

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra Elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Citlivostní analýza geometrických faktorů na rozložení
výkonu v palivovém souboru VVER-440**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin BAROSS**
Osobní číslo: **E18N0013K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Citlivostní analýza geometrických faktorů na rozložení výkonu v palivovém souboru VVER-440**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

Provedení citlivostní analýzy geometrických faktorů na rozložení výkonu v palivovém souboru (PS) programem Serpent. Cílem této práce je určení mechanické složky na rozložení výkonu v PS VVER-440.

1. Seznamte se s výpočetním kódem Serpent.
2. Vytvořte model palivového souboru VVER-440 a model mini-core.
3. Proveďte citlivostní analýzu geometrických faktorů na rozložení výkonu.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. J. Leppänen: Serpent – a Continuous energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, VTT Research Centre of Finland, Helsinki, 2015.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá citlivostní analýzou geometrických faktorů na rozložení výkonu v palivovém souboru VVER-440. V práci je velmi stručný popis jaderného energetického reaktoru, na který navazuje úvod do reaktorové fyziky. Následují kapitoly s pojednáním o inženýrských faktorech a rozložení výkonu v palivovém souboru. Konec první části je zaměřen na samotný výpočtový kód Serpent, jenž byl použit při výpočtech. Druhá část diplomové práce se věnuje citlivostní analýze geometrických faktorů na základě výstupních dat ze Serpentu.

Klíčová slova

Serpent, štěpná řetězová reakce, jaderný reaktor, radioaktivní rozpad, Monte Carlo, rozložení výkonu, geometrický faktor

Abstract

The presented diploma thesis deals with sensitivity analysis of geometric factors on the power distribution in the VVER-440 fuel assembly. This thesis describes nuclear reactor followed by an introduction to reactor physics. The following chapters deal with engineering factors and power distribution in the fuel assembly. The end of the first part of diploma thesis is focused on the computational Serpent code itself by which the simulations were calculated. Second part of diploma thesis deals with sensitivity analysis of geometric factors based on output data from Serpent.

Key words

Serpent, fission chain reaction, nuclear reactor, radioactive decay, Monte Carlo, power distribution, geometric factor

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této diplomové práce je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 24.5.2021

Martin Baross

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. a především pak konzultantovi diplomové práce Ing. Jiřímu Závorkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 8 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 10 |
| ÚVOD | 12 |
| 1 JADERNÝ REAKTOR A AKTIVNÍ ZÓNA REAKTORU | 14 |
| 1.1 TLAKOVÁ NÁDOBA REAKTORU..... | 14 |
| 1.2 VNITŘNÍ ČÁSTI REAKTORU..... | 16 |
| 1.2.1 Šachta reaktoru..... | 17 |
| 1.2.2 Dno šachty reaktoru..... | 17 |
| 1.2.3 Blok ochranných trub..... | 17 |
| 1.2.4 Koš aktivní zóny..... | 17 |
| 1.3 AKTIVNÍ ZÓNA REAKTORU..... | 17 |
| 1.3.1 Palivová kazeta..... | 18 |
| 1.3.2 Regulační kazeta..... | 18 |
| 2 ZÁKLADNÍ FYZIKA REAKTORU | 20 |
| 2.1 NEUTRONOVÉ INTERAKCE..... | 20 |
| 2.1.1 Absorpce neutronů..... | 20 |
| 2.1.2 Rozptyl neutronů..... | 21 |
| 2.2 ŠTĚPNÁ ŘETĚZOVÁ REAKCE..... | 21 |
| 3 ROZLOŽENÍ VÝKONU V REAKTORU | 25 |
| 3.1 ZÍSKANÁ ENERGIE ZE ŠTĚPENÍ..... | 25 |
| 3.2 VYUŽITELNOST ZÍSKANÉ ENERGIE..... | 27 |
| 3.3 ROZLOŽENÍ VÝKONU..... | 29 |
| 3.3.1 Vývin tepla v aktivní zóně reaktoru..... | 29 |
| 3.3.2 Součinitel nerovnoměrnosti..... | 29 |
| 4 INŽENÝRSKÉ FAKTORY | 31 |
| 4.1 DOMINANTNÍ SLOŽKY..... | 31 |
| 4.2 KOEFICIENTY NEROVONOMĚRNOSTI ROZLOŽENÍ VÝKONU..... | 32 |
| 4.3 STANOVENÍ INŽENÝRSKÝCH FAKTORŮ VÝKONOVÉHO ROZLOŽENÍ..... | 33 |
| 4.3.1 Metodické nejistoty..... | 34 |
| 4.3.2 Mechanické nejistoty..... | 35 |
| 4.3.3 Celkový koeficient rezervy..... | 35 |
| 5 SERPENT | 37 |
| 5.1 METODA MONTE CARLO..... | 37 |
| 5.2 PŘÍKAZY A PRÁCE S KÓDEM SERPENT..... | 38 |
| 5.2.1 Povrch „surf“..... | 38 |
| 5.2.2 Definice palivového proutku „pin“..... | 40 |
| 5.2.3 Buňka „cell“..... | 41 |
| 5.2.4 Mříž „lat“..... | 42 |
| 5.2.5 Materiál „mat“..... | 43 |
| 5.2.6 Ostatní použité příkazy..... | 43 |
| 6 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA | 47 |
| 6.1 TLOUŠŤKA POKRYTÍ PALIVOVÉHO PROUTKU..... | 53 |
| 6.2 PRŮMĚR POKRYTÍ VNITŘNÍHO PRŮMĚRU..... | 56 |
| 6.3 VNĚJŠÍ PRŮMĚR PELETY..... | 59 |
| 6.4 KROK MŘÍŽE PALIVOVÝCH PROUTKŮ..... | 62 |

| | | |
|----------|---|--|
| 6.5 | OBOHACENÍ PALIVA | 65 |
| 6.6 | HUSTOTA PALIVA | 67 |
| 6.7 | Obsah Gd_2O_3 v palivu | 69 |
| 6.8 | VLIV AXIÁLNÍ MEZERY MEZI PELETKAMI..... | 71 |
| 6.9 | ZMĚNA POLOHY PALIVOVÉ KAZETY | 73 |
| 7 | SHRnutí VÝPOČTŮ | 75 |
| | ZÁVĚR..... | 77 |
| | SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ..... | 1 |
| | PŘÍLOHY | CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA. |

Seznam symbolů a zkratek

| <i>Zkratka</i> | <i>Plné znění</i> |
|---------------------|--------------------------------|
| <i>ANSI-C</i> | Jazyk C publikovaný pod ANSI |
| <i>AZ</i> | Aktivní zóna |
| <i>BOT</i> | Blok ochranných trub |
| <i>HKR</i> | Havarijní regulační kazeta |
| <i>MeV</i> | Megaelektronvolt |
| <i>pJ</i> | Pikojoul |
| <i>PP</i> | Palivový proutek |
| <i>PS</i> | Palivový soubor |
| <i>PSG</i> | Probabilistic scattering game |
| <i>PWR</i> | Pressurized water reactor |
| <i>TNR</i> | Tlaková nádoba reaktoru |
| <i>VVER</i> | Vodo-vodní energetický reaktor |

| <i>Symbol</i> | <i>Význam</i> |
|--------------------|--|
| <i>n</i> | Počet |
| <i>m</i> | Počet |
| k_{∞} | Koeficient násobení |
| k_{ef} | Efektivní koeficient násobení |
| <i>p</i> | Pravděpodobnost úniku rezonančnímu záchytu |
| <i>f</i> | Koeficient využití tepelných neutronů |
| <i>E</i> | Energie |
| <i>P</i> | Pravděpodobnost, že neutron neunikne ze soustavy |
| <i>r</i> | Polohový vektor |
| <i>K</i> | Součinitel nerovnoměrnosti vývinu tepla |
| K_i | Součinitel nerovnoměrnosti rozložení výkonu |
| <i>Q</i> | Lineární výkon |
| <i>N</i> | Integrální výkon |
| F_i | Inženýrský faktor |
| <i>P</i> | Tepelný výkon |

| | |
|---------------------|---------------------------------------|
| α | Rozpad alfa |
| β | Rozpad beta |
| γ | Záření gama |
| δ | Systematická odchylka |
| ε | Koeficient násobení rychlými neutrony |
| η | Regenerační faktor |
| μ | Součinitel vyrovnání vývinu tepla |
| ν | Rychlost neutronů |
| σ | Standardní odchylka |
| φ | Hustota toku neutronů |

Úvod

Jaderná energetika patří k velmi významné části energetiky v České republice. Z historického hlediska nastal velký rozvoj v 2. polovině 20. století po uvedení do provozu první jaderné elektrárny v Obninsku v bývalém SSSR. Po haváriích jaderných elektráren Černobyl a Three Mile Island byl zaznamenán velký pokles výstavby nových jaderných bloků. Na začátku 21. století došlo k obnově výstavby nových bloků na základě vládních programů a strategických plánů z důvodu obav zvýšení emisí skleníkových plynů (především z uhelných elektráren), nedostatku fosilních paliv a s tím spojenou zvyšující se cenou za fosilní paliva. Po havárii v jaderné elektrárně Fukušima v roce 2011 byla v mnoha státech přehodnocena politika jaderné energie. Tím se znovu zpomalila výstavba nových jaderných elektráren.

Politika hraje v oblasti jaderné energetiky velkou roli. Je možné vidět rozdílné přístupy mezi jednotlivými státy nebo i přímo mezi regiony. Asijské státy staví stále nové bloky, aby byly schopné zvyšovat a dlouhodobě udržet svůj ekonomický růst. Naopak některé Evropské státy nechtějí stavět z bezpečnostních důvodů nové elektrárny a ty, které jsou již v provozu, budou pomalu odstavovat. Ponecháno bude pouze malé množství na vykrytí stability elektrické energie. Další velký faktor, jenž hraje ve výstavbě velkou roli, je ekonomická situace a cena ostatních zdrojů, a to především uhlí nebo plynu. Ale i v Evropě je několik států (např. Slovensko, Finsko, Bělorusko), které i nadále provádí výstavbu nových bloků. Česká republika by se měla v blízké době zařadit mezi ně.

Stále zdokonalující se softwarové technologie a lepší možnosti simulací by mohly přispět ke zlepšení bezpečnostních prvků a snížení provozních nákladů jaderných elektráren. K těmto vlastnostem se bude nejvíce přihlížet při plánování nových elektráren.

Tato diplomová práce vznikla za účelem vytvoření metodiky k posuzování mechanických složek palivové kazety PK-3, která by se měla nově dodávat do jaderné elektrárny Dukovany. Informace o palivu byly poskytnuty od dodavatele. Bylo potřeba zjistit chování rozložení výkonu při změně mechanických nejistot. Výstupní hodnoty budou sloužit k dalším analýzám firmě Škoda JS a. s., jakožto jednomu z hlavních účastníků licenčního řízení.

V první části diplomové práce jsou zmíněny informace o jaderném reaktoru a jeho aktivní zóně. V druhé kapitole je vysvětlena základní fyzika reaktoru. Následuje seznámení

s problematikou rozložení výkonu v reaktoru a inženýrských faktorech. Poslední kapitola teoretické části popisuje prostředí a výpočetní kód Serpentu.

Druhá část diplomové práce je věnována provedení citlivostní analýzy geometrických faktorů. Obsahuje názornou ukázkou rozložení výkonů v modelu palivové kazety a zhodnocení výstupních hodnot.

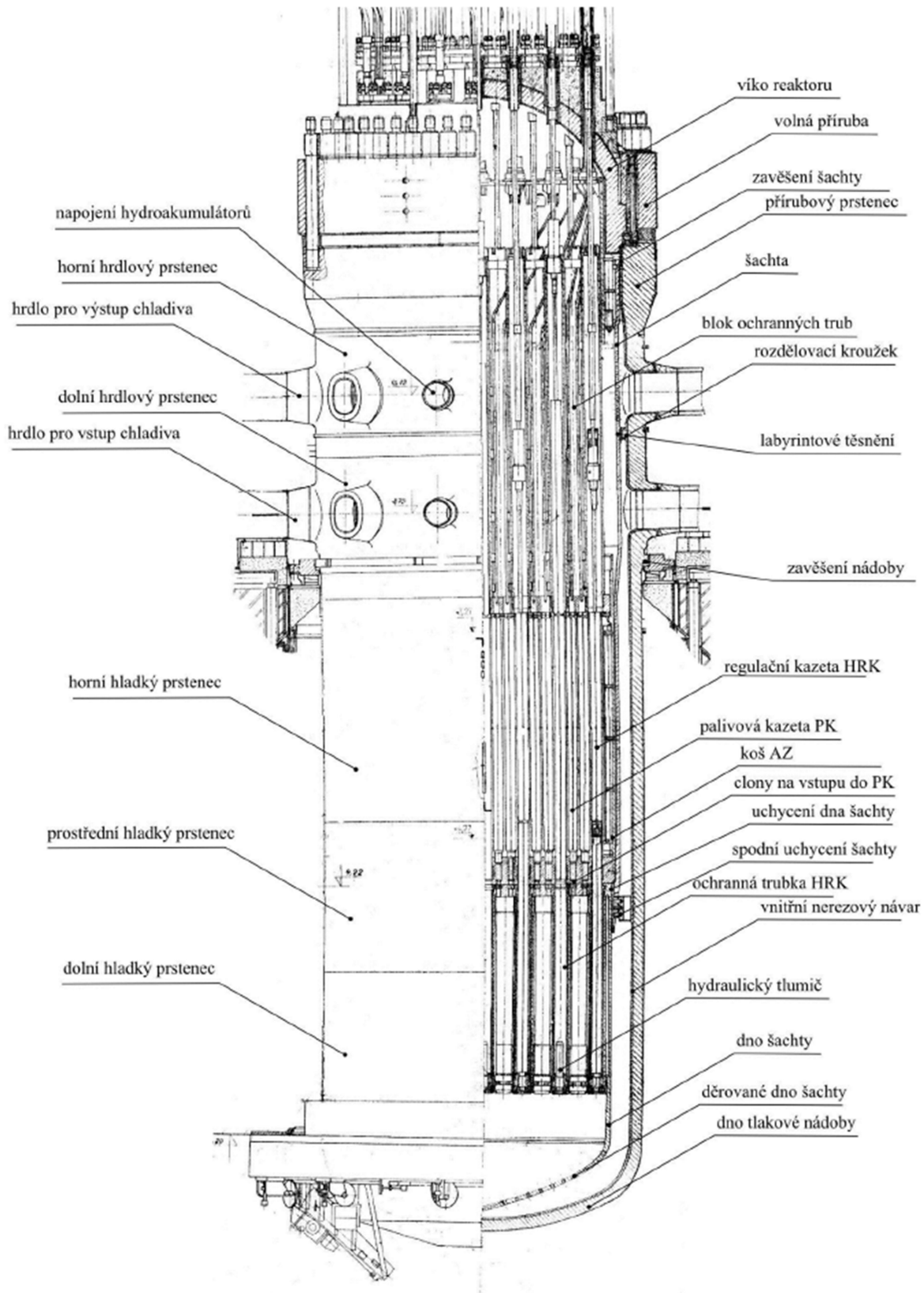
1 Jaderný reaktor a aktivní zóna reaktoru

Jaderné vodo-vodní energetické reaktory, zkráceně VVER, se řadí do skupiny tlakovodních PWR (Pressurized Water Reactor) reaktorů. Samotná tlaková nádoba reaktoru obsahuje aktivní zónu, která je umístěna v tzv. šachtě. V aktivní zóně je uloženo jaderné palivo UO_2 ve formě keramických peletek. V České republice se v jaderných elektrárnách používají dva typy reaktorů. Liší se jak konstrukcí a provozními parametry, tak také svým výkonem. V jaderné elektrárně Temelín se používá reaktor VVER-1000 typu 320. Naopak v jaderné elektrárně Dukovany je použit reaktor VVER-440 typu 213, který je také předmětem této práce. [1]

1.1 Tlaková nádoba reaktoru

Tlaková nádoba reaktoru (zkráceně TNR) VVER-440, vyobrazena na Obr. 1.1, je vyrobena z legované vysokojakostní oceli typu 15Ch2NMFA a projektována na 30 let. Průměr tlakové nádoby je 3,56 m a výška 11,8 m. [8]

Horní část tlakové nádoby reaktoru je tvořena přírubovým prstencem připevněným šedesáti závrtnými šrouby o velikosti M140x6. Pod přírubovým prstencem se nachází horní hrdlový prstenec, v němž je šest větších nátrubků pro výstup chladiva z reaktoru a tři menší. Dva z nich slouží jako přívod vody z hydroakumulátorů pasivního systému havarijního chlazení aktivní zóny. Zbývající jeden slouží k vyvedení vnitroreaktorových měření tlakového spádu chladiva. Pod horním hrdlovým prstencem se nachází spodní dolní hrdlový prstenec. Spodní prstenec obsahuje šest hrdel pro vstup chladiva a dva nátrubky pro přívod vody z hydroakumulátorů pasivního systému havarijního chlazení. Vnitřní strana přírubového prstence obsahuje osazení, které slouží k zavěšení šachty reaktoru. [8]



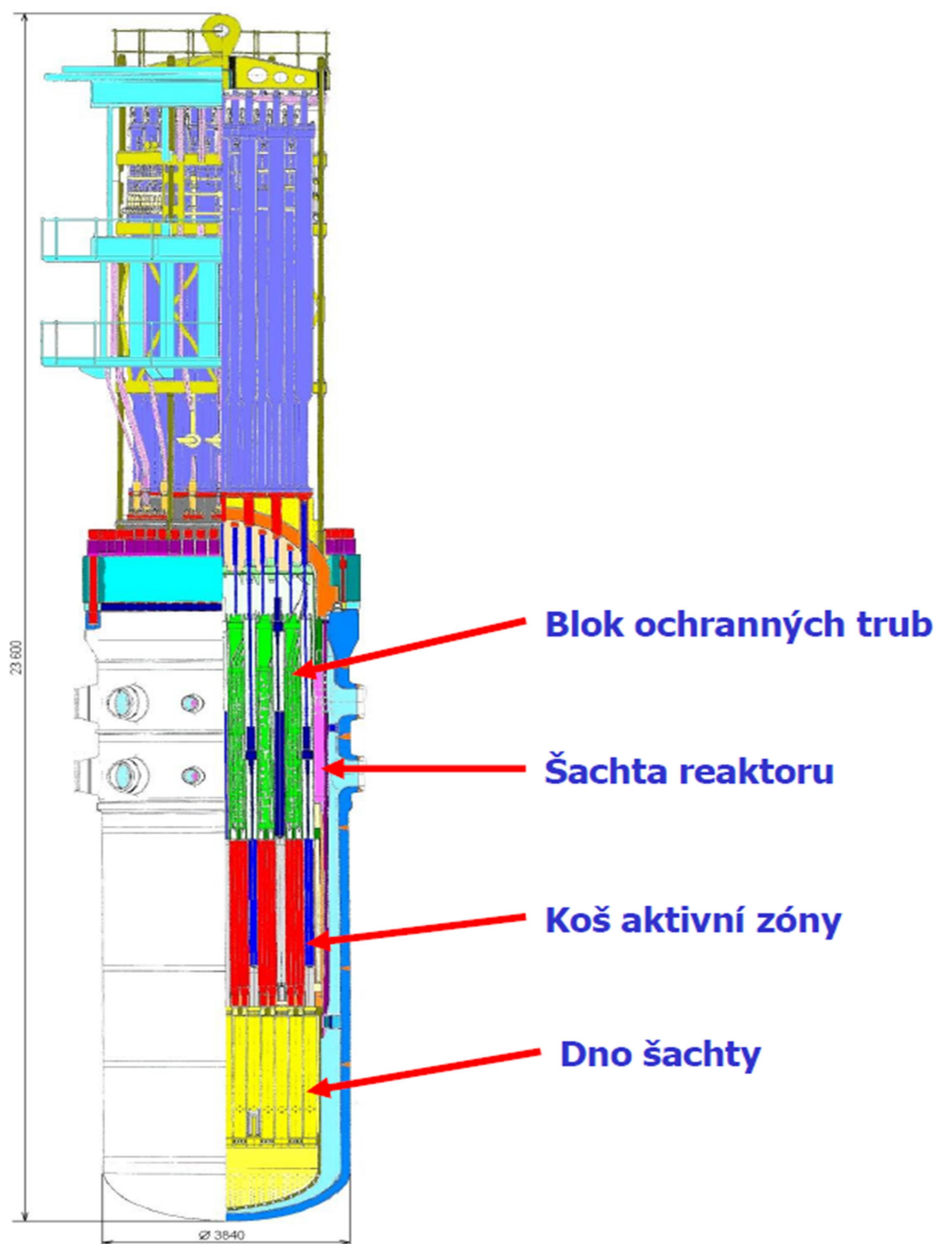
Obr. 1.1: Model tlakové nádoby reaktoru VVER-440 [6]

1.2 Vnitřní části reaktoru

Vnitřek reaktoru se skládá z několika částí:

- Šachta reaktoru
- Dno šachty
- Blok ochranných trub
- Koš aktivní zóny

Uspořádání těchto částí je znázorněn na Obr. 1.2.



