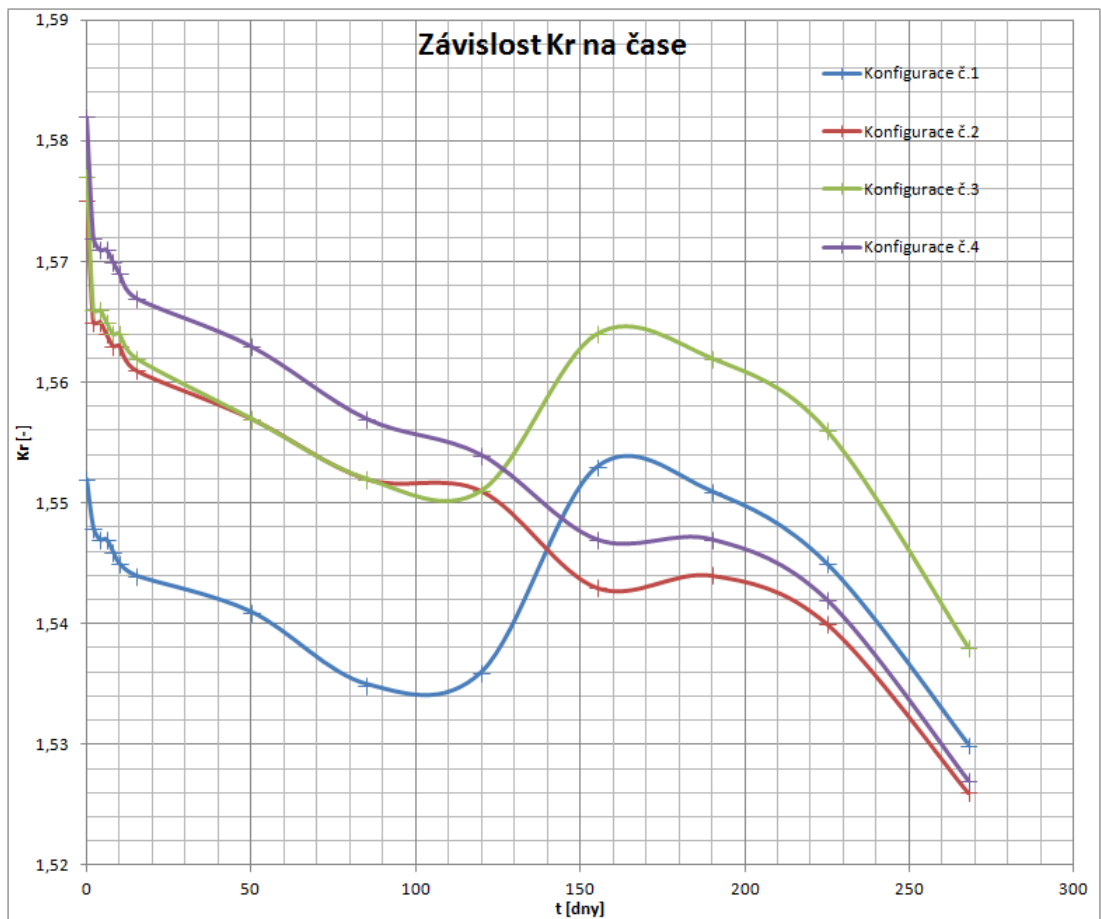
Obr. 6.7: Vsázka s 9 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.2, délka kampaně 268,15 dne, $Kr=1,565$



Obr. 6.8: Vsázka s 9 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.3, délka kampaně 267,88 dne, $Kr=1,566$



Obr. 6.9: Vsázka s 9 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.4, délka kampaně 268,26 dne, $Kr=1,571$



Obr. 6.10: Závislost nevyrovnanosti výkonu na čase s 9 čerstvými kazetami pro starý Moby-Dick

7 VÝSLEDKY OPTIMALIZACE S 11 ČERSTVÝMI KAZETAMI

Pracujeme s těmito hodnotami reaktoru, výkon 1444 MW, vstupní teplota do reaktoru 267,1 °C, a poloha HRK 214 cm. Dále jsme uvažovali výpočet s dvěma verzemi Moby-Dicku a to upgrade5 revize 17a 09k5m2. Výpočet byl proveden se stejným optimalizačním programem i totožným nastavením, jen fyziku reaktoru obstarával makrokód nové a staré verze.

Jako vstupní hodnoty pro výpočet je soubor *gafuel.lib*, který v sobě zahrnuje kazety, jež byly použity při výpočtu optimalizace.

Zde je vloženo 11 čerstvých kazet plus dvě čerstvé HRK, tyto kazety považujeme, že jsou v reaktoru prvním rokem. Druhým rokem je v reaktoru 13 kazet, jedna je HRK, třetím rokem je 12 kazet a jedna je HRK. Rokem čtvrtým 14 kazet a z toho 2 HRK, přičemž jedna kazeta je brána z bazénu. Pátým rokem 7 kazet, jedna je typu HRK.

7.1 Nový Moby-Dick

Výpočet se provedl s verzí Moby-Dick 09k5m2. Nyní zde budou popsány jednotlivé výsledky optimalizace pro námi vybrané konfigurace.

Jednotlivé konfigurace byly vybrány na základě délky kampaně a nevyrovnanosti výkonu. První konfigurace č.1 je na Obr.7.1. Jednotlivé vyhoření zastupují barvy, tak jak bylo zmíněno již výše. Opět zde budeme užívat označení jednotlivých kazet a skupin jak je v Ta 4.1 a na Obr. 4 .1.

Konfigurace č.1 má ve své první skupině kazet nejvíce vyhořelé, také ve druhé skupině má kazety nejdelší dobu pobývající v reaktoru, ale s menším vyhořením. Téměř celou skupinu tři tvoří kazety čerstvé, skupinu čtyři kazety čerstvé a jednoleté. Další čerstvé kazety jsou dvě ve skupině 7 a jedna ve skupině deset. Zajímavě umístěná je kazeta na pozici 21, kde je čtyřletá kazeta. Touto konfigurací lze dosáhnout délky kampaně 304,1116 dnů s nevyrovnaností výkonu 1,558.

Další vybraná konfigurace je na Obr. 7.2. Nese označení č.2. Oproti předchozí konfiguraci má značně zaměněny čtyřleté kazety, dále jsou významné změny na pozicích 3, 6 a 21 kde se zaměnili kazety s různým vyhořením. Pozitivní skutečností je že

všechny čerstvé kazety zůstaly na stejných pozicích jako konfigurace č.1. Výsledkem je kampaň je o jeden a půl dne kratší než předchozí konfigurace. Nevyrovnanost výkonu však klesla na hodnotu 1,55

Konfigurace č.3, první velkou změnou je záměna čerstvých kazet z pozice 35 na 28 a z pozice 14 na 13. Dále jsou zde ve velkém počtu zaměněny kazety čtyřleté. Ve skupinách 5, 7 a 8 jsou prováděny nevýznamnější změny kazet pro tuto konfiguraci. Díky této konfiguraci se zkrátí délka kampaně o 2 hodiny a koeficient nevyrovnanosti výkonu stoupne na hodnotu 1,55.

Poslední námi vybraná konfigurace pro vsázku s 11 čerstvými kazetami a novým Moby-Dickem je konfigurace č.4. Tato konfigurace je velmi podobná předchozí, jsou zde zachovány čerstvé kazety na stejných pozicích. Jsou zde zaměňovány kazety s přibližně stejným vyhořením. Nejvýznamnější změna je přehozením tříleté kazety z pozice 6 na pozici 2, místo čtyřleté kazety z pozice dva na pozici 6. Důsledkem toho se nám opět zkrátí délka kampaně o 15, ale zase získáme nízkou hodnotu nevyrovnanosti výkonu která činí 1,541.

Porovnání časové závislosti pro nevyrovnanost výkonu po proutkách pro jednotlivé konfigurace. Tento průběh je zachycen na Obr. 7.5. V průběhu Kr dosahuje dvou extrémů, okolo 160 dne lokálního maxima. Největší hodnota Kr je pro konfiguraci č.1. a nejmenší pro konfiguraci č.4. Lokální minimum dosahuje Kr od 70 až do 120 dne. Je vidět, že délka kampaně a nevyrovnanost výkonu jdou proti sobě. Delší kampaň je za cenu vyšší nevyrovnanosti výkonu. Od lokálního extrému jsou poté průběhy Kr pro všechna konfigurace téměř lineární.

7.2 Starý Moby-Dick

Výpočet byl proveden s makrokódem Moby-Dick verze upgrade5 revize 17. Níže budou popsány jednotlivé námi vybrané konfigurace.

První konfigurace je zachycena na Obr. 7.6. V první a druhé skupině kazet jsou opět nejvíce vyhořelé kazety což má pozitivní dopad na stěnu reaktorové nádoby. Ve třetí skupině jsou téměř všechny čerstvé kazety kromě jedné. Skupina 4 obsahuje dvě čerstvé kazety. Poslední tři čerstvé kazety jsou ve skupině 8, kdy tyto kazety kromě jedné tvoří celou skupinu. Takto navrhovaná konfigurace dává délku kampaně 302,34 dnů s koeficientem nevyrovnanosti výkonu 1,544.

V konfiguraci č.2 jsou zachovány čerstvé kazety jako na předchozích pozicích. Takto konfigurace je zachycena na Obr. 7.7 Změny nastaly ve skupinách 5,6 a 7. Nejvýznamnější je změna ve skupině 7 a to prohození kazet z pozice 29 na 35 a z pozice 22 na 14. Byly zaměněny kazety čtyřleté za tříleté. Vlivem těchto změn se kampaň zkrátí o 7 hodin a koeficient Kr vzroste na hodnotu 1,553.

Konfigurace č.3 je vyobrazena na Obr. 7.8. Zde můžeme vidět, že se konfigurace kazet ve skupině 8 opět vrací na pozice jako v konfiguraci č.1. Dále zde proběhla razantní změna na pozici 6 a 9. Na pozici šest byla zaměněna čtyřletá kazeta za tříletou a na pozici 9 je v této konfiguraci čtyřletá místo předešlé tříleté kazety. Výsledkem zpřeházení kazet v tomto duchu je zkrácení délky kampaně o 14 hodin a zvýšení nevyrovnanosti výkonu o jednu tisícinu.