Obr. 1.2: Vnitřní části reaktoru [7]

1.2.1 Šachta reaktoru

Šachta je tenkostěnný válec, svařený z plechových, nerezavějících, ocelových prstenců. V místě, kde se nachází aktivní zóna má tloušťku stěny 60 mm. Slouží k usměrnění toku chladiva v reaktoru, odděluje vstup a výstup chladiva v primárním okruhu. Dalším využitím je tepelné stínění a snižování toku neutronů na stěnu TNR. [7]

1.2.2 Dno šachty reaktoru

Dno šachty se používá ke zrovnoměrnění a uklidnění toku chladiva před vstupem do aktivní zóny reaktoru. Při volném pádu nebo havarijní odstávce regulačních kazet slouží dno jako ochranný prostor pod aktivní zónou. Právě z tohoto důvodu jsou rozmístěny na dně šachty hydraulické tlumiče. [7]

1.2.3 Blok ochranných trub

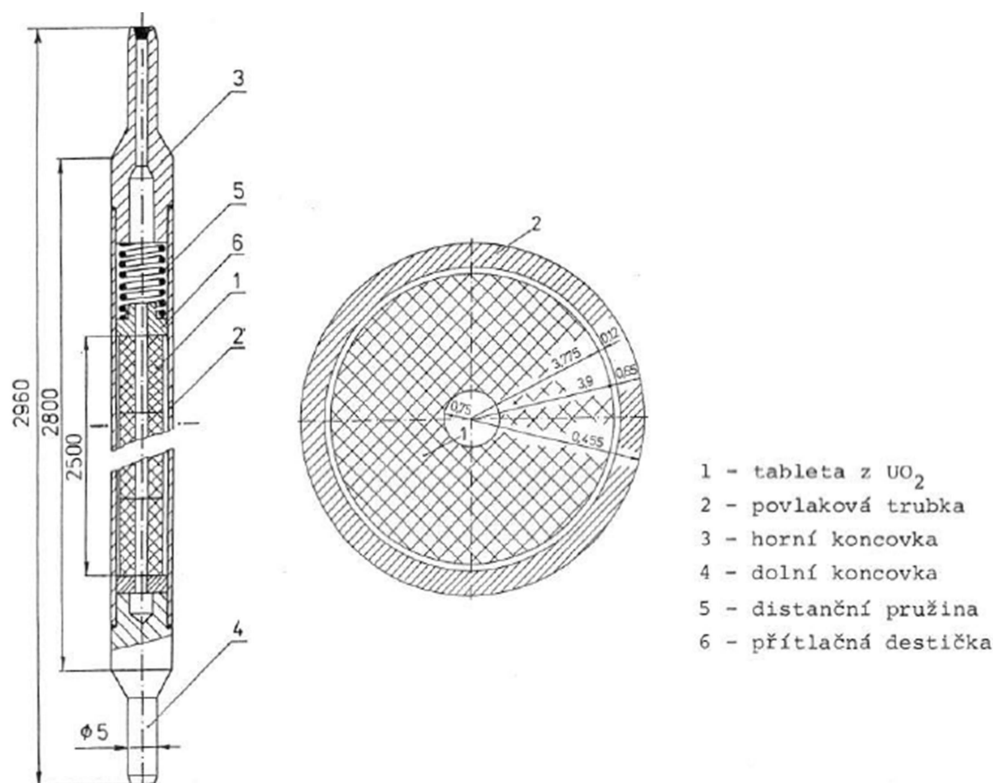
Blok ochranných trub (zkráceně BOT) zajišťuje polohu palivových kazet a koše aktivní zóny v osovém směru. Slouží také k vedení 37 regulačních kazet s vloženými tyčemi, k upevnění trubek termočlánků a následně vyvedení teplot chladiva z výstupu aktivní zóny a neutronového toku. [7]

1.2.4 Koš aktivní zóny

Koš aktivní zóny slouží jako úložiště palivových kazet. Dohromady se šachtou se podílí na tepelném a radiační stínění tlakové nádoby reaktoru. [7]

1.3 Aktivní zóna reaktoru

Aktivní zóna jaderného reaktoru VVER-440 obsahuje 349 kazet, z nichž je 312 palivových a 37 regulačních. Každá z kazet obsahuje 126 palivových proutků s uranovým palivem. Uprostřed kazety je umístěn jeden centrální proutek pro instrumentaci. Palivo umístěné uvnitř palivových proutků je ve formě UO_2 tablet. [1, 9]



Obr. 1.3: Řez palivové kazety [4]

1.3.1 Palivová kazeta

Palivový proutek (Obr. 1.3) obsahuje palivové UO_2 tablety (pelety) naskládané v trubce ze slitiny zirkon-niob ($\text{Zr} + 1\% \text{Nb}$) s označením E110. Toto pokrytí slouží jako hermetická bariéra, brání štěpným produktům, aby vnikly do primárního chladiva. Vzniklý prázdný prostor mezi palivem a slitinovou trubkou je pro zlepšení tepelné vodivosti vyplněn heliem. Ten slouží k hromadění plynných štěpných produktů a k odlehčení tepelného namáhání paliva. Na spodním konci kazety je koncovka, která slouží ke stabilnímu upevnění proutku do mřížky palivové kazety. Horní část je ponechána volně, tím je zabráněno nežádoucí změně geometrie paliva při provozu jaderného reaktoru. Ve středu palivové kazety je umístěna vodící trubka, do níž je možné zasunout suché kanály pro umístění čidel neutronového toku. [1, 9, 10]

1.3.2 Regulační kazeta

V aktivní zóně se kromě palivových kazet nachází také regulační kazety (HRK). Regulační kazety jsou složeny ze dvou částí. Horní část je tvořena absorpčním souborem šestihenného tvaru, který obsahuje ocelové pásy s 2 % hmotnostním obsahem bóru. Spodní část obsahuje palivo a je téměř stejná jako palivová kazeta. Od palivové kazety se liší zkrácením výšky sloupce pelet. V horní absorpční hlavici je umístěn naváděcí kužel

pro tyč, která spojuje absorpční a palivovou část. Druhý naváděcí kužel se nachází ve spodní části absorbátoru. Pohyb regulačních kazet je zajištěn elektrickým pohonem, jenž pohybuje spojovací tyčí. Elektrický pohon má v sobě zabudován indukční snímač polohy regulační kazety. [1, 9, 10]

2 Základní fyzika reaktoru

Vzhledem k tomu, že další kapitoly budou zaměřeny na výpočetní kód Serpent a rozložení výkonu v reaktoru, je třeba nastínit několik základních poznatků z reaktorové fyziky. V této části diplomové práce je tedy uvedena základní interakce neutronů s ostatními jádry, princip štěpné řetězové reakce a základní informace o reaktoru VVER-440.

2.1 Neutronové interakce

Při štěpení vznikají okamžité neutrony se střední energií přibližně 2 MeV. Tyto neutrony mají náhodný směr, dokud se nedostanou do blízkého okolí jader atomů, které na něj působí svými silami, a způsobí tak srážku neutronu s jádrem. Další možností je stav, kdy se neutronu podaří uniknout ze systému a dalšího procesu interakcí se již neúčastní. [2]

V jaderném reaktoru probíhá až několik stovek různých interakcí, jež vedou ke vzniku všech hlavních typů záření (alfa, beta, gama a neutronové). Mimo toto záření vznikají také velká množství nuklidů, vyskytují se v reaktoru a jeho palivu. [1]

Téměř 90 % všech interakcí funguje na principu tzv. složeného jádra. Jádro atomu pohltí neutron a zvýší tím svoje nukleonové číslo o 1. [3]

Z fyzikálního hlediska jaderného reaktoru je potřeba zmínit tyto interakce neutronů s jádry: [2]

- *Absorpce neutronů, reakce (n, α), (n, p)*
- *Rozptyl neutronů*
- *Štěpení neutronů*
- *Zachycení radiační*
- *Zachycení n s vysláním α částice nebo protonu*

[24]

2.1.1 Absorpce neutronů

Při této interakci, jak už sám název napovídá, dochází ke ztrátě neutronu, který by se následně mohl podílet na řetězové štěpné reakci. Neutron je pohlcen jádrem, a vytváří

tak složené jádro se zvýšeným nukleonovým číslem o 1. Toto nové jádro může být radioaktivní a dále se mění svým radioaktivním rozpadem. Absorpční reakce je možné dále dělit podle druhu vyzařené kvanta nebo hmotné částice. Absorpční reakce, doprovázena protonem (n, p) nebo emisí alfa částice ${}^4_2\text{He}$ (n, α), je nazývána jako emise nabitě částice. [3, 5, 24]

2.1.2 Rozptyl neutronů

Když dojde ke srážce neutronu s jádrem, je možné, že nastanou tyto dva typy rozptylové reakce:

- *Pružný rozptyl (n, n)*
- *Nepružný rozptyl (n, n')*

2.1.2.1 Pružný rozptyl neutronů

Pružný rozptyl je interakce částice s jádrem. Během srážky je zachována hybnost a kinetická energie systému. Neutron při srážce předá část své kinetické energie cílovému jádru. Může nastat případ tzv. rezonančního pružného rozptylu. Jakmile jádro absorbuje neutron, ten je opět emitován (nemusí být emitován stejný neutron) a jádro atomu se vrátí zpět do svého původního stavu. Druhý případ je tzv. potenciální pružný rozptyl. Tento typ rozptylu je mnohem častější. Pokud nastane situace, že se neutron a jádro dostanou do dostatečné vzdálenosti, síly působící mezi nimi neutron odrazí. Pružný rozptyl je v reaktoru využíván ke zpomalení neutronů. [3, 5]

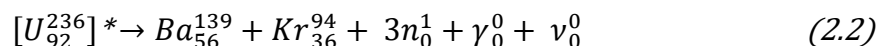
2.1.2.2 Nepružný rozptyl neutronů

Stejně jako u pružného rozptylu, dojde ke vzniku složeného jádra pohlcením neutronu. V případě nepružného rozptylu však jádro v excitovaném stavu vyloučí neutron s nižší kinetickou energií. Zbytková přebytečná energie se projeví při změně jádra, které se vrací z excitovaného do původního stavu, a je doprovázena gama zářením. [3, 5]

2.2 Štěpná řetězová reakce

V energetických reaktorech jsou hlavními štěpnými izotopy U-235 a Pu-239. Nejvyužívanějším prvkem v jaderné energetice je uran vyskytující se v přírodě jako směs izotopů U-235 (0,7 %), U-238 (99,3 %) a stopové množství U-234. Již zmíněný izotop Pu-239 vzniká až při provozu jaderného reaktoru zachycováním neutronů na U-238 a jejich radioaktivními beta rozpady. [1]

Proces štěpení je druh neutronové interakce. Základní princip je založen na absorpci letícího neutronu. Jádro atomu, které pohltí neutron, přejde do excitovaného stavu. Aby se dostal zpět do stabilní hladiny, dochází k rozdělení jádra, jímž vzniknou dva nebo více štěpných produktů (odštěpků) s nižšími atomovými a hmotnostními čísly. Mimo štěpné produkty se dále při štěpení uvolňují dva nebo tři neutrony, které jsou doprovázeny zářením gama. Produkty vznikající štěpením jsou nestabilní, radioaktivní a dále se rozpadají. Jednotlivé odštěpky mají většinou tři stadia rozpadu, než je utvořeno stabilní jádro. [1] Izotopy se dělí na štěpné a štěpitelné. Štěpné izotopy mají vyšší pravděpodobnost rozštěpení tepelným neutronem. Do této skupiny patří například U-235. Naopak štěpitelné izotopy musejí mít mnohem větší energii, než má tepelný neutron. V této skupině je možné zmínit například U-238. Možnost štěpení je znázorněna rovnicemi (2.1) a (2.2). [2]



Aby nedošlo k ukončení řetězové reakce, musí být rovnováha mezi počtem zachycených a nových neutronů. Tato skutečnost je vyjádřena tzv. koeficientem násobení k (multiplikační faktor). Multiplikační faktor, označující se k_∞ , vyjadřuje poměr generace neutronů ku její předchozí generaci a stanovuje se dnes nejčastěji pomocí výpočetních kódů (např. Serpent).

$$k_\infty = \frac{n_i}{n_{i-1}} \quad (2.3)$$

Uvedená rovnice je platná pouze v případě, že se jedná o nekonečně velký reaktor, ze kterého neunikají neutrony. Reálný reaktor má však pevně danou geometrii a dochází v něm k úniku neutronů z aktivní zóny. Proto se zavedl efektivní koeficient násobení, značící se k_{ef} . Platí, že efektivní koeficient respektuje geometrii aktivní zóny a je vždy menší než k_∞ . [2,3,5]

Neutronová bilance v reaktoru je definována koeficientem násobení k :

$$k = \varepsilon \cdot p \cdot f \cdot \eta \cdot P \quad (2.4)$$

Koeficient násobení rychlými neutrony ϵ

Koeficient násobení rychlými neutrony ϵ vyjadřuje poměr úhrnného počtu neutronů, které vzniknou při štěpení neutronů všech energií k počtu neutronů vzniklých štěpením způsobeným jen tepelnými neutrony. V případě, že rychlé neutrony vzniklé štěpením mají energii vyšší než 1,2 MeV, mohou způsobit štěpení jader U-238. Hodnota ϵ je přibližně 1,15. [1]

Pravděpodobnost úniku rezonančního zachytu p

Pravděpodobnost úniku rezonančního zachytu p je vyjádřena poměrem počtu neutronů nezachycených při zpomalování ku všem rychlým neutronům, které vznikly štěpením na počátku jejich zpomalování. Např. izotop U-238 je schopen zachytávat neutrony s energií vyšší, než je oblast tepelné energie. Hodnota p se pohybuje kolem 0,7. [1]

Koeficient využití tepelných neutronů f

Koeficient využití tepelných neutronů f je definovaný podílem všech tepelných neutronů absorbovaných v jaderném palivu ku všem absorbovaným tepelných neutronů v celé aktivní zóně reaktoru. Koeficient f zohledňuje možnost zpomaleného neutronu být absorbován v jaderném palivu, v moderátoru, v konstrukčních materiálech nebo v absorpčních materiálech. Hodnotu nelze přesně vyjádřit, jelikož je závislá na množství použitého bórového absorbátoru v chladivu. [1]

Koeficient regenerace η

Koeficient regenerace η je vyjádřen podílem rychlých neutronů, které se uvolní při štěpení ku jednomu tepelnému neutronu absorbovaného v palivu. Hodnota koeficientu je přibližně 2,07. [1]

Pravděpodobnost, že neutron neunikne ze soustavy P

Pravděpodobnost, že neutron neunikne ze soustavy je dána rovnicí (5), kde P_1 je hodnota pravděpodobnosti, že neutron neunikne při zpomalování, a hodnota P_2 je

pravděpodobnost neúniku při tepelném pohybu mezi moderátorem a jádrem paliva. Platí, že v reaktoru s definovanými geometrickými rozměry je vždy P menší než 1. [1]

$$P = P_1 \cdot P_2 \quad (2.5)$$

Uvedené koeficienty popisují jednu generaci neutronů. Pro nekonečně velký reaktor je $P = 1$ a platí:

$$k_{\infty} = \frac{n_i}{n_{i-1}} = \varepsilon \cdot p \cdot f \cdot \eta \quad (2.6)$$

Z rovnice (2.5) a (2.6) je pak možné určit výpočet hodnoty efektivního koeficientu násobení:

$$k_{ef} = P_1 \cdot P_2 \cdot k_{\infty} \quad (2.7)$$

Na základě hodnoty k_{ef} se rozdělují základní provozní stavy reaktoru:

$$k_{ef} < 1 \dots \dots \text{reaktor je podkritický}$$

$$k_{ef} = 1 \dots \dots \text{reaktor je kritický}$$

$$k_{ef} > 1 \dots \dots \text{reaktor je nadkritický}$$

V podkritickém stavu dochází ke snižování počtu štěpení. Pokud je stav reaktoru nadkritický, počet štěpení narůstá. V případě, že se reaktor nachází v kritickém stavu, znamená to, že z jednoho štěpení vznikne pouze jeden neutron a reakce tedy samovolně pokračuje. [1]

3 Rozložení výkonu v reaktoru

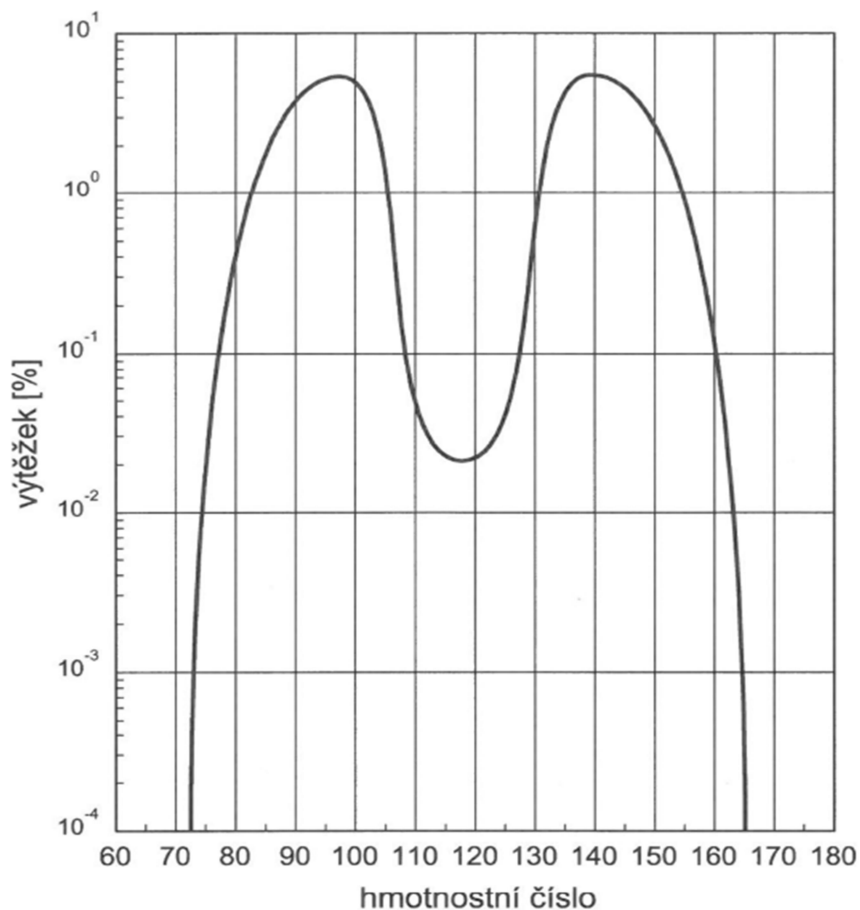
Pro úspěšnou analýzu tepelných veličin v jaderném energetickém reaktoru je nutné mít dostatečné informace o prostorovém rozložení teplotních zdrojů. Jelikož je vývin tepla v aktivní zóně způsobený štěpenou řetězovou reakcí, je toto téma spojené s fyzikálním výpočtem reaktoru.

Z pohledu tepelné analýzy má jaderný vývin tepla poměrně jiné vlastnosti než ostatní energetická zařízení:

- Závislost prostorového rozložení zdrojů tepla na rozmístění aktivní zóny (poloha absorbátorů a palivových kazet)
- Po odstavení reaktoru dochází v aktivní zóně i nadále k vývinu tepla z důvodu radioaktivního rozpadu štěpných produktů
- Možnost téměř neomezeného počtu štěpných reakcí a tím pádem i téměř neomezeného počtu zdrojů tepla

3.1 Získaná energie ze štěpení

Štěpení těžkých jader probíhá více než čtyřiceti odlišnými způsoby. S největší pravděpodobností vzniknou dva různě těžké odštěpky s hmotností v poměru 2:3. S menší pravděpodobností vzniknou dva těžké odštěpky a vysokoenergetická částice α . Velmi vzácně se jádro štěpí na tři téměř stejné části. Výtěžek produktů štěpení štěpného izotopu U-235 jako funkce pravděpodobnosti výskytu odštěpku o daném hmotnostním čísle pro různé energie neutronu způsobující štěpení je zobrazen na *Obr. 2.1*. Pro svůj charakteristický tvar je křivka nazývána „*velbloud*“. Většinou dochází k asymetrickému štěpení jader. Lehká skupina obsahuje odštěpky s hmotnostními čísly v rozmezí od 80 do 110, těžká skupina obsahuje odštěpky s hmotnostními čísly v rozmezí od 125 do 140. Z *Obr. 2.1* je patrné, že s největší pravděpodobností při štěpení uranu vznikají jádra s hmotnostními čísly ≈ 95 a ≈ 140 . Tyto jádra mají výtěžek přibližně 6,4 %. Štěpením jader vzniká přibližně 60 různých radioaktivních nuklidů, které jsou zároveň základem pro další dva až tři. Celkově tedy vzniká kolem 200 radioaktivních nuklidů. [1, 16]



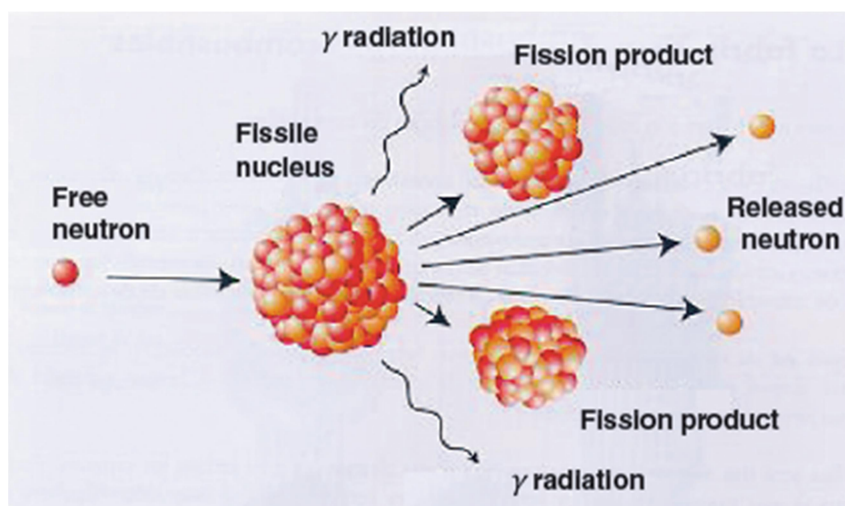
Obr. 2.1: Výtěžek produktů vznikající po štěpení U-235 [1]

Energie uvolněná během štěpení a relativní podíly z přispívajících složek jsou až na pár výjimek pro všechna štěpná jádra podobné. V Tab. 2.1 je rozklad energie uvolněné ze štěpení jader uranu a plutonia. [15]

| Forma uvolněné energie [MeV] | U-235 | U-238 | Pu-239 | Pu-241 |
|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Kinetická energie štěpných produktů | 166,2 | 166,9 | 172,8 | 172,2 |
| Okamžité záření γ | 8,0 | 7,5 | 7,7 | 7,6 |
| Kinetická energie štěpných neutronů | 4,8 | 5,5 | 5,9 | 5,9 |
| Rozpad odštěpků: | | | | |
| β | 7,0 | 8,9 | 6,1 | 7,4 |
| γ | 7,2 | 8,4 | 6,1 | 7,4 |
| Neutrino | 9,6 | 11,9 | 8,6 | 10,2 |
| Celková energie na 1 štěpení | 202,7 | 205,9 | 207,2 | 210,6 |

Tab. 2.1: Rozklad energie uvolněné při štěpení [14]

Při štěpné reakci se uvolňuje energie, která odpovídá rozdílu mezi počátečním a konečným stavem. Tato energie je přibližně 200 MeV, což odpovídá rozdílu mezi vazebnou energií počátečního těžkého jádra a štěpných produktů. Více než 80% energie se uvolňuje jako kinetická energie štěpných produktů. Nově vzniklá jádra jsou v excitovaném stavu nestabilní (radioaktivní) a dále se rozpadají. Při rozpadu je energie uvolněna ve formě β a γ záření, dále pak neutriny, které si odnáší malou část energie, jelikož téměř neinteragují s hmotou. Ve velmi málo případech se stává, že při β rozpadu vznikají opožděné neutrony, které mají i přes malý výskyt velký vliv na řízení řetězové reakce v reaktoru. V případě, že by vznikaly pouze okamžité neutrony, stav reaktoru by se po každém zásahu měnil okamžitě. Opožděné neutrony vznikají v intervalu přibližně 0,17 - 56 vteřin. [14, 16, 22]



Obr. 3.2. Jaderné štěpení [14]

Celkově na vyprodukování energie o velikosti jeden joule je potřeba přibližně $3,1 \cdot 10^{10}$ štěpení. [15]

3.2 Využitelnost získané energie

Skutečně využitelná část energie, která je odváděna chladivem z aktivní zóny, je o něco menší než celková energie uvolněná z jednoho štěpení. Nelze zužítkovat energii, kterou odnáší neutrino, ale je možné využít energii, uvolněnou neštěpnou absorpcí neutronů (≈ 7 MeV). Ohřívání moderátoru je způsobené kinetickou energií štěpných neutronů. Přibližně 1 % tepelné energie se uvolňuje ve stínění reaktoru pohlcováním záření. Obecně nelze stanovit konkrétní hodnotu energie, kterou lze využít, jelikož je závislá na konstrukci reaktoru a štěpném izotopu. Pro izotop U-235 se udává hodnota využitelné energie z jednoho štěpení přibližně 192 MeV. [13, 15]

Množství tepla, jež je chladivo schopné odvést z aktivní zóny reaktoru za jednotku času, pracuje při výpočtu s využitelnou energií na jedno štěpení s hodnotou 30,9 pJ, což je přibližně 94,5 % celkové energie uvolněné ze štěpení. Tato hodnota obsahuje energii, která je uvolněna neštěpnou absorpcí neutronů a ponížena o hodnotu nevyužité energie neutrin. Celková využitelná energie je závislá hlavně na konstrukčních vlastnostech reaktoru a chladičích okruhů. [13, 15]

Při výpočtu tepelného výkonu dP se uvažuje štěpná řetězová reakce vyvolaná převážně tepelnými neutrony s hustotou toku $\varphi(r)$ v konečné soustavě. Četnost jaderných reakcí je dána neutronovým účinným průřezem Σ . Z toho je možné odvodit, že za jednu sekundu v objemové jednotce proběhne $\Sigma_f \varphi(r)$ štěpení. Když je možné zjistit množství energie E_f ze štěpení jednoho jádra, pak tepelný výkon dP v objemovém elementu dané soustavy dr se spočte jako: [13]

$$dP = E_f \Sigma_f \varphi(r) dr \quad (3.1)$$

Jak dokazuje vzorec (3.1), tepelný výkon je nejen přímo úměrný hustotě toku neutronů, které způsobují štěpení, ale také prostorově závislý. Pokud by se účinný průřez uvažoval jako prostorově nezávislá hodnota, pak by byl tepelný výkon získaný ze štěpení přímo úměrný středním hodnotám objemu soustavy V a toku neutronů φ . [13]

$$P = E_f \Sigma_f \varphi V \quad (3.2)$$

V jaderném reaktoru je složení aktivní zóny poměrně komplikované, protože účinný průřez není konstantní v celé AZ, ale pouze v určité oblasti. V tomto případě pro m oblastí s konstantním Σ_f platí:

$$P = \sum_{k=1}^m E_{f,k} \Sigma_{f,k} \varphi_k V_k \quad (3.3)$$

V reaktoru vznikají vlivem štěpení další štěpitelné izotopy. Z původního izotopu U-238, vznikají např. Pu-239, Pu-241. Elementární tepelný výkon se pak vypočte jako: [13]

$$dP(r) = (E_5 \Sigma_{5f} + E_9 \Sigma_{9f} + E_1 \Sigma_{1f}) \varphi(r) dr \quad (3.4)$$

kde E_5 , E_9 a E_1 je energie uvolněná štěpením izotopů (U-235, P-239, P-241) a Σ_5 , Σ_9 , Σ_1 jsou příslušné účinné průřezy. [13]

3.3 Rozložení výkonu

3.3.1 Vývin tepla v aktivní zóně reaktoru

Již bylo zmíněno, že většina tepelné energie se uvolňuje v bezprostřední blízkosti místa štěpení. Výkon jaderného reaktoru je silně závislý na prostorovém rozložení hustoty toku neutronů, dále je pak prostorově a časově proměnný. Pokud platí: [13]

$$P(\vec{r}) = k \cdot \varphi(\vec{r}) \quad (3.5)$$

pak konstanta $k = f(\vec{r}, t)$ – závislost na prostoru a času je dána rozdílným obohacením v aktivní zóně reaktoru a izotopickým složením paliva, které se s vyhořením mění v čase.

Pro zjednodušení se zavádí uniformní mříž ($k = konst.$), díky které lze snáze popsat veličiny charakterizující prostorové rozložení tepla v aktivní zóně jaderného reaktoru. [13]

3.3.2 Součinitel nerovnoměrnosti

Jedna z důležitých charakteristik jaderného energetického reaktoru je vyrovnaný vývin tepla v aktivní zóně. K definování prostorového rozložení vývinu tepla se především v provozním prostředí využívá převrácená hodnota součinitele vyrovnání μ_V . Za předpokladu, že P je celkový tepelný výkon reaktoru a P_0 je celkový tepelný výkon energetického reaktoru s vývinem tepla, který je dokonale rozložený, pak platí v uniformní aktivní zóně o objemu V pro výpočet objemového součinitele nerovnoměrnosti tato rovnice: [13]

$$K_V = \frac{1}{\mu_V} = \frac{q_{V,0}}{q_V} = \frac{P_0}{P} = \frac{\varphi_0}{\varphi} \quad (3.6)$$

Veličina φ_0 vyjadřuje maximální hustotu toku neutronů v aktivní zóně reaktoru. Jelikož téměř každý jaderný energetický reaktor má geometrický tvar válce, rozlišuje se axiální (po výšce) a radiální (po poloměru) závislost vývinu tepla. [13]

Součinitel nerovnoměrnosti vývinu tepla po poloměru je definován:

$$K_r = \frac{1}{\mu_r} = \frac{q_{V,0}}{q_{V,r}} = \frac{\varphi_0}{\varphi_r} = \frac{\varphi_0 \pi R^2}{\int_0^R 2\pi r \varphi_r(r) dr} \quad (3.7)$$

Součinitel nerovnoměrnosti vývinu tepla po výšce je definován:

$$K_z = \frac{1}{\mu_z} = \frac{qv_{z,0}}{qv_{z,z}} = \frac{\varphi_0}{\varphi_z} = \frac{\varphi_0 H}{\int_0^H \varphi_z(z) dz} \quad (3.8)$$

Vývin tepla K_k v j-tém palivovém proutku v i-té kazetě je vyjádřen rovnicí:

$$K_{K,i,j} = \frac{P_{T,j} \cdot n_T}{P_{K,i}} \quad (3.9)$$

Hodnota $P_{T,j}$ vyjadřuje tepelný výkon j-tého proutku v uvažované kazetě a n_T je počet všech proutků v kazetě. Maximální hodnota součinitele nerovnoměrnosti vývinu tepla v palivových proutcích je: [13]

$$K_{K,i} = \max(K_{K,i,j})_j = \frac{P_T^{max} \cdot n_T}{P_{K,i}} \quad (3.10)$$

V palivových kazetách je nerovnoměrnost vývinu tepla charakterizována veličinou K_q . Pro K_q v i-té kazetě platí: [13]

$$K_{q,i} = \frac{P_{K,i}}{P_K} = \frac{P_{K,i} \cdot n_k}{P} \quad (3.11)$$

Hodnota $P_{k,i}$ je tepelný výkon i-té kazety a n_k představuje celkový počet kazet v aktivní zóně reaktoru. Velmi důležitá je maximální hodnota součinitele nerovnoměrnosti vývinu tepla v palivové kazetě: [13]

$$K_{q,i} = \max(K_{q,i})_i = \frac{P_K^{max} \cdot n_K}{P} \quad (3.12)$$

V případě, že je zanedbán pokles měrného vývinu tepla uvnitř palivového proutku, platí tento vztah: [13]

$$K_r = \max(K_{K,i} \cdot K_{q,i})_i \quad (3.13)$$

4 Inženýrské faktory

K vyhodnocování výkonových distribucí aktivní zóny se používají inženýrské faktory. Jejich smyslem je stanovit rezervy maxim výpočtových parametrů výkonové distribuce tak, aby se vešly do bezpečnostního limitu. Jedná se o velmi důležitou část jaderné bezpečnosti. K těmto bezpečnostním rezervám je třeba přihlížet už při projekci palivové vsázky.

4.1 Dominantní složky

Inženýrské faktory koeficientů rozložení výkonu v reaktoru jsou definovány statistickým součtem jednotlivých příspěvků k celkové neurčitosti s případnou korelací. Dominantní složky jsou:

- ***Integrální nejistota***

Jedná se o odchylku režimových charakteristik a projektových hodnot

- ***Mechanická nejistota***

Je definována jako vliv odchylek složení materiálu, rozměrů paliva, které vznikají při provozu nebo jeho výrobě

- ***Metodická nejistota***

Chyba (nepřesnost) výpočetních programů, které jsou použity při stanovení parametrů rozložení výkonu

Tyto dominantní nejistoty mohou vzniknout součtem systematické a náhodné komponenty. Daný parametr musí ležet v intervalu, jenž má jistou míru pravděpodobnosti. U zařízení jako je jaderný reaktor, musí daná veličina ležet v intervalu s pravděpodobností alespoň 95 % a se spolehlivostí nejméně 95 %. Musí platit rovnice (4.1). Násobek provozní hodnoty X s inženýrským faktorem F musí být nižší než jeho projektovaná hodnota. [11, 12]

$$X \cdot F \leq X_{lim} \quad (4.1)$$

4.2 Koeficienty nerovnoměrnosti rozložení výkonu

Inženýrské faktory jsou vyjádřením nejistoty, chyby nebo nepřesnosti, pomocí které je možné stanovit konkrétní koeficient nerovnoměrnosti rozložení výkonu v aktivní zóně reaktoru. Tyto koeficienty jsou bezrozměrné charakteristiky k daným omezujícím hodnotám výkonu. Používají se při projektování palivových vsázek ke kontrole rozložení výkonu, v různých bezpečnostních analýzách provozu i při kontrolách rozložení výkonu v právě provozovaném reaktoru pomocí monitorovacího systému.