Poslední konfigurace je konfigurace č.4. Ta je na Obr. 7.9. Třetí a čtvrtá konfigurace se liší jen velmi málo a to pouhou záměnou kazet ze pozic 29 a 35. A ještě jednou záměnou pozic 22 a 14. Důsledkem je zkrácení kampaně o necelou hodinu a vzrůst Kr na hodnotu 1,557.

Hodnocení časové závislosti nevyrovnanosti výkonu nám dá cenný pohled na danou problematiku a hodnocení vhodnosti dané konfigurace. Tyto průběhy jsou na Obr. 7.10. Zde můžeme vidět, že opět většina konfigurací v průběhu kampaně nabývá lokálního minima a lokálního maxima. Maximum se pohybuje kolem 160. dne. U konfigurace č.3 nám Kr mírně osciluje dokud nenabude svého maxim, což je okolo 130 dne. Poté už jen klesá. Od svého maxima jsou průběhy téměř lineární se zápornou směrnici. Zajímavým faktem je, že pro konfiguraci č.1, kterou považujeme za nejvhodnější má ve svém maximu nejmenší hodnotu Kr oproti ostatním konfiguracím. Díky tomu se stává ještě výhodnější pro vsázku do reaktoru.

7.3 Srovnání nový Moby-Dick versus starý Moby-Dick

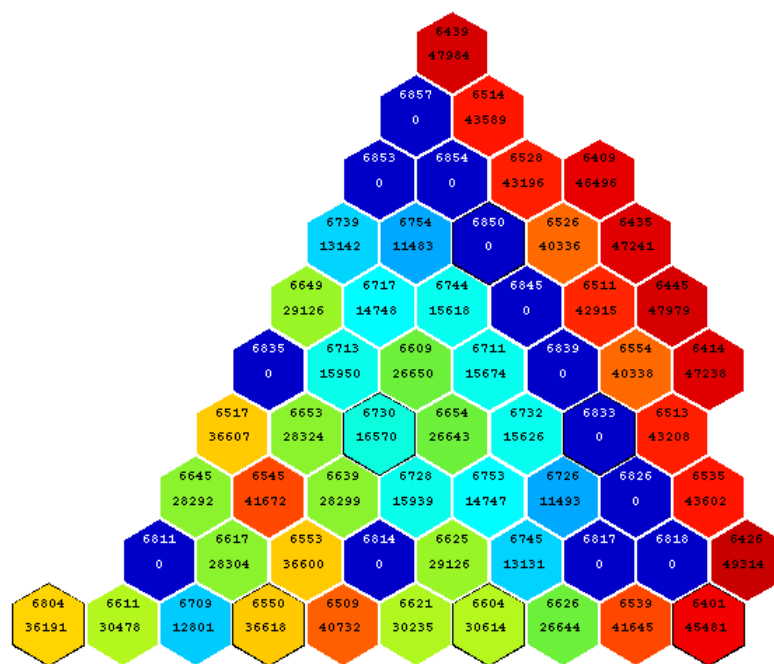
Díky optimalizaci s rozdílnými verzemi Moby-Dick máme možnost komparovat výsledky pro jednotlivé verze. Opět budeme porovnávat délku kampaně, nevyrovnanost výkonu a závislosti nevyrovnanosti výkonu na čase. Nejprve tedy srovnáme délku kampaně. Pro nový Moby-Dick se nám pohybovala v rozmezí od 301,9256 do 304,116 dnů. Zde nám to činí rozdíl už něco přes dva dny, což je při návrhu už dost podstatná doba. Pro starý Moby-Dick máme rozmezí 301,95 až 302,34 ,což je necelá polovina dne.

Nevyrovnanost výkonu pro novou verzi Moby-Dicku nám vychází v rozsahu od 1,541 do 1,558, což činí téměř čtyři setiny rozdílu. Stará verze nám dávala od 1,544 do 1,557 zde je rozdíl něco přes tři setiny.

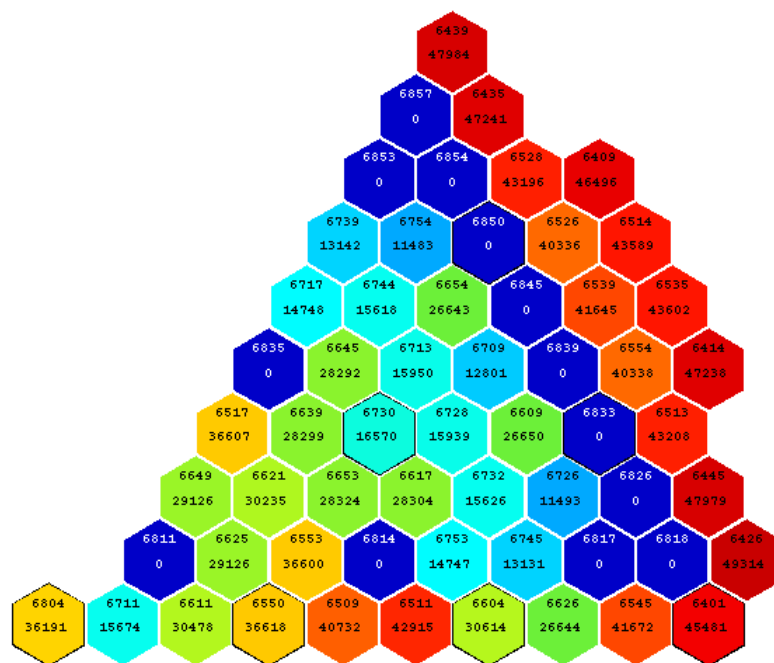
Časová závislost nevyrovnanosti výkonu je zachycena pro nový Moby-Dick na Obr. 7.5 a pro starý Moby-Dick na Obr. 7.10. Srovnání průběhů je vidět, že nový Moby-Dick dává výsledky poněkud kompaktnější, ale zase nejlépe vybraná konfigurace č.1 má nevyšší hodnoty Kr. Průběhy pro starý Moby-Dick jsou méně predikovatelné, hlavně pro konfiguraci č.3. Nicméně konfigurace č.1, námi nejlépe hodnocená, má nejnižší hodnoty Kr.