Pro palivový proutek jsou definované dva základní koeficienty – jaderný K_0 a radiální K_r .

$$K_0 = \max\left(\frac{q_l}{q_l^{stř}}\right) \quad (4.2)$$

$$K_r = \max\left(\frac{N_p}{N_p^{stř}}\right) \quad (4.3)$$

Hodnota q_l vyjadřuje lineární výkon palivového proutku a hodnota N_p integrální výkon palivového proutku. Hodnoty s indexem *stř* jsou střední hodnoty platné pro celou aktivní zónu.

Stejně jako pro palivový proutek jsou i pro palivový soubor definovány dva koeficienty – objemový K_v a radiální K_q

$$K_v = \max\left(\frac{Q_{PS}}{Q_{PS}^{stř}}\right) \quad (4.4)$$

$$K_q = \max\left(\frac{N_{PS}}{N_{PS}^{stř}}\right) \quad (4.5)$$

Hodnota Q_{PS} vyjadřuje lineární výkon palivového souboru a hodnota N_{PS} integrální výkon palivového souboru. Stejně jako u předchozích rovnic (4.2, 4.3) označuje index střední hodnoty platné pro celou aktivní zónu.

Koeficienty K_v a K_q jsou získávány z detektorů umístěných uvnitř reaktoru a patří mezi základní vstupní veličiny při porovnávání rozdílů mezi výpočtem a měřením. [11, 12]

4.3 Stanovení inženýrských faktorů výkonového rozložení

Jak již bylo uvedeno výše, při určování statistické výpočetní chyby parametrů výkonu vycházelo z nejistot určených s pravděpodobností 95 % tzv. one-sided. V dnešní době se přistupuje spíše ke stanovení těchto nejistot tzv. two-sided, a to jako 2σ (σ je střední kvadratická odchylka rozdílů vypočítaných a naměřených hodnot).

Při určování inženýrských faktorů je nutné stanovit na začátku lokální rozložení výkonu, a tím i nerovnoměrnosti v separovaném tvaru:

$$K_0(\vec{r}) = K_v(\vec{r}) \cdot K_k \quad (4.6)$$

$$K_r(\vec{r}) = K_q(\vec{r}) \cdot K_k \quad (4.7)$$

Hodnota K_k je radiální koeficient nerovnoměrnosti výkonů palivových proutků v palivovém souboru a hodnota \vec{r} je vektor polohy v aktivní zóně.

Cílem je určení inženýrského koeficientu rezervy pro všechny koeficienty rozložení výkonu $K_i = (K_0, K_r, K_q)$, které jsou ve formě statistického součtu jeho složek.

Pro koeficienty nerovnoměrnosti výkonového rozložení $K_i = (K_0, K_r, K_q)$ je obecně definovaný výpočet inženýrského faktoru (4.8), jenž je statistickým součtem.

$$F_i^{inz}(\vec{r}) = 1 + \delta_i(\vec{r}) + 2 \cdot \sqrt{(\sigma_i^{met}(\vec{r}))^2 + (\sigma_i^{mech}(\vec{r}))^2} \quad (4.8)$$

$\delta_i(\vec{r})$ – označuje systematickou odchylku inženýrského faktoru v místě \vec{r} aktivní zóny

$\sigma_i^{met}(\vec{r})$ – označuje standardní odchylku koeficientu $K_i(\vec{r})$, která oceňuje metodické chyby (chyby použitého výpočetního aparátu) v aktivní zóně v závislosti na poloze \vec{r}

$\sigma_i^{mech}(\vec{r})$ – označuje standardní odchylku koeficientu $K_i(\vec{r})$, která oceňuje mechanické (materiálové a konstrukční) tolerance

Metodická standardní odchylka i mechanická standardní odchylka na sobě nejsou vzájemně závislé. Metodická odchylka se statisticky vyhodnocuje na koncových souborech dat. Mechanická odchylka je tradičně přebírána z dokumentace od dodavatele paliva.

Celková statistická odchylka F_i^T koeficientu K_i je definována jako násobek inženýrského faktoru $F_i^{inž}(\vec{r})$ a faktoru neurčitosti integrálního výkonu reaktoru F^I .

$$F_i^T = F^I \cdot F_i^{inž}(\vec{r}) \quad (4.9)$$

Tomuto koeficientu se říká také celkový koeficient rezervy. Vyjadřuje, jaký vliv mají společně všechny faktory na neurčitost daného koeficientu K_i . [11, 12]

4.3.1 Metodické nejistoty

Metodická chyba je složena ze dvou složek. První z nich jsou parametry K_q a K_v . Jejich vypočtené a naměřené hrubosíťové parametry jsou statisticky vyhodnocovány na zvoleném datovém souboru ve statistice 2σ . Druhá složka souvisí s parametry K_0 a K_r . Tyto koeficienty jsou poproutkové parametry a nejsou pro ně z hlediska rozložení výkonu žádná naměřená data, podle kterých by bylo možné při porovnání s výpočtem určit rozložení výkonu palivových souborů. U této složky metodické chyby se výpočtové hodnoty porovnávají s mnohem přesnějšími referenčními hodnotami, jenž při svých výpočtech využívají metodu Monte Carlo. [11, 12]

Celková metodická chyba výpočtu parametrů K_0 , K_r a K_q :

$$K_0: \delta_0^{met} + \sqrt{\left(2 \frac{\sigma(K_v)}{K_v}\right)^2 + \left(2 \frac{\sigma(K_k)}{K_k}\right)^2} \quad (4.10)$$

$$K_r: \delta_r^{met} + \sqrt{\left(2 \frac{\sigma(K_q)}{K_q}\right)^2 + \left(2 \frac{\sigma(K_k)}{K_k}\right)^2} \quad (4.11)$$

$$K_q: 2 \frac{\sigma(K_q)}{K_q} \quad (4.12)$$

Symbol δ^{met} označuje příslušnou systematickou složku metodické chyby. [11, 12]

4.3.2 Mechanické nejistoty

Mechanické nejistoty, jak již bylo zmiňováno, jsou přebírány od dodavatele paliva. Mechanická složka inženýrského faktoru:

- **Obohacení paliva**
- **Obsah Gd**
- **Hmotnost uranu v palivu**
- **Průměr pokrytí**
- **Krok mřížce palivových proutků**
- **Axiální mezery mezi tabletkami uranu**
- **Mezery mezi palivovými soubory**

Mechanické komponenty inženýrských faktorů:

$$\frac{\Delta_0^{mech}}{K_v}, \frac{\Delta_r^{mech}}{K_q}, \frac{\Delta_q^{mech}}{K_q}$$

Mechanické koeficienty jsou relativní a společné pro všechny palivové soubory v aktivní zóně. Jsou vyhodnocovány v intervalu 2σ jako předchozí metodické. [11, 12]

4.3.3 Celkový koeficient rezervy

Po doplnění rovnice (4.8) o poznatky z kap. 3.3.1 a kap. 3.3.2 vzniknou následující rovnice inženýrských faktorů:

- **Inženýrský faktor pro výpočet jaderného koeficientu K_0 a lineárního výkonu palivového proutku q_l**

$$F_0^{inž} = 1 + \delta_0 + \sqrt{\left(2 \frac{\sigma^{met}(K_v)}{K_v}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta(K_k)}{K_k}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta_0^{mech}}{K_v}\right)^2} \quad (4.13)$$

- **Inženýrský faktor pro výpočet relativního výkonu palivového proutku K_r**

$$F_r^{inž} = 1 + \delta_r + \sqrt{\left(2 \frac{\sigma^{met}(K_q)}{K_q}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta(K_k)}{K_k}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta_r^{mech}}{K_q}\right)^2} \quad (4.14)$$

- **Inženýrský faktor pro výpočet relativního výkonu palivového souboru K_q**

$$F_q^{in\check{z}} = 1 + \delta_q + \sqrt{\left(2 \frac{\sigma^{met}(K_q)}{K_q}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta_q^{mech}}{K_q}\right)^2} \quad (4.15)$$

První člen pod odmocninou představuje metodickou složku, druhý člen představuje relativní odchylku vnitrokazetového poproutkového rozložení výkonu a třetí člen mechanickou složku.

Celkový koeficient rezervy neboli celkový inženýrský faktor je definován jako součin příslušného inženýrského faktoru $F_i^{in\check{z}}$ a koeficientu nepřesnosti stanovení a udržení integrálního výkonu F^I . [11, 12]

5 Serpent

Výpočetní kód Serpent se začal vyvíjet v Technickém výzkumném centru VTT ve Finsku od roku 2004. Původní název byl PSG (Probabilistic Scattering Game) a lze se s ním setkat ve všech publikacích, které vyšly do října roku 2008. V tomto roce bylo jméno změněno na Serpent 1.0.0. V dnešní době se již používá následující verze – Serpent 2. Kód je psán v jazyce ANSI-C a byl vyvinut především pro operační systém Linux. [22]

5.1 Metoda Monte Carlo

Pojem Monte Carlo je používán pro numerické metody, které jsou používány při řešení matematických úloh. Tato metoda využívá náhodné veličiny, teorii pravděpodobnosti a matematickou statistiku. Teoretický základ metody byl znám již z dřívějších let. V roce 1873 vyšel článek A. Halla, kde popisoval, jak lze určit číslo π pomocí náhodného házení jehly na rovinu pokrytou rovnoběžkami. Samotný princip metody byl však znám už od roku 1777 pod názvem Buffonova úloha o jehle. První praktické využití metody bylo pravděpodobně v roce 1930, kdy tento přístup využil Enrico Fermi ke generování náhodných čísel k výpočtu vlastností neutronů. V roce 1944 se již používaly při výpočtech jednoduché počítače. Právě v tomto roce v Národní laboratoři Los Alamos zkoumali S. Ulam, J. von Neumann a N. Metropolis chování neutronů. Metoda Monte Carlo byla klíčová při simulacích štěpných reakcí při vývoji atomové bomby (projekt Manhattan). Název Monte Carlo je přisuzován právě S. Ulamovi, který jí pojmenoval podle kasina v Monaku, jelikož při svých simulacích využil jako generátor náhodných čísel princip kola rulety. [19, 20, 21]

Přesnost metody Monte Carlo je dána:

- *Kvalitou generátoru náhodných čísel*
- *Výběrem vhodného algoritmu*
- *Počtem iterací*
- *Kontrolou přesnosti získaného výsledku*

5.2 Příkazy a práce s kódem Serpent

Jednotlivé příkazy jsou psány do samostatných datových bloků označené jako cards (karty). Každá karta musí být jasně specifikována a z hlediska uspořádání pro ně neplatí žádná omezení. Každá karta končí na místě, kde začíná jiná karta. [22]

Výpočetní kód Serpent využívá pro popisování složitějších struktur tzv. universe-geometrii. To znamená, že geometrie je rozdělena do oddělených vrstev, které jsou konstruovány nezávisle na sobě a vnořeny jedna do druhé. Toto je velká výhoda, protože to umožňuje uživateli rozdělit komplexní geometrii na menší části, s nimiž se později lépe pracuje. Pravděpodobně nejlepší příklad použití struktury universů je aktivní zóna jaderného reaktoru. Nejvyšší úrovní jsou palivové proutky, které obsahují palivové pelety, pokrytí a chladivo. Každý typ proutku je popsán nezávisle ve vlastním universu. Další úrovní je palivový soubor, ve kterém je universe palivového proutku uspořádán do pravidelné mříže. Celý palivový soubor je dalším samostatným universem. Palivový soubor může obsahovat také podpůrné konstrukce aktivní zóny, axiální a radiální reflektory nebo třeba různé typy kanálů. V dalším stupni geometrie jsou tyto universy palivových souborů uspořádány do další mřížky. Tím je vytvořena zóna reaktoru, jež může být obklopena reflektory (radiální nebo axiální) a nakonec tlakovodní nádobou reaktoru. [22]

Základní stavební blok geometrie používaný v Serpentu je buňka, což je oblast definovaná pomocí jednoduchých ploch. Každá buňka je vyplněna homogenním materiálem, jiným universem nebo prázdným místem. [22]

5.2.1 Povrch „surf“

V Serpentu je možné vytvořit 20 základních struktur povrchů, které jsou uvedeny v Tab. 5.1.

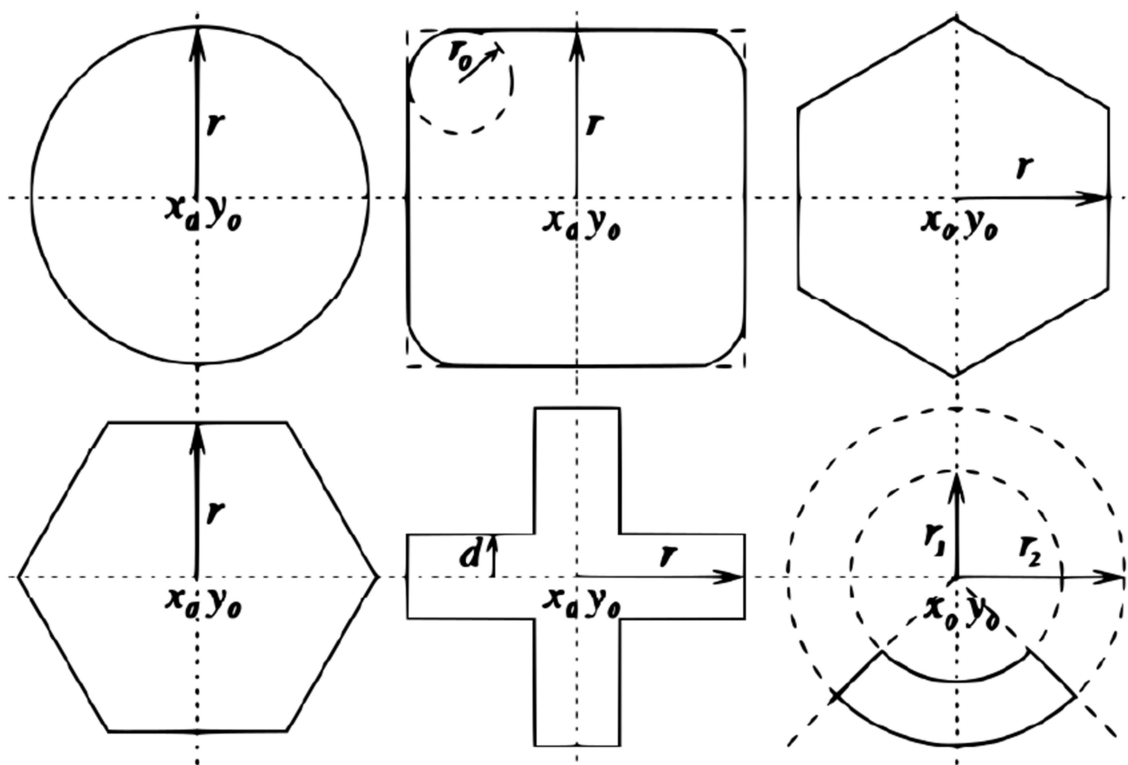
Pro tři typy rovin značí x_0 , y_0 a z_0 vzdálenosti od počátku. U krychle, koule a válcových povrchů definují tyto parametry střed povrchu. Poloměr těchto objektů je definován parametrem r . U některých povrchů je navíc parametr r_0 , který určuje zaoblení krajních rohů. Pokud je tento parametr vynechán, předpokládá se, že rohy jsou ostré. Parametry z_1 a z_2 definují spodní a horní podstavu válce, ale stejně jako parametr r_0 , není nutné je definovat. [22]

| Typ | Popis | Parametry |
|----------------|--|---|
| inf | Veškerý prostor | - |
| px | Rovina kolmá na osu x | x0 |
| py | Rovina kolmá na osu y | y0 |
| pz | Rovina kolmá na osu z | z0 |
| sph | Koule | x0, y0, z0, r |
| cylx | Válec rovnoběžný s osou x | y0, z0, r, x1, x2 |
| cyly | Válec rovnoběžný s osou y | x0, z0, r, y1, y2 |
| cylz nebo cyl | Válec rovnoběžný s osou z | x0, y0, r, z1, z2 |
| sqc | Čtvercový válec rovnoběžný s osou z | x0, y0, r, r0 |
| cube | Krychle | x0, y0, z0, r |
| cuboid | Kvádr | x1, x2, y1, y2, z1, z2 |
| hexxc | Šestihranný válec rovnoběžný s osou z, typ x | x0, y0, r, r0 |
| hexyc | Šestihranný válec rovnoběžný s osou z, typ y | x0, y0, r, r0 |
| hexxprism | Šestihranný kvádr rovnoběžný s osou z, typ x | x0, y0, r, z1, z2 |
| hexyprism | Šestihranný kvádr rovnoběžný s osou z, typ y | x0, y0, r, z1, z2 |
| cross | Válec ve tvaru kříže rovnoběžný s osou z | x0, y0, r1, r2, θ_1 , θ_2 |
| conx | Kužel v ose x | x0, y0, z0, r, h |
| cony | Kužel v ose y | x0, y0, z0, r, h |
| conz nebo cone | Kužel v ose z | x0, y0, z0, r, h |
| dode | Dvanáctihranný válec rovnoběžný s osou z | x0, y0, r1, r2 |
| octa | Osmihranný válec rovnoběžný s osou z | x0, y0, r1, r2 |
| plane | Základní rovina | A, B, C, D |
| quadratic | Základní kvadratický povrch | A, B, C, D, E, F, G, H, J, K |

Tab. 5.1: Typy povrchů v Serpentu [22]

Pozitivní a negativní strany povrchu

Povrchy jsou používány pro definování geometrických buněk. Z tohoto důvodu je nutné rozlišit vnější a vnitřní povrch. Záporné znaménko „-“ znamená, že se buňka nachází uvnitř definovaného povrchu. Na Obr. 5.1 je uveden příklad vnějších povrchů. [22]



Obr. 5.1: Základní vnější plochy, jejich parametry, ukázka zaoblení parametrem r_0 [22]

Syntaxe povrchových karet je:

surf <id> <type> <param 1> <param 2> ...

| | | |
|------|-------------------------|---------------------------|
| | <id> | je identifikátor povrchu |
| kde: | <type> | je typ povrchu (tab. 5.1) |
| | <param 1> <param 2> ... | jsou parametry povrchu |

Identifikátor povrchu je libovolně zvolené číslo, které identifikuje povrch v definicích buněk. [22]

5.2.2 Definice palivového proutku „pin“

Serpent má pro palivový proutek zjednodušenou definici. Tzv. pin se skládá z vnořených kruhových vrstev. Nejedná se ani tak o geometrický objekt, ale spíše o makro, jež se používá k definování universu. Materiálové oblasti a jejich vnější okraj jsou řazeny vzestupně a mají tvar válce. Pokud je rozměr zadán záporně, jedná se o tloušťku materiálu.

V případě kladného rozměru jde o absolutní poloměr. Místo definice materiálu je možné použít příkaz *fill* pro další univers. Definice pinů se často používají společně s mříží k definování palivového souboru. [22]

Syntaxe pinu je:

```
pin <id>
<mat 1> <r1>
<mat 2> <r2>
...
<mat n>
```

| | | |
|-----|---------------------|--|
| | <id> | je identifikátor pinu |
| kde | <mat 1> <mat 2> ... | jsou materiály |
| | <r1> <r2> ... | jsou vnější okraje materiálových oblastí |

5.2.3 Buňka „cell“

Každá buňka je pojmenovaná textovým řetězcem a patří do určitého definovaného universu. Buňka je vyplněna materiálem, který má více variant zápisu:

- Přímé definování materiálu
- Pokud je buňka prázdná, pojmenuje se materiál „void“.
- Pokud se buňka nachází v oblasti, která není důležitá pro výpočet, použije se příkaz „outside“. Tento příkaz se většinou používá pro vyplnění oblastí universů, které nejsou součástí skutečné geometrie. Pokud se dostane neutron do takové oblasti, je jeho historie ukončena.
- Pokud je buňka vyplněna jiným universem, jméno materiálu je nahrazeno příkazem „fill“ a názvem daného universu.

Tvar buňky je určen definicí hraničních ploch. Kladné (vnější) strany povrchu a záporné (vnitřní) strany povrchu. Buňka je definovaná jako průsečík všech povrchů seznamu, v novější verzi Serpentu je možné pracovat i se sjednocením. [22]

Syntaxe buňky je:

```
cell <name> <u0> <mat> <surf 1> <surf 2> ...
```

| | | |
|-----|-----------------------|-----------------------|
| | <name> | je název buňky |
| kde | <u0> | je universe buňky |
| | <mat> | je materiál buňky |
| | <surf 1> <surf 2> ... | jsou hraniční povrchy |

5.2.4 Mříž „lat“

Mříže jsou speciální universy vyplněné pravidelnou strukturou dalších universů (např. pinů). Serpent má osm typů mříží: čtvercovou, dvě šestiúhelníkové, kruhové pole clusterů, tři nekonečné 3D mříže vyplněné jediným universem a vertikální zásobník. Každá mříž definuje vesmír, který musí být vložen do buňky pomocí příkazu *fill*. Pokud je ohraničující buňka větší než mřížka, mohou vznikat nedefinované plochy, což má za následek chybu geometrie. Tomu lze zabránit zvětšením mříže. [22]

Syntaxe mříže je:

```
lat <u0> <type> <x0> <y0> <nx> <ny> <p>
```

| | | |
|-----|--------|------------------------------------|
| | <u0> | je název universu mříže |
| | <type> | je typ mříže (= 1, 2 or 3) |
| | <x0> | je x-ová souřadnice počátku mříže |
| kde | <y0> | je y-onvá souřadnice počátku mříže |
| | <nx> | je počet prvků v ose x |
| | <ny> | je počet prvků v ose y |
| | <p> | je rozteč palivových proutků |

Typy mříže:

<1> – Čtvercová mříž

<2> – Šestiúhelníková mříž ve směru X

<3> – Šestiúhelníková mříž ve směru Y

5.2.5 Materiál „mat“

Každý materiál je složen ze skupiny nuklidů a každý nuklid je spojen s knihovnou účinných průřezů. Pro označení nuklidů není přesná definice, ale často bývá ve tvaru $\langle Z \rangle \langle A \rangle . \langle id \rangle$. Kde Z je číslo prvku, A je hmotnostní číslo a id je identifikační číslo v knihovně účinných průřezů. Uran U-235 je označen jako „92235.80c“. [22]

Základní syntaxe materiálové karty je:

```
mat <name> <dens> [<options>]
```

```
<iso 1> <frac 1>
```

```
<iso 2> <frac 2>
```

```
...
```

| | | |
|-----|-----------------------|--|
| | <name> | je jméno materiálu |
| | <dens> | je hustota |
| kde | <options> | je nastavitelný parametr |
| | <iso 1> <iso 2> ... | jsou názvy nuklidů |
| | <frac 1> <frac 2> ... | jsou odpovídající podíly (atomové nebo hmotnostní) |

Název materiálu se používá k identifikaci v kartách buněk (*Kapitola 5.2.3*). Hustota a podíl nuklidů mohou být zadány jako atomové nebo hmotnostní hodnoty. Pozitivní vstup definuje atomovou hustotu a atomový podíl. Negativní vstup definuje klasickou hustotu a hmotnostní podíl. Pokud je hodnota materiálu nastavena na hodnotu nula nebo „sum“, hodnota se spočte z izotopového složení. Každému materiálu je možné nastavit barvu pomocí příkazu *rgb*, která je zobrazená v grafickém výstupu. V případě, že parametr pro barvu není definován, je mu vybrána náhodně. [22]

5.2.6 Ostatní použité příkazy

Serpent má další parametry pro výpočty, které jsou definované pomocí příkazu *set*:

```
set <param> <value 1> <value 2> ...
```

| | | |
|-----|-------------------------|------------------------|
| kde | <param> | je jméno parametru |
| | <value 1> <value 2> ... | jsou hodnoty parametru |

Výchozím režimem výpočtu je metoda *k-eigenvalue*. Proto je nutné na začátku stanovit velikost neutronové populace, počet cyklů výpočtu a počet neaktivních cyklů. K tomu se používá příkaz *set pop*. [22]

```
set pop <npop> <cycles> <skip>
```

| | | |
|-----|----------|---------------------------------|
| | <npop> | je počet neutronů jednoho cyklu |
| kde | <cycles> | je počet aktivních cyklů |
| | <skip> | je počet neaktivních cyklů |

V Serpentu je nutné definovat cestu ke knihovnám. Kromě knihoven účinného průřezu je nutné mít přístup k údajům o rozpadu nebo výtěžku štěpení způsobeného neutrony. Syntaxe pro nastavení knihoven jsou tyto: [22]

```
set acelib "<file>"
```

```
set declib "<file>"
```

```
set declib "<file>"
```

Kde "<file>" je cesta k souboru, který odkazuje na soubory knihovny.

Průřezy tepelného rozptylu se používají jako náhrada nízkoenergetického pružného rozptylu pro některé důležité nuklidy v moderátoru (vodík, grafit): [22]

```
therm <thname> <lib>
```

| | | |
|-----|----------|---------------------------|
| | <thname> | je název knihovny |
| kde | <lib> | je identifikátor knihovny |

Někdy je nutné definovat okrajové podmínky a určit, co se stane s neutrony, které opustí definovanou geometrii. Okrajové podmínky se nastavují pomocí příkazu *set bc*.

set bc <c>

Kde <c> je určení o jaký typ okrajové podmínky se jedná (=1, 2 nebo 3). [22]

Typy okrajových podmínek:

<1> – Černá – Jedná se o výchozí hodnotu, která říká, že všechny neutrony mimo definovanou geometrii zanikají.

<2> – Reflexní – Pokud neutron narazí na reflexní hranici, je odražen zpět do geometrie.

<3> – Periodické – V případě periodické hranice je neutron přesunut do opačného směru povrchu.

V Serpentu je možné počítat rozložení výkonu v proutcích nebo kazetách v simulacích full-core. Tato možnost je nastavena příkazem *set cpd*. [22]

set cpd <depth> [<nz> <zmin> <zmax>]

| | | |
|-----|---------|----------------------------|
| kde | <depth> | je počet zahrnutých levelů |
| | <nz> | Je počet axiálních vrstev |
| | <zmin> | je spodní axiální hranice |
| | <zmax> | je horní axiální hranice |

Označení levelu udává informaci, zda se jedná o výpočet pouze v palivové kazetě (1) nebo kazetě a proutku (2). Axiální parametry určují umístění ve směru osy z. [22]

Aby bylo možné zkontrolovat geometrii modelu, je velmi užitečné použít funkci *plot*. Tato funkce vytváří PNG obrázek. Výhoda funkce tisku geometrie je, že umí zkontrolovat, jestli je geometrie správně nadefinována. Uživatele na to upozorní červenou nebo zelenou barvou, v případě prázdného regionu černou barvou. Syntaxe příkazu je: [22]

Plot <or> <nx> <ny> [<p> <min1> <max1> <min2> <max2>]

| | | |
|-----|--------|---|
| | <or> | je orientace roviny, ve které je prováděn tisk |
| | <nx> | je šířka v pixelech |
| | <ny> | je výška v pixelech |
| kde | <p> | je pozice na ose, která je kolmá k rovině tisku |
| | <min1> | je minimum první souřadnice |
| | <max1> | je maximum první souřadnice |
| | <min2> | je minimum druhé souřadnice |
| | <max2> | je maximum druhé souřadnice |

Orientace roviny pro tisk:

<1> - yz – kolmá na osu x

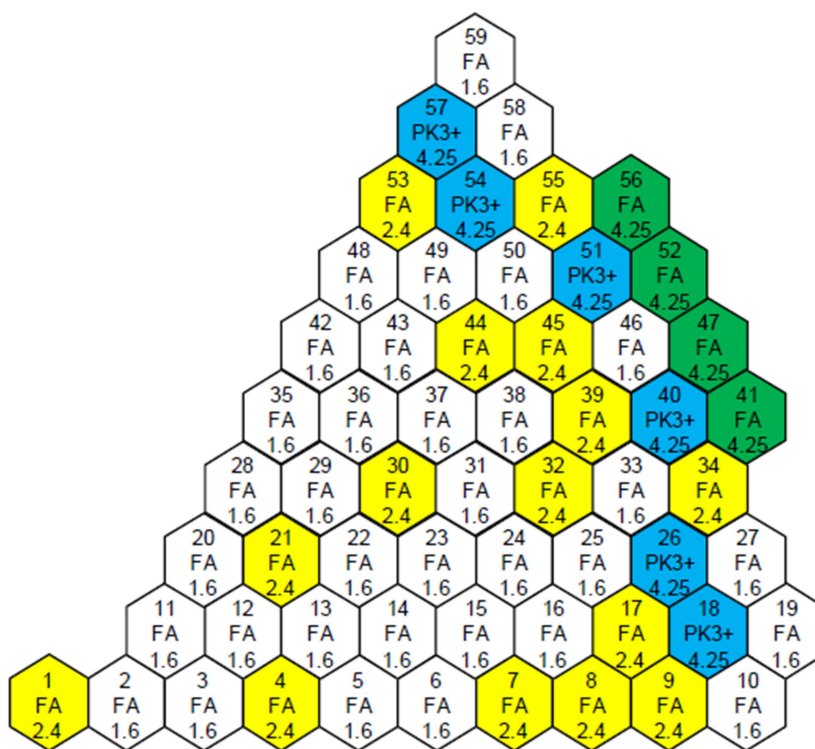
<2> - xz – kolmá na osu y

<3> - xy – kolmá na osu z

6 Citlivostní analýza

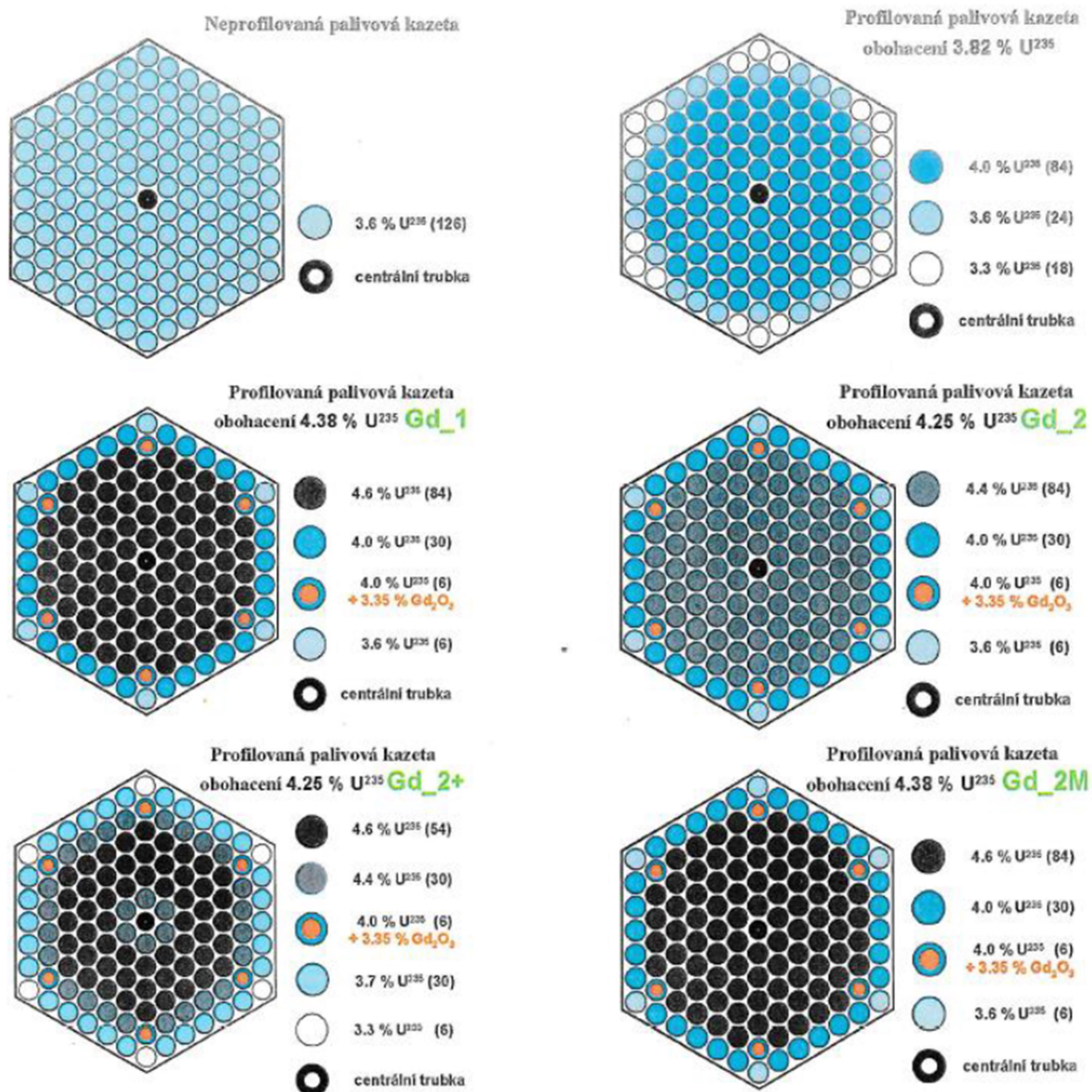
Hlavní část diplomové práce se zabývá rozložením výkonu v palivové kazetě PK-3 a zjištěním míry ovlivnění výkonu při simulovaných změnách mechanických faktorů. Většina informací v této kapitole a veškeré zadané hodnoty nutné pro vytvoření mini-core modelu s materiálovými hodnotami palivových proutků jsem čerpal z RK-3 benchmarku.

Kazeta PK-3 je nový typ palivového souboru třetí generace, o němž se uvažuje jako o náhradě některých současných palivových kazet s průměrným obohacením 4,25 %w U-235. Na *Obr. 6.1* je model plánované aktivní zóny s použitím nových PK-3 palivových kazet. Palivová kazeta typu PK-3 umožňuje lepší využití projektových rezerv, což znamená, že je v aktivní zóně více paliva. Díky této změně by bylo možné přejít na 15M cyklus.



Obr. 6.1: Model části aktivní zóny s použitím PK-3 kazet [25]

Historický přehled palivových kazet, které byly použity v průběhu provozu jaderného reaktoru na EDU, znázorňuje *Obr. 6.2*. U každé kazety jsou uvedeny základní parametry a rozložení palivových proutků. Plánovaná kazeta PK-3 je úplně nová generace paliva.