Posledním kritériem je rozmístění kazet při jednotlivých konfiguracích. Budeme srovnávat vybrané konfigurace č.1. Výrazným rozdílem je umístění čerstvých kazet. U nového Moby-Dicku jsou čerstvé kazety koncipovány ve skupinách 7 a 10, kdežto pro starý Moby-Dick jsou čerstvé kazety ve skupině 8. Další zaznamenaný rozdíl je ve skupině 7, kdy u nového Moby-Dicku jsou kazety pouze čerstvé a dvouleté. U starého Moby-Dicku tu jsou kazety tříleté. Další výrazná změna zde není

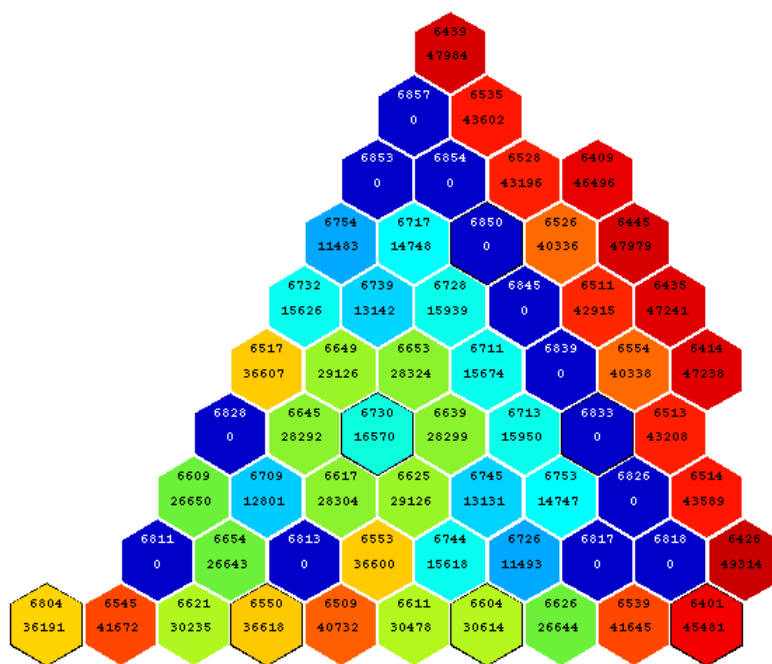
Jednotlivé srovnání nám dávají možnost komplexního srovnání verzí Moby-Dick pro vsázkou s 11 čerstvými kazetami. Pro nový Moby-Dick jsou délky kampaní poněkud delší a to až o dva dny. Nevyrovnanost výkonu dosahuje vyšších hodnot také nový Moby-Dick. Jednotlivé rozložení kazet se jeví přijatelnější od nové verze Moby-Dick. Také průběhy časové závislosti výkonové nevyrovnanosti jsou kompaktnější při použití nové verze Moby-Dick.



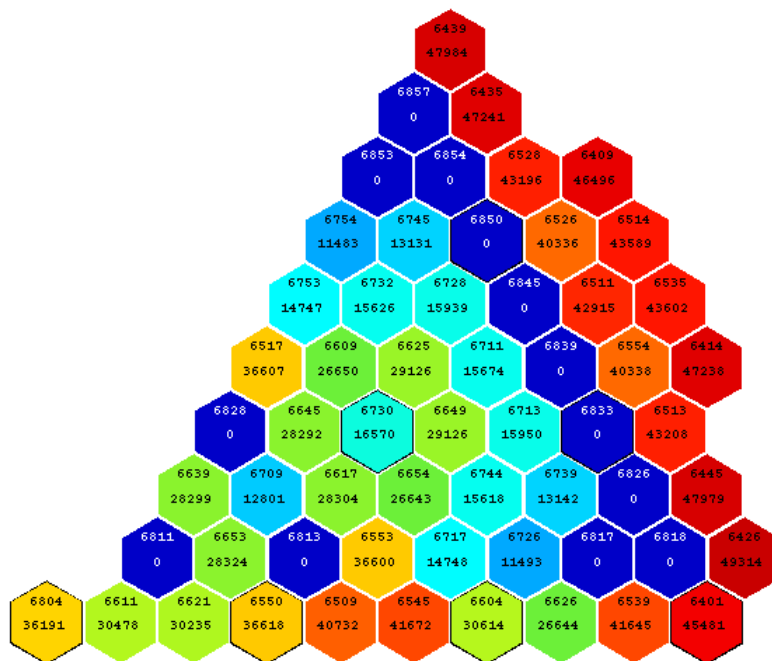
Obr. 7.1: Vsázka s 11 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.1, délka kampaně 304,1166 dne, $Kr=1,558$