Obr. 6.2: Historie palivových kazet na EDU [10]

Hlavní rozdíly mezi původní palivovou kazetou typu 4,25 %w (Obr. 6.3) a novou palivovou kazetou 4,25 %w PK-3 (Obr. 6.4) jsou následující:

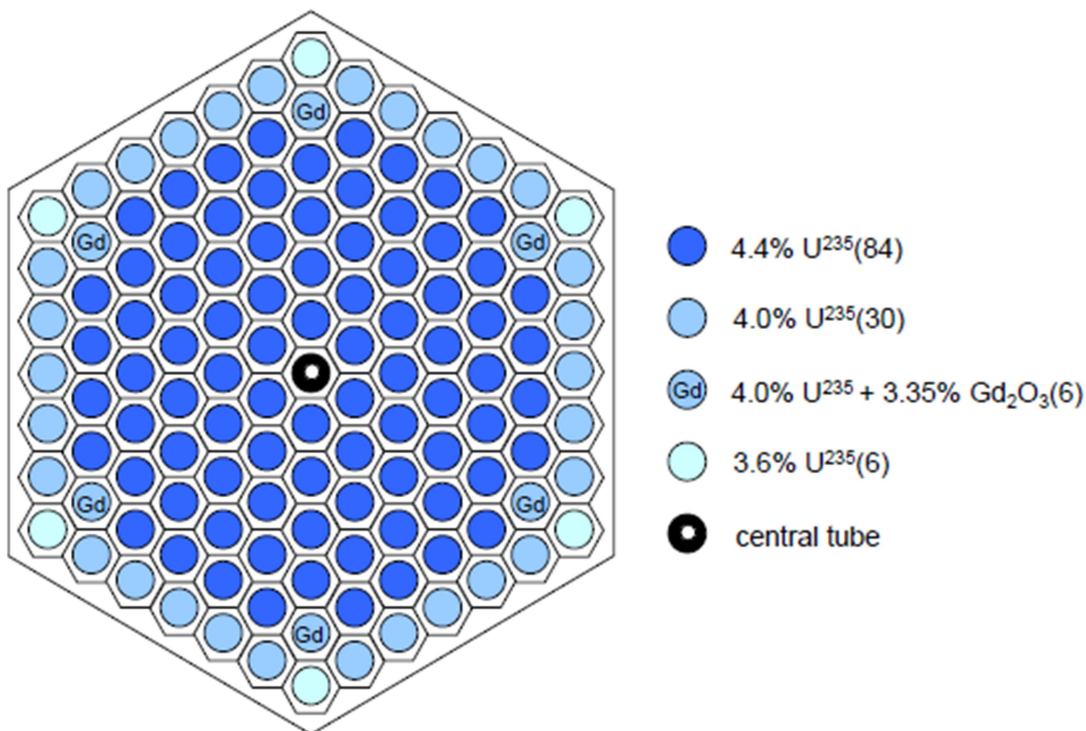
U nové palivové kazety PK-3 se zvětšila, ve srovnání se starším typem, rozteč palivových proutků z hodnoty 12,3 mm na hodnotu 12,6 mm. [25]

Nová palivová kazeta PK-3 má jinou velikost uranových tabletek. Původní velikost o průměru 7,6 mm se zvýšila na 7,8 mm. Tato změna ovlivnila i vnější průměr pokrytí, který se změnil ze 7,73 mm na 7,93 mm. Jelikož je celkový průměr proutku 9,1 mm zachován, je patrné, že muselo dojít ke snížení tloušťky pokrytí. [25]

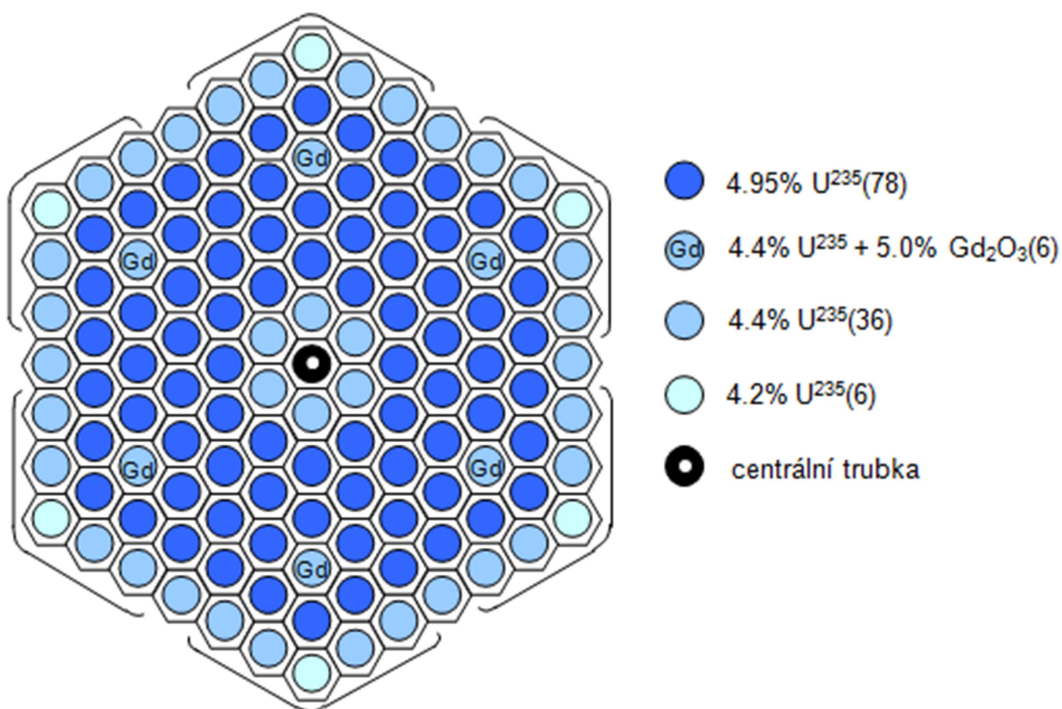
Zásadní je také změna palivového pláště. Na obrázcích je vidět, že nový typ kazety má 6 úhelníků, které obsahují zirkonium. Tloušťka pláště palivové kazety je zmenšena

na hodnotu 0,65 mm. Nejviditelnější změnou je, že mezi úhelníky jsou teď navíc 1,13 mm velké mezery. [25]

Mimo jiné je u nových kazet odlišné rozložení palivových proutků a také jejich obohacení. Rozdíly v rozložení a typy palivových proutků jsou pro srovnání na *Obr. 6.3* a *Obr. 6.4*. [25]



Obr. 6.3: Palivová kazeta s průměrným obohacením 4,25 %w U-235 [25]



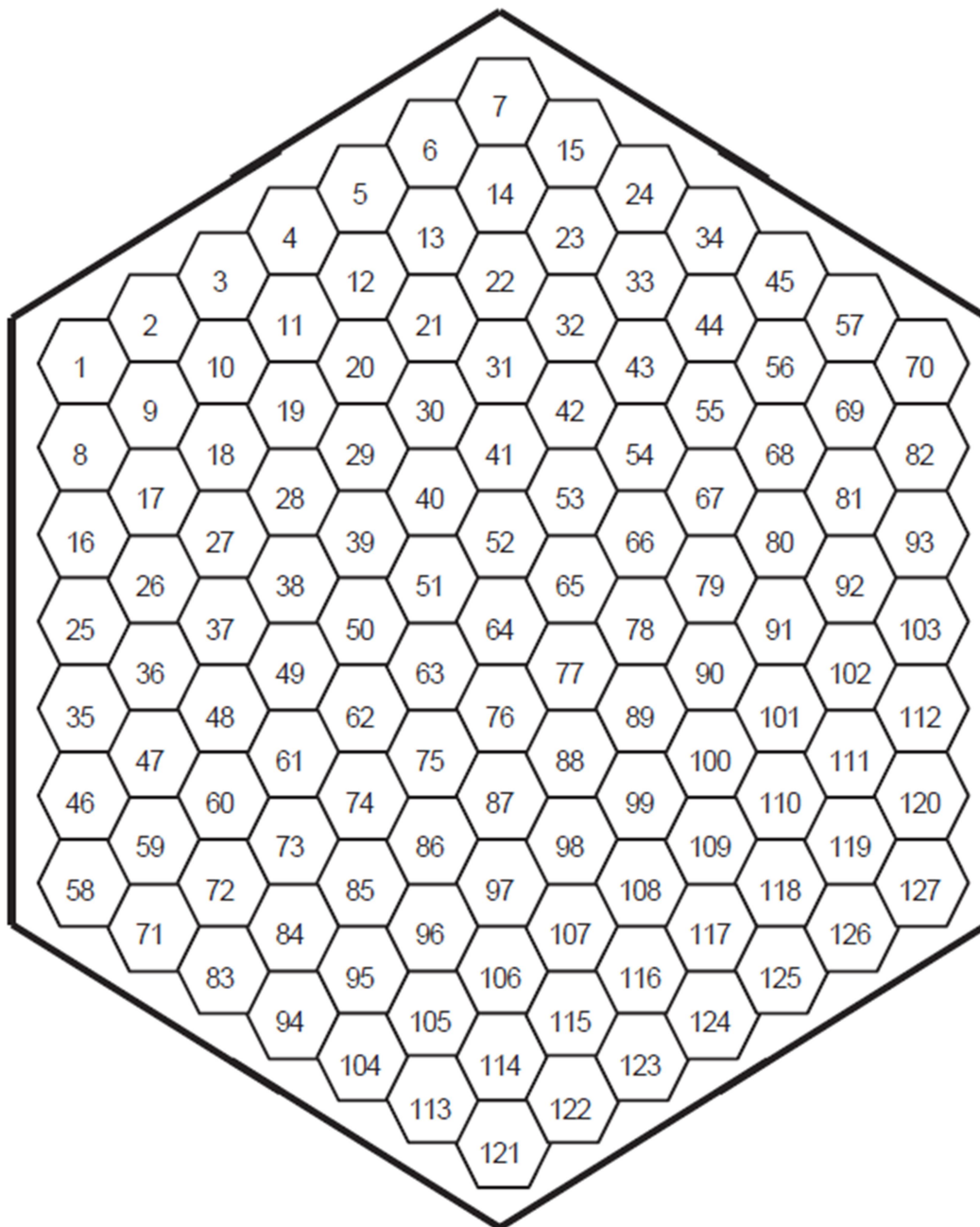
Obr. 6.4: Nová palivová kazeta PK-3 s průměrným obohacením 4,25 %w U-235 [25]

Citlivostní analýza byla provedena pro následující faktory:

- ***Obohacení paliva***
- ***Obsah Gd_2O_3***
- ***Hmotnost uranu v palivu***
- ***Průměr pokrytí***
- ***Krok mřížce palivových proutků***
- ***Axiální mezery mezi tabletkami uranu***
- ***Mezery mezi palivovými soubory***
- ***Poloha kazety***

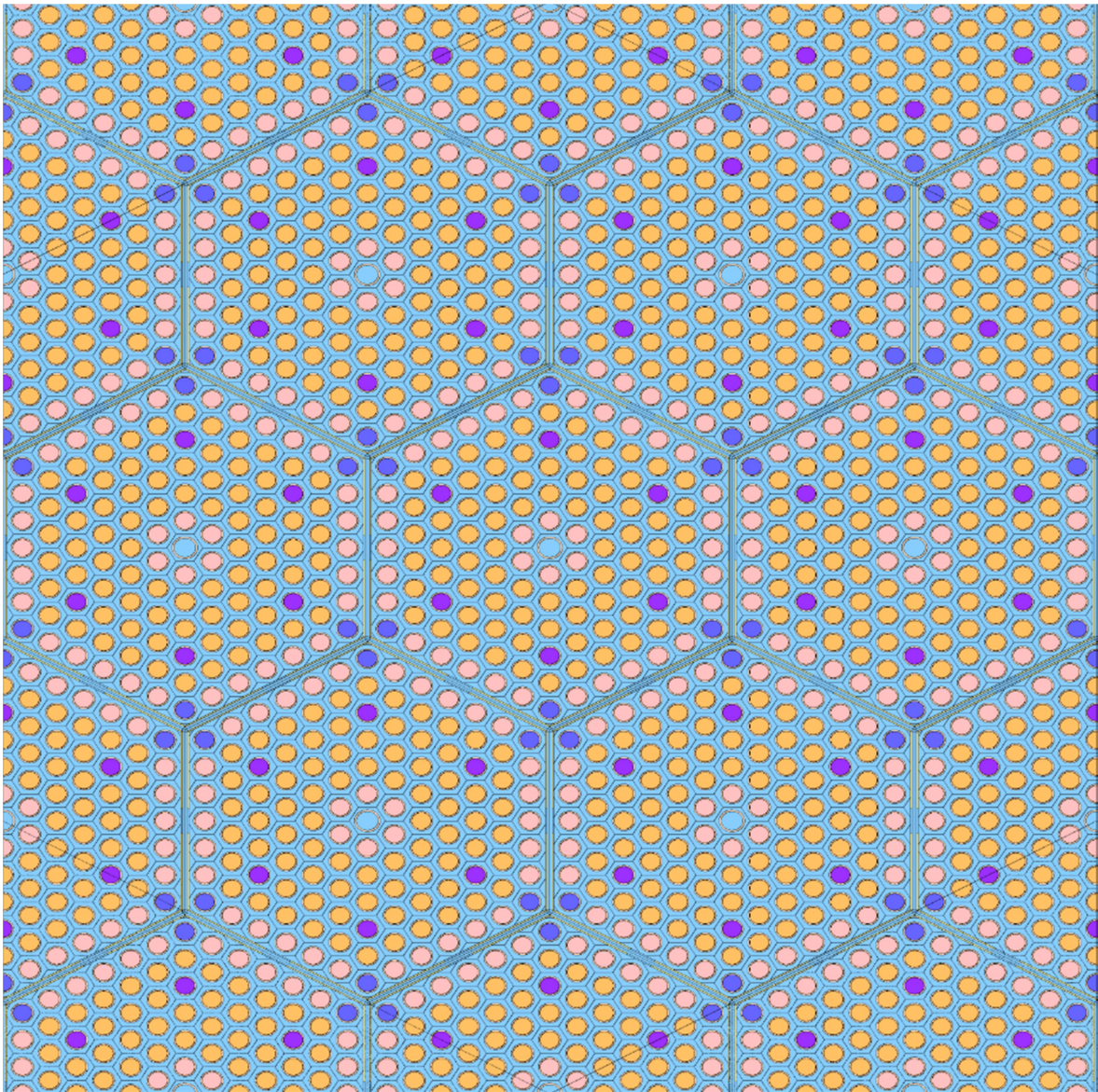
Jednotlivé vyhodnocování v následujících kapitolách je stylizováno následujícím způsobem. V každé kapitole je popsán vliv simulované chyby, který se projeví na rozložení výkonu v palivové kazetě. Na základě výstupních hodnot byly vybrány a vykresleny reprezentativní modely z každé oblasti. Kvůli velkému množství výstupních hodnot je na závěr každé kapitoly uvedena tabulka pouze s limitními hodnotami při dané změně.

Samotné výpočty byly prováděny tak, že do vytvořené testovací palivové kazety (Obr. 6.6) byla přidána simulovaná mechanická nejistota. Změny byly simulovány pro vybrané proutky 77, 88, 100, 108, 110, 119, 124, 126 a 127. Následně byly změny provedeny ve skupinách palivových proutků stejného typu a nakonec pro celou palivovou kazetu. Celkem bylo provedeno 131 simulací.



Obr. 6.5: Číslování palivových proutků v kazetě PK-3

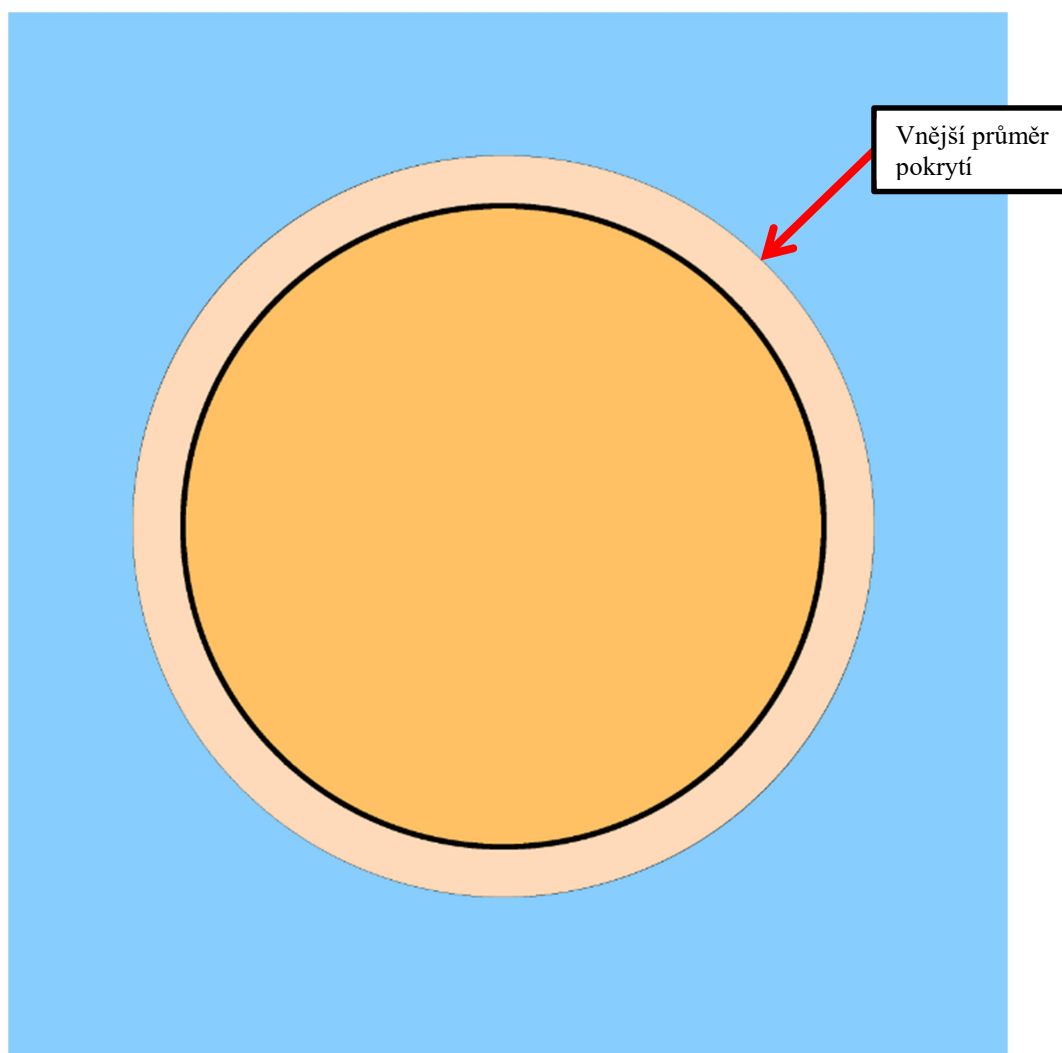
Vstupní hodnoty a faktické informace v této kapitole byly převzaty z interních zdrojů firmy Škoda JS a. s., pro kterou je tato diplomová práce počítána. Veškeré výstupní hodnoty budou součástí licenčního řízení nového typu paliva pro elektrárnu Dukovany.