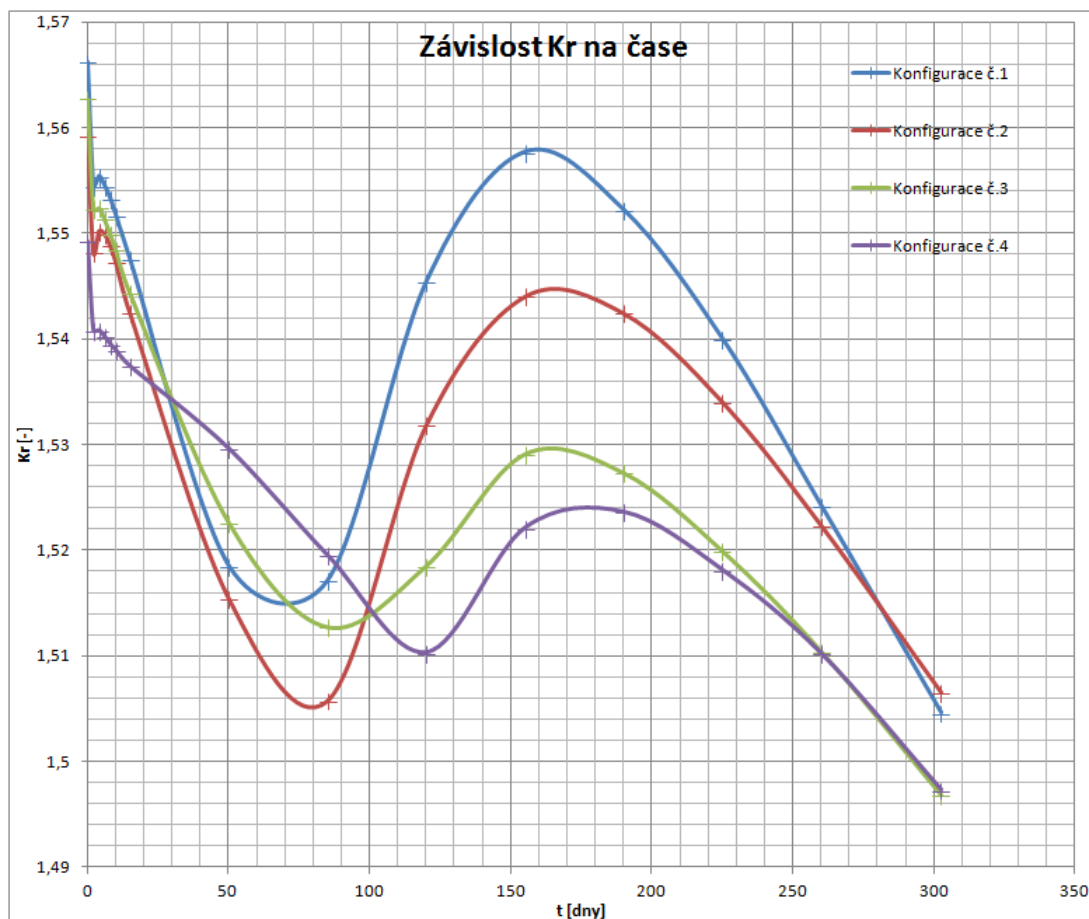
Obr. 7.2: Vsázka s 11 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.2, délka kampaně 302,6291 dne, $Kr=1,55$



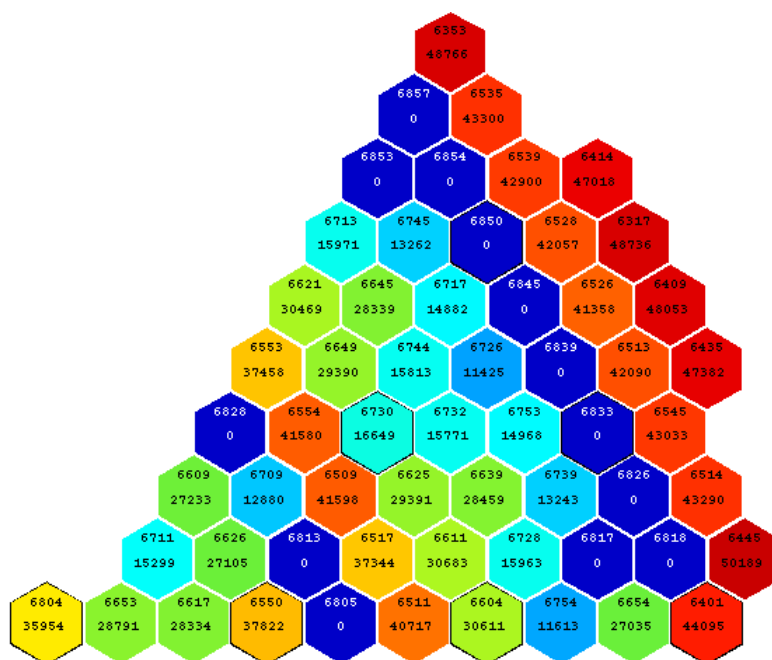
Obr. 7.3: Vsázka s 11 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.3, délka kampaně 302,5539 dne, $Kr=1,552$



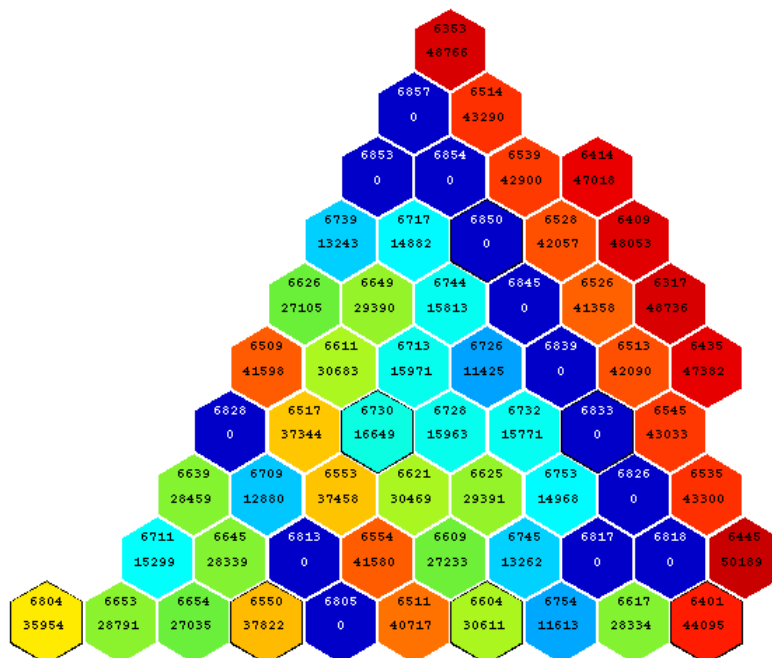
Obr. 7.4: Vsázka s 11 čerstvými kazetami, nový Moby-Dick, vybraná konfigurace č.4, délka kampaně 301,9256 dne, $Kr=1,541$



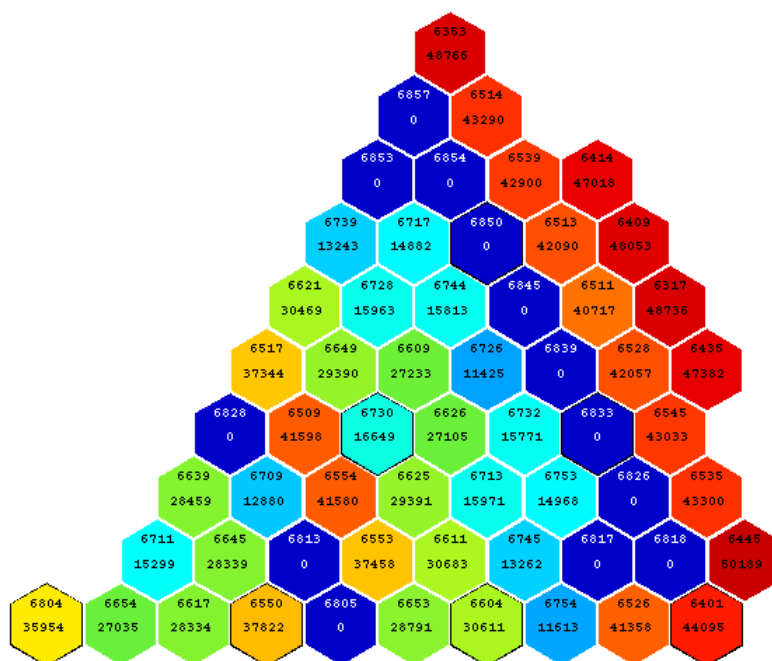
Obr. 7.5: Závislost nevyrovnanosti výkonu na čase s 11 čerstvými kazetami pro nový Moby-Dick



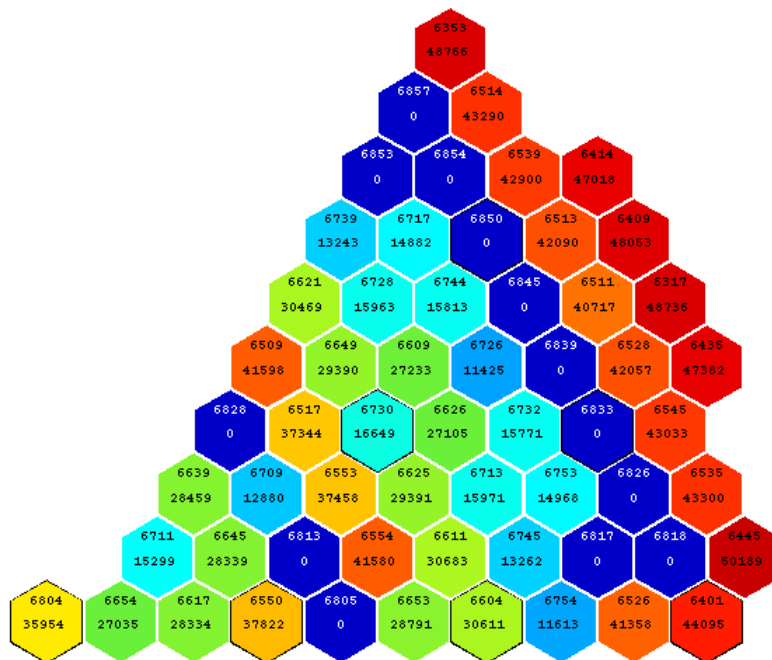
Obr. 7.6: Vsázka s 11 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.1, délka kampaně 302,34 dne, $Kr=1,544$