Obr. 6.6: Mini-core model s testovací palivovou kazetou vytvořený v Serpentu

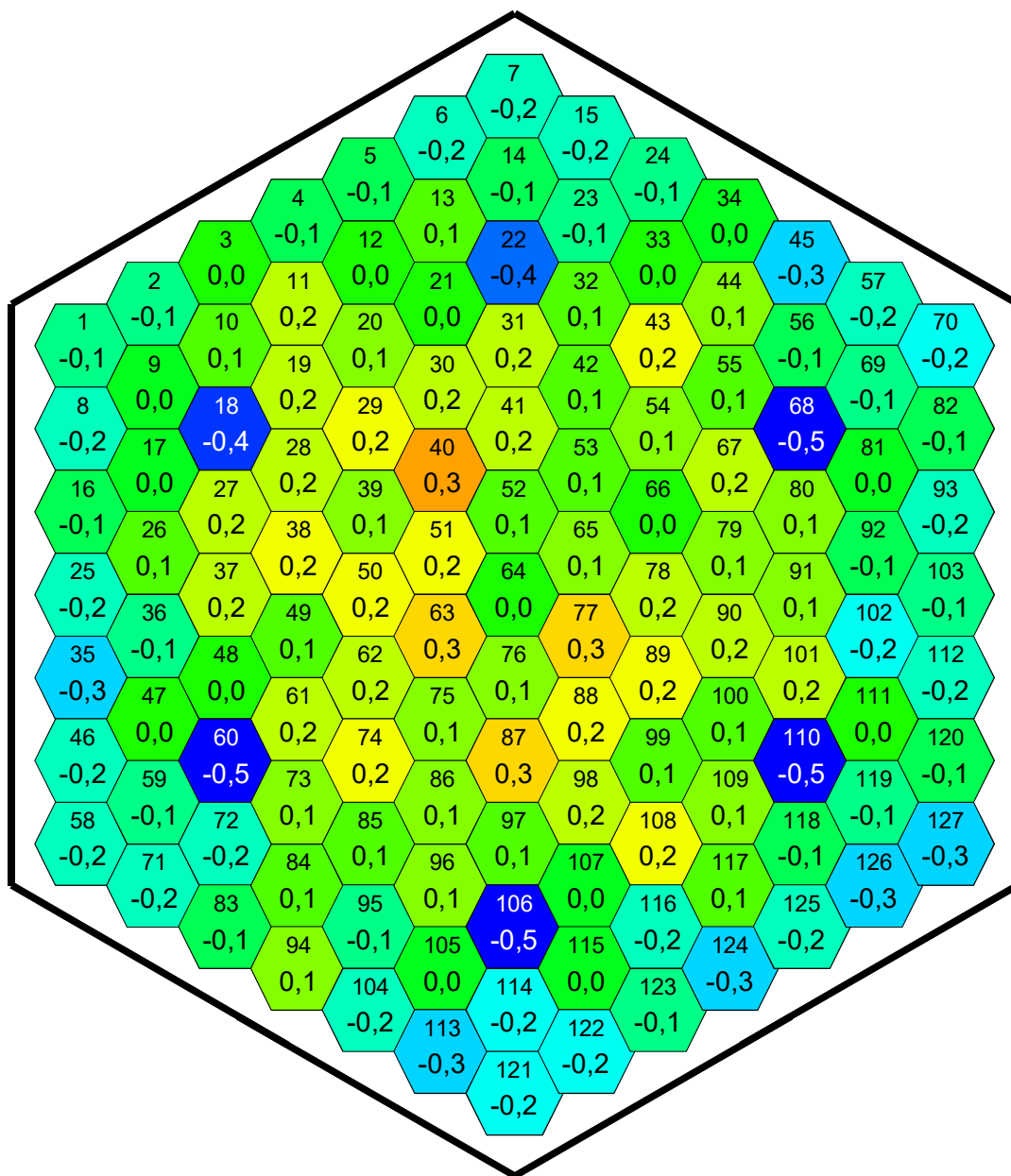
6.1 Tloušťka pokrytí palivového proutku

První výpočet mechanické nejistoty byl zaměřen na průměr pokrytí. Palivový proutek je vyvíjen tak, aby materiál pokrytí stěny proutku měl ty nejlepší vlastnosti. Materiálový význam je důležitý z důvodu zajištění co nejlepší tepelné a korozní odolnosti, ale i zvýšení meze radiační křehkosti. V reaktoru VVER-440 je použit materiál E110 neboli zirkoniová slitina, neboť má navíc velmi malý účinný průřez pro neutrony. Při výpočtech byla nastavena referenční hodnota tloušťky pokrytí palivového proutku 1,17 mm, přičemž vnější průměr je 9,10 mm (znázorněno na *Obr. 6.7*). Výpočet byl proveden pro změnu +0,05 mm a -0,05 mm, což je tolerance výroby.



Obr. 6.7: Průměr pokrytí vnějšího průměru

Výsledná změna rozložení výkonu v palivové kazetě je vyobrazena na Obr. 6.8. Maximální změna nastává v palivových proutcích s nejvyšším obohacením uranu. Vlivem zmenšení vnějšího průměru dosahují tyto proutky poklesu výkonu až o 0,5 % vzhledem k referenčním hodnotám. Pokles výkonu je způsoben větším množstvím vody, která nahradila prostor zmenšeného palivového proutku.



Obr. 6.8: Změna v celé palivové kazetě – průměr 9,05 mm

V druhém případě výpočtu relativních výkonů byl průměr palivového proutku zvětšen na hodnotu 9,15 mm. Stejně jako u předchozích výpočtů je změna výkonu přímo úměrná

množství obohacení paliva a dosahuje nejvyššího nárůstu výkonu 0,5 % v proutcích s nejvyšším obohacením. Vzhledem k opačnému poměru vody (menší množství) a palivového proutku, celkový výkon kazety narůstá.

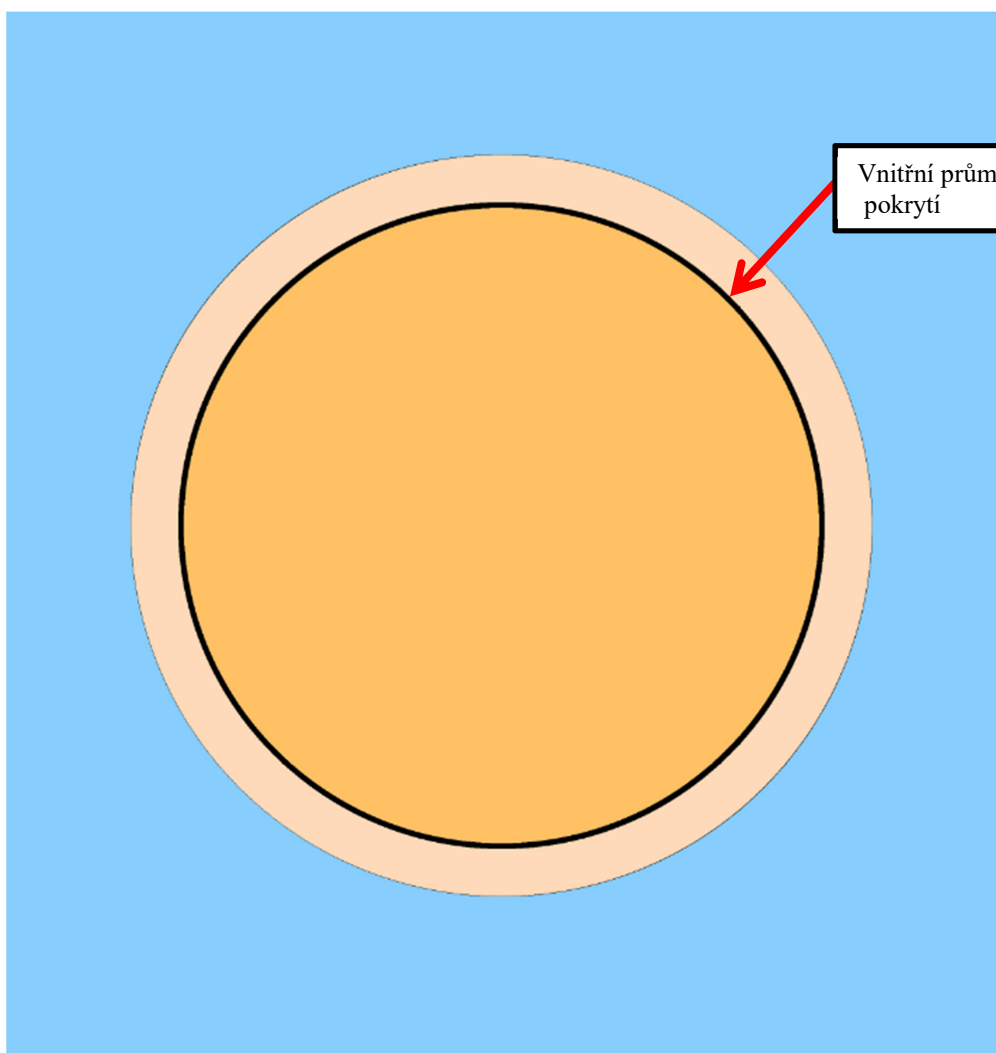
Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v *Tab. 6.1*.

| Provedená změna v: | 9,05 mm | | 9,15 mm | |
|--|---------|-----|---------|-----|
| | Min | Max | Min | Max |
| PP - 77 | -0,3 | 0,2 | -0,2 | 0,2 |
| PP - 88 | -0,3 | 0,2 | -0,2 | 0,3 |
| PP - 100 | -0,2 | 0,2 | -0,2 | 0,2 |
| PP - 108 | -0,2 | 0,2 | -0,2 | 0,3 |
| PP - 110 | -0,2 | 0,2 | -0,2 | 0,3 |
| PP - 119 | -0,2 | 0,2 | -0,2 | 0,2 |
| PP - 124 | -0,2 | 0,2 | -0,2 | 0,2 |
| PP - 126 | -0,2 | 0,2 | -0,2 | 0,2 |
| PP - 127 | -0,2 | 0,2 | -0,3 | 0,2 |
| Skupina PP - 4,20% | -0,2 | 0,2 | -0,2 | 0,2 |
| Skupina PP - 4,40% | -0,3 | 0,4 | -0,3 | 0,3 |
| Skupina PP - 4,4% + Gd ₂ O ₃ | -0,2 | 0,2 | -0,2 | 0,2 |
| Skupina PP - 4,95% | -0,4 | 0,4 | -0,4 | 0,4 |
| Celá kazeta | -0,5 | 0,3 | -0,3 | 0,5 |

Tab. 6.1: Minimální a maximální odchylky výkonu při změně vnějšího průměru pokrytí [%]

6.2 Průměr pokrytí vnitřního průměru

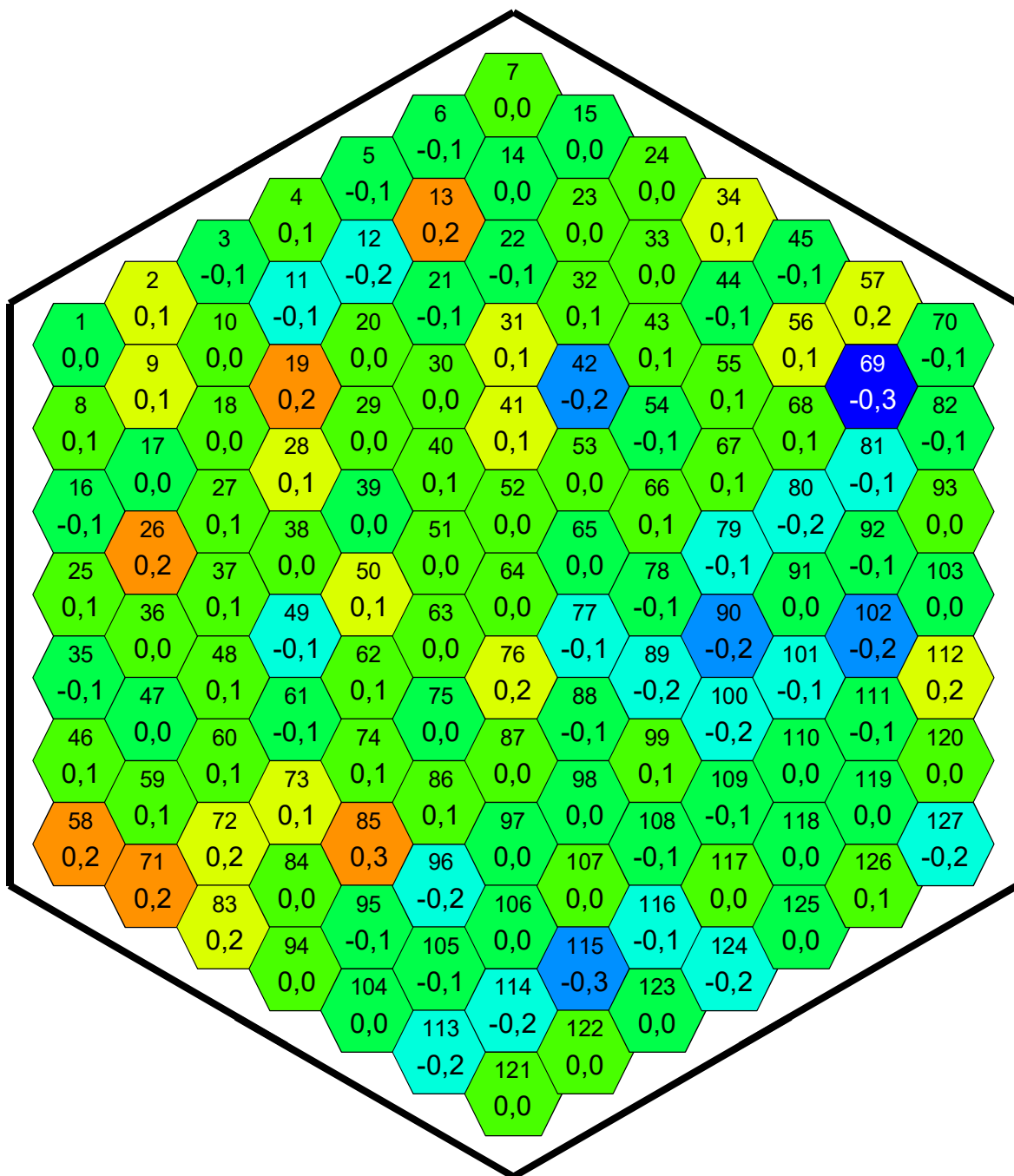
Mezi již zmíněnou stěnou palivového proutku z materiálu E110 a uranovou peletou je prostor o šířce přibližně 0,1 mm, který je vyplněný heliem. Znázornění je možné vidět na *Obr. 6.9*. Cílem tohoto výpočtu bylo zjistit, jakým způsobem bude ovlivněn relativní výkon palivového souboru, pokud se tato mezera změní. Pro všechny proutky je standardní hodnota vnitřního průměru pokrytí palivového proutku 7,93 mm. Tato hodnota byla změněna o 0,03 mm a 0,06 mm.



Obr. 6.9: Průměr pokrytí vnitřního průměru

Největší vliv na rozložení výkonu má změna vnitřního průměru tloušťky pokrytí palivového proutku na hodnotu 7,99 mm. Maximální změna relativního výkonu je patrná u změny pro celou skupinu palivových proutků, ve které jsou pelety obohaceny uranem na 4,4 % s přidáním Gd_2O_3 . Výsledný stav rozložení výkonu při změně v proutku 108 na hodnotu 7,99 mm je znázorněn na *Obr. 6.10*. Výkon je ovlivněn vznikajícími plynnými

štěpnými produkty. Tyto produkty způsobují nárůst přetlaku helia. Výsledné štěpné produkty mají za následek zmenšování mezery palivového proutku vlivem napučání palivové pelety.



Obr. 6.10: Rozložení výkonu při změně vnitřního průměru pokrytí na hodnotu 7,96 mm v palivovém proutku 108

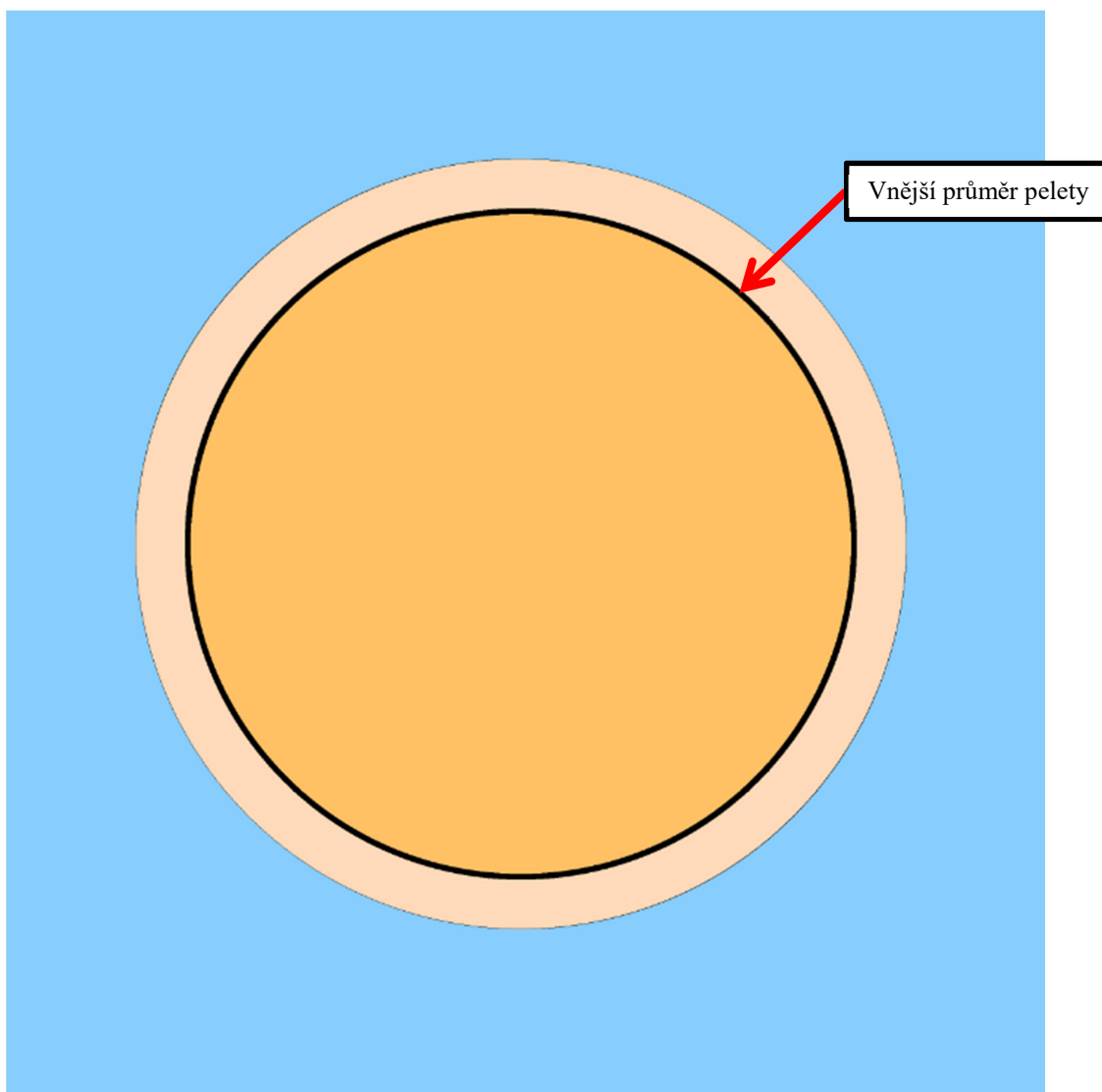
Výsledky všech ostatních nejistot pokrytí vnitřního průměru jsou uvedeny v Tab. 6.2.