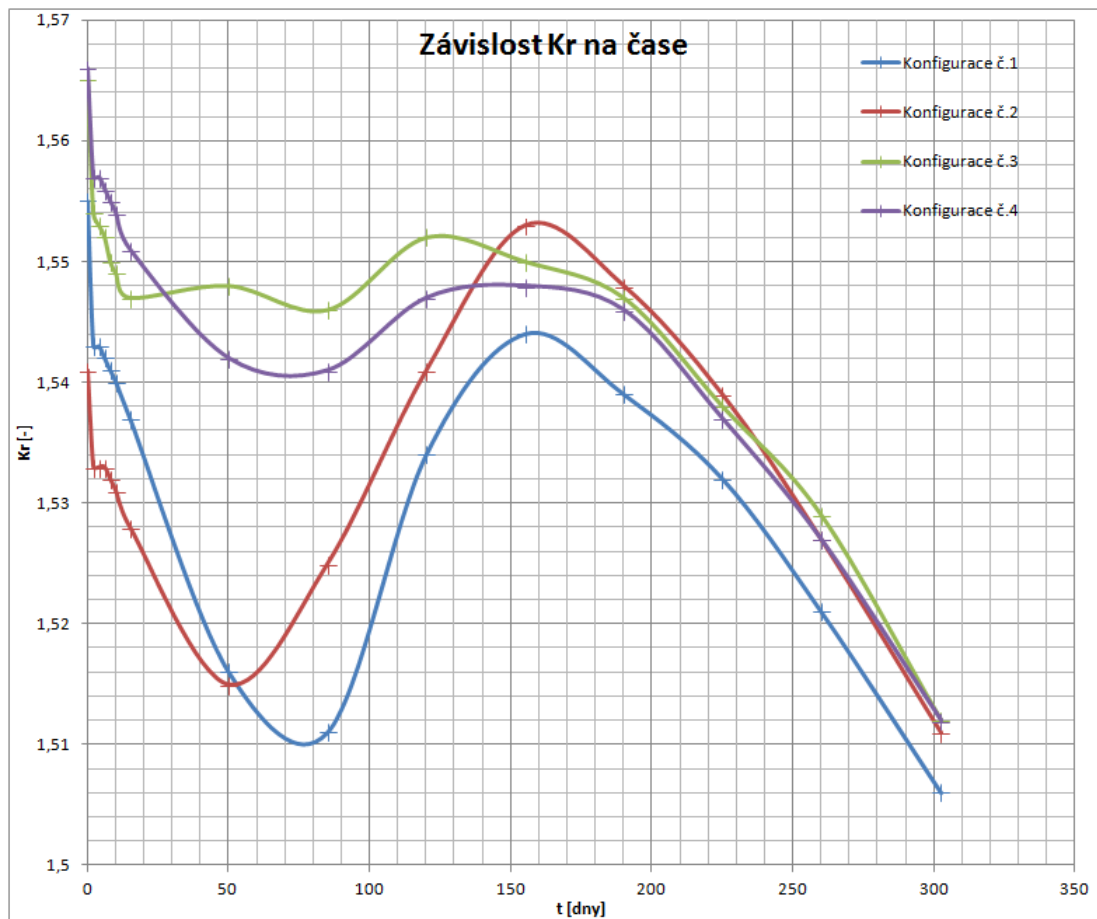
Obr. 7.7: Vsázka s 11 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.2, délka kampaně 302,06 dne, $Kr=1,553$



Obr. 7.8: Vsázka s 9 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.3, délka kampaně 301,98 dne, Kr=1,554



Obr. 7.9: Vsázka s 11 čerstvými kazetami, starý Moby-Dick, vybraná konfigurace č.4, délka kampaně 301,95 dne, Kr=1,557



Obr. 7.10: Závislost nevyrovnanosti výkonu na čase s 11 čerstvými kazetami pro starý Moby-Dick

8 ZÁVĚR

V práci se zabývám popisem celého palivového cyklu. Je zde také popsáno, co je to otevřený a uzavřený palivový cyklus. Pokud mluvím o uzavřeném palivovém cyklu, jedná se o využití již vyhořelého paliva respektive v dnešní době jeho přepracování, které je zatím finančně náročnější než získání paliva čerstvého.

Velká část je věnována střední části palivového cyklu. Palivo do této části zařazujeme od doby zavezení do skladu čerstvého paliva, až po vyvezení do dočasného úložiště vyhořelého paliva. Jsou zde popsány metody vsázek čerstvého paliva. Popsána je starší metoda zavážení out-in a také metoda in-out, který je využívána dnes. Dále jsou zde probrány možnosti provozu reaktoru, jedná se o kampaňovitý či kontinuální provoz.

Při návrhu palivové vsázky do aktivní zóny se využívá šestinové symetrie palivové zóny. Podrobně jsou zde zpracovány palivové cykly na EDU. Od tříletého až po teoretický šestiletý palivový cyklus. Názorně zde byla popsána palivové výměny právě při šestinové symetrii návrhu. Aktuálně EDU využívá pětiletý palivový cyklus se středním obohacením paliva 4,38 % a nese označení Gd-2M. Označení Gd znamená označuje absorbátor z gadolinia.

Pro návrh optimalizace vsázek je využíván software. Je složen ze dvou částí. V první části se provádí optimalizační proces, jehož výstupem je rozložení jednotlivých kazet. To je pak vzato jako základ pro makrokód, který zajišťuje výpočet fyzikálních veličin. Výsledky jsou vráceny optimalizačnímu procesu, na jejichž základě je navrhováno další rozložení kazet.

V práci používám optimalizačním program ATHENA, který zajišťuje optimalizační část, výpočet fyziky reaktoru poté zajišťuje makrokód Moby-Dick. Uvádím komplexní popis vstupních nastavení programu ATHENA.

Pro 3. blok EDU byla spočítána optimalizace s dvěma různými verzemi makrokódu Moby-Dick. Byly zvoleny dvě varianty, s devíti čerstvými kazetami a s jedenácti čerstvými kazetami.

Výsledky pro optimalizaci s devíti čerstvými kazetami jsou uvedeny v kapitole 6. Hlavním kritériem při hodnocení vhodnosti palivové vsázky je délka kampaně a koeficient nevyrovnanosti výkonu po proutcích Kr. Pro novou makrokódu Moby-Dick je vypočítaná délka kampaní delší a to až o čtyři dny, také vychází menší koeficient Kr.

Pro výpočet optimalizace s 11 čerstvými kazetami jsou všechny výsledky uvedeny v kapitole 7. Stěžení výsledky délky kampaně a nevyrovnání výkonu jsou pozitivní pro novou verzi makrokódu Mobi-Dick.

Délky vypočtených kampaní jsou poněkud krátké pro využití v reaktoru. Výsledky s 9 čerstvými kazetami jsou nevyužitelné. Nejpříznivější výsledky jsem získal s 11 čerstvými kazetami, při použití nové verze makrokódu Mobi-Dick a vybrané konfiguraci č.1. Délka kampaně vychází 304,1166 dne. Tato konfigurace by mohla být aplikována při delší plánované odstávce bloku.

Celkové hodnocení, která verze makrokódu dává přijatelnější výsledky, vychází nová verze s označením 09k5m2. Hlavními důvody jsou délka kampaně, která vždy vycházela delší. Dalším důvodem je rovnoměrnější rozložení výkonu. Otázkou však zůstává do jaké míry nová verze makrokódu Mobi-Dick reflektuje realitu.

LITERATURA

- [1] RAČEK, J. *Jaderná zařízení*. Vyd. 1. Brno: NOVOPRESS s.r.o., 2009. 239 s. ISBN 978-80-214-3961-0
- [2] KOPŘIVA, R. *Střední část palivového cyklu na elektrárně Dukovany*. Praha: České Vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, vedoucí dizertační práce Ing. Daneš Burket
- [3] TESAŘ, F. *Odvod tepla a vývin tepla vyhořelého jaderného paliva v úložištích*. Brno: Masarykova Univerzita, Pedagogická fakulta, Katedra fyziky, 2011. 122 s. Vedoucí diplomové práce RNDr. Jindřiška Svobodová, Ph.D..
- [4] *Pokročilé jaderné technologie a skupina ČEZ*. Praha : ČEZ, 2006. 39 s.
- [5] *VUJE* 2011 [cit. 2013-12-11]. Schémy. Dostupné z www: <http://www.vuje.sk/sk/index.php?page=popup/schemy/palivovy-cyklus>.
- [6] KOVAČ, M. *Analýza možnosti provozu 18-ti měsíčních palivových cyklů pro Jadernou elektrárnu Temelín*. Praha: České Vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra jaderných reaktorů, 2010. 122 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Bittmann.
- [7] BLAŽKOVÁ, E. *Přehled jaderných reaktorů světa*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Hugo Šen
- [8] HEŘMANSKÝ, B.: *Jaderné reaktory I.*, učební texty, ČVUT Praha, 2010
- [9] *British Energy* [online]. 2008 [cit. 2013-12-11]. Sizewell B Environmental Product Declaration. Dostupné z www: http://www.british-energy.com/documents/Sizewell_B_EPD_Technica_Report.pdf.
- [10] DUFKOVÁ, Marie *Co je to MOX*[online]. 2011 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=174>
- [11] BAJGL, Josef. *Zvyšování elektrického výkonu*. ČEZ 2009.
- [12] BURKET, Daneš. *Palivové vsázky se zdokonaleným palivem na Jaderné elektrárně Dukovany*. Dukovany, 2003, 10.5.2012 [cit. 2012-05-19]. Dizertačná práca. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Karel Matějka, CSc.

- [13] VYTISKA, Tomáš. *Seznámení s programem MOBY-DICK a výpočet benchmarku s palivem GD-2 (EDU)*. Praha, 2007. 65 s. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Bajgl
- [14] Fejt, F.: *Současné trendy v optimalizaci palivových vsázek pro tlakovodní reaktory* Bakalářská práce, ČVUT Praha, 2010, vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský Ph.D.
- [15] Čada, R.: *Manuál kódu Athena v.2.1* ZČU print, Plzeň, 2013.
- [16] Prehradný, J., Čada, R., Tychtl, Z.: *Inovace uživatelského rozhraní programu Athena a uživatelského rozhraní programu ATHENA v roce 2013* Plzeň, Škoda JS a.s., 2013.