| Provedená změna v: | 7,96 mm | | 7,99 mm | |
|--|---------|-----|---------|-----|
| | Min | Max | Min | Max |
| PP - 77 | -0,3 | 0,2 | -0,3 | 0,2 |
| PP - 88 | -0,3 | 0,2 | -0,3 | 0,3 |
| PP - 100 | -0,3 | 0,3 | -0,2 | 0,3 |
| PP - 108 | -0,3 | 0,3 | -0,3 | 0,3 |
| PP - 110 | -0,2 | 0,3 | -0,2 | 0,3 |
| PP - 119 | -0,3 | 0,3 | -0,3 | 0,2 |
| PP - 124 | -0,3 | 0,2 | -0,3 | 0,3 |
| PP - 126 | -0,3 | 0,2 | -0,3 | 0,3 |
| PP - 127 | -0,3 | 0,3 | -0,3 | 0,3 |
| Skupina PP - 4,20% | -0,3 | 0,3 | -0,3 | 0,3 |
| Skupina PP - 4,40% | -0,3 | 0,2 | -0,3 | 0,2 |
| Skupina PP - 4,4% + Gd ₂ O ₃ | -0,3 | 0,3 | -0,4 | 0,4 |
| Skupina PP - 4,95% | -0,3 | 0,2 | -0,3 | 0,4 |
| Celá kazeta | -0,3 | 0,2 | -0,3 | 0,3 |

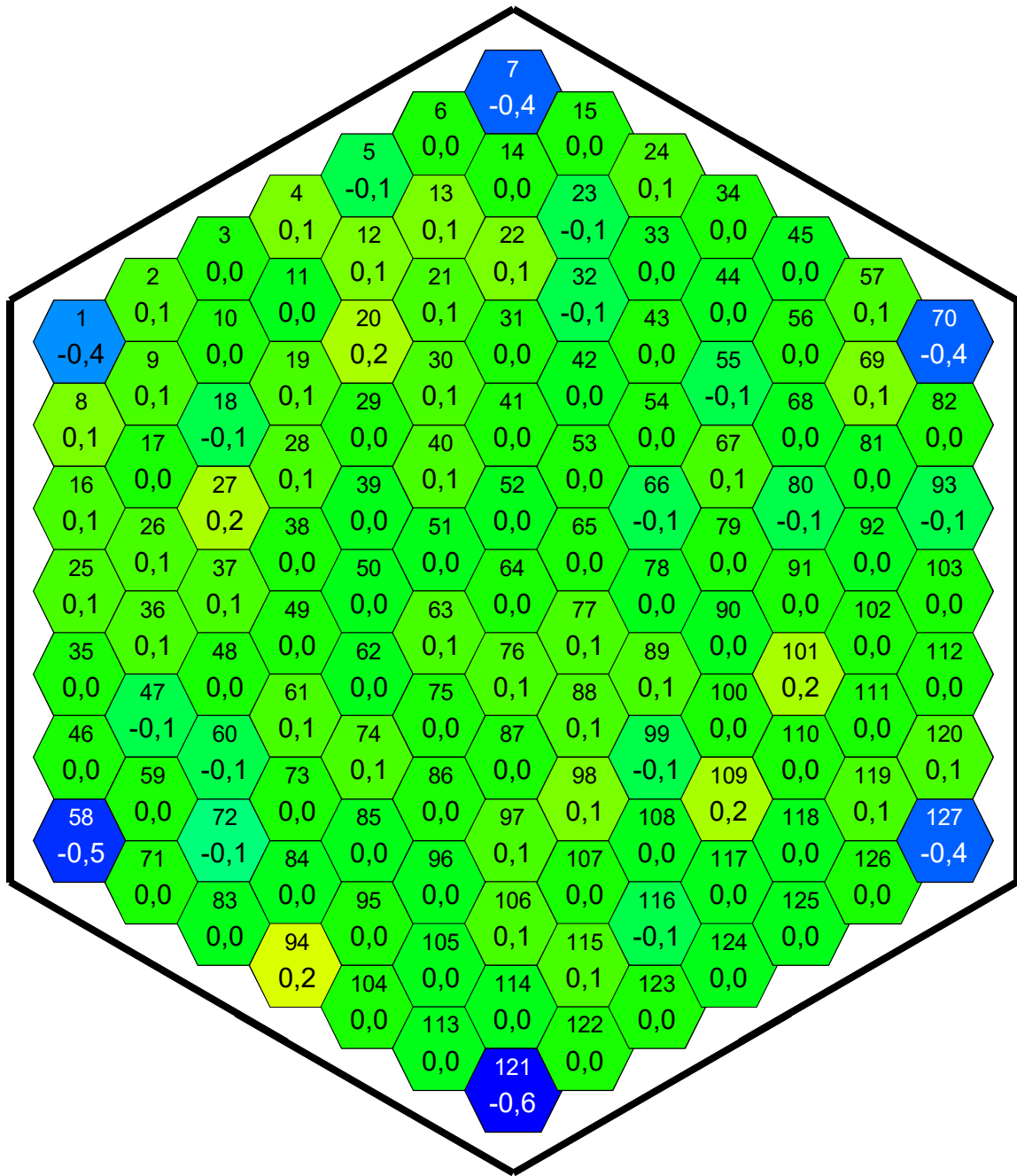
Tab. 6.2: Minimální a maximální odchylky výkonu při změně vnitřního průměru pokrytí [%]

6.3 Vnější průměr pelety

Poslední neurčitostí související se změnou průměru byla změna vnějšího okraje palivové pelety. Průměr uranové pelety je 7,80 mm a její umístění v palivovém proutku je znázorněno na *Obr. 6.11*. Rozložení relativního výkonu v palivové kazetě bylo stanoveno pro hodnotu průměru 7,78 mm. Zkoumané výsledky ukázaly, že při této změně dochází k poklesu výkonu. Největší odchylka poklesu výkonu 0,6 % byla zaznamenána při změně celé skupiny palivových proutků, obsahující pelety obohacené 4,2 % U-235 (*Obr. 6.12*).



Obr. 6.11: Vnější průměr pelety



Obr. 6.12: Rozložení výkonu u změny vnějšího průměru pelet ve skupině palivových proutků s obohacením 4,2 % U-235

Značný pokles relativního výkonu je patrný i u výpočtů pro jednotlivé proutky. Odchylka se pohybuje mezi 0,3 % a 0,5 %. Pokles výkonu je způsoben zmenšením palivové pelety o 0,02 mm. Touto změnou dochází ke snížení objemu pelety a zvětšení

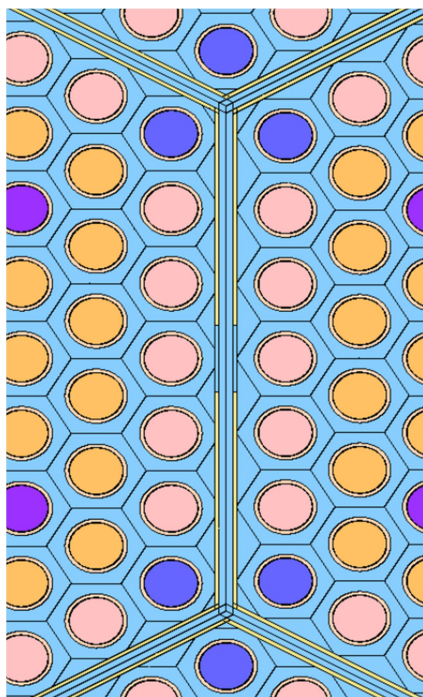
héliové mezery. Mimo jiné se mění vodo-uranový poměr v oblasti úhelníků. Všechny výsledky, související se změnou vnějšího průměru paliva, jsou uvedeny v Tab. 6.3.

| Provedená změna v: | 7,78 mm | |
|--|---------|-----|
| | Min | Max |
| PP - 77 | -0,3 | 0,2 |
| PP - 88 | -0,4 | 0,1 |
| PP - 100 | -0,5 | 0,2 |
| PP - 108 | -0,5 | 0,1 |
| PP - 110 | -0,5 | 0,2 |
| PP - 119 | -0,4 | 0,2 |
| PP - 124 | -0,4 | 0,2 |
| PP - 126 | -0,4 | 0,1 |
| PP - 127 | -0,4 | 0,2 |
| Skupina PP - 4,20% | -0,6 | 0,2 |
| Skupina PP - 4,40% | -0,5 | 0,2 |
| Skupina PP - 4,4% + Gd ₂ O ₃ | -0,4 | 0,3 |
| Skupina PP - 4,95% | -0,3 | 0,4 |
| Celá kazeta | -0,3 | 0,2 |

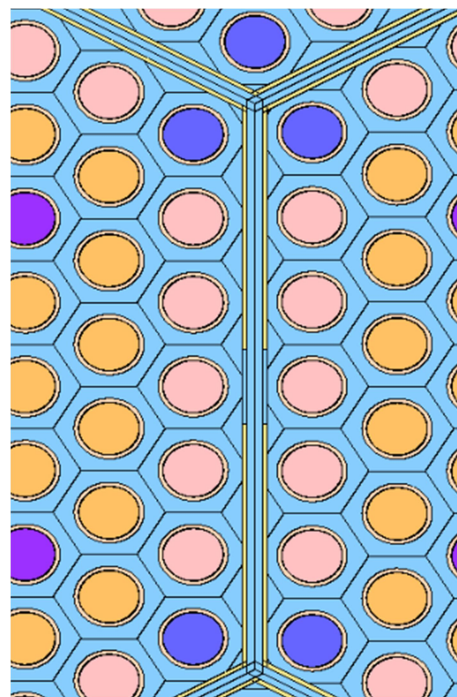
Tab. 6.3: Minimální a maximální odchylky výkonu při změně vnějšího průměru pelety [%]

6.4 Krok mříže palivových proutků

Palivové proutky jsou v palivové kazetě pevně uloženy s určitou konstantní roztečí 12,6 mm. Analýza neurčitosti kroku mříže palivových proutků byla provedena pro změnu kroku -0,12 mm a +0,12 mm. Rozdíl v rozteči mřížek je uvedena na *Obr. 6.13* a *Obr. 6.14*. Rozteč palivových proutků ovlivňuje množství vody v okolí palivového proutku, které má vliv na moderaci celého systému. Optimální hodnota rozteče je závislá na vyhoření paliva a koncentraci kyseliny borité ve vodě.

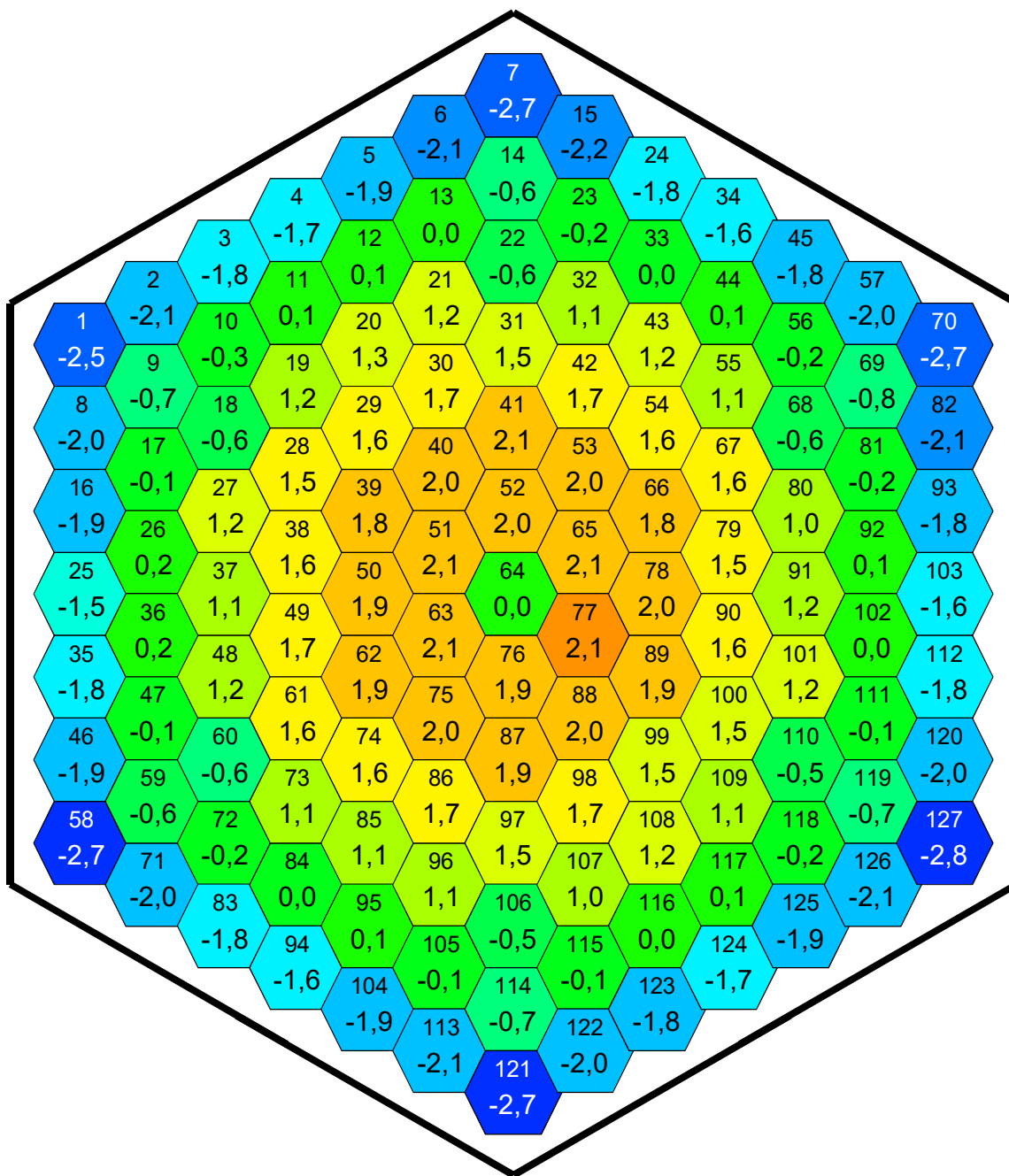


Obr. 6.13: Rozteč 12.48 mm



Obr. 6.14: Rozteč 12.72 mm

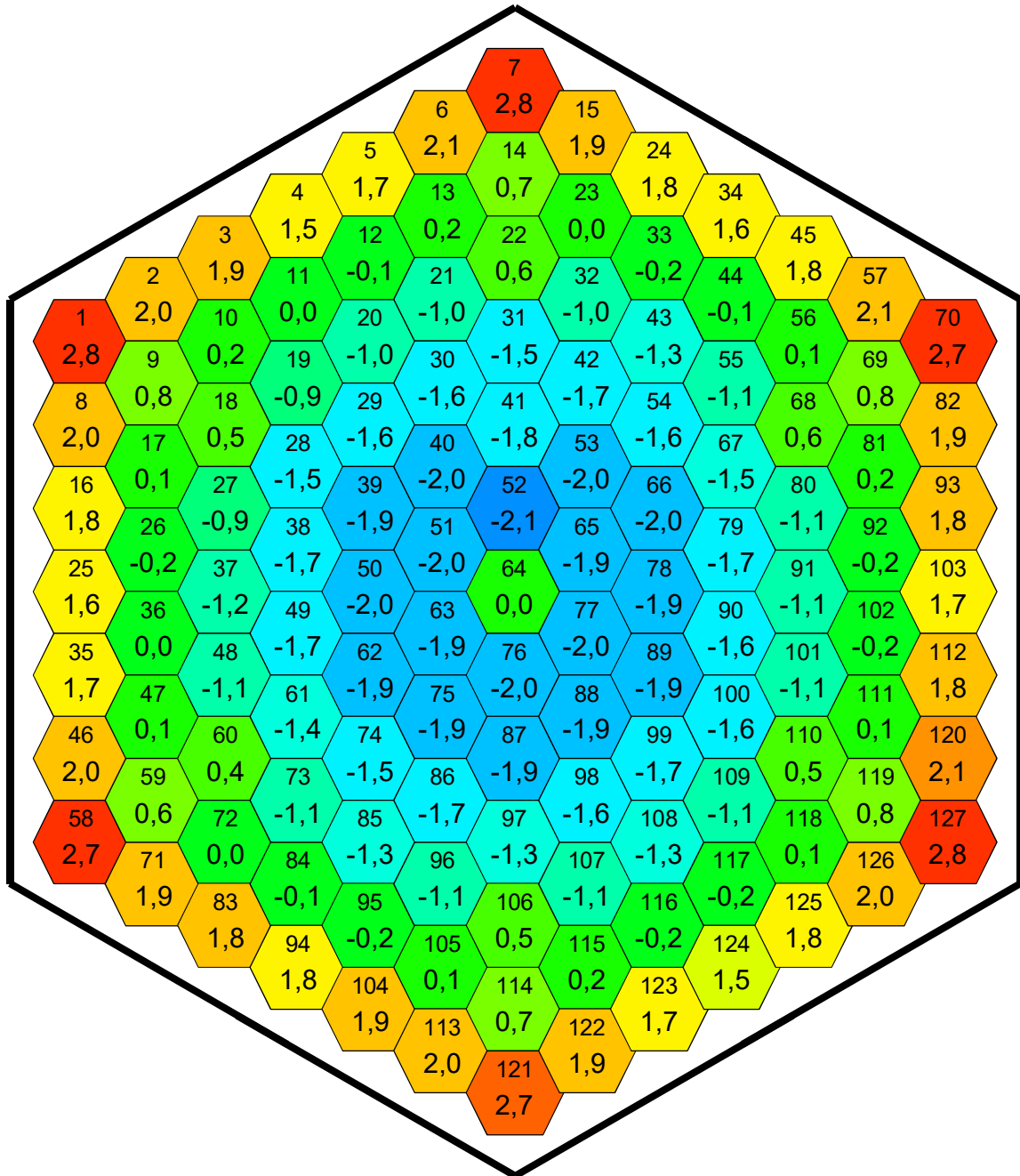
Při změně rozteče na hodnotu 12,72 mm dochází k tomu, že je v okolí palivového proutku větší množství moderátoru. To způsobuje lepší moderaci paliva a rychlejšího spotřebování vyhořívajícího absorbátoru. Lepší moderace vede ke zvýšení výkonu. Na *Obr. 6.15* je vidět snížení výkonu v krajních oblastech, jelikož jsou proutky moc blízko okraje palivové kazety a jsou výrazně podmoderovány. Je patrný postupný přesun výkonu z oblastí periferních palivových proutků, ve kterých dochází k poklesu relativních výkonů až o 2,7 % ve srovnání s referenčními hodnotami, do centrálních palivových proutků s maximálním nárůstem výkonu o 2,1 %.



Obr. 6.15: Rozložení relativního výkonu při změně rozteče o + 0,12 mm

V druhém případě se zmenšila rozteč palivových proutků na hodnotu 12,48 mm. Rozložení relativního výkonu je vykresleno na Obr. 6.16. Díky menší rozteči je ve středu kazety menší prostor pro moderátor. Z toho důvodu je výkon uprostřed kazety menší než referenční a maximální odchylky v těchto místech dosahují 2,1 %. Naopak krajní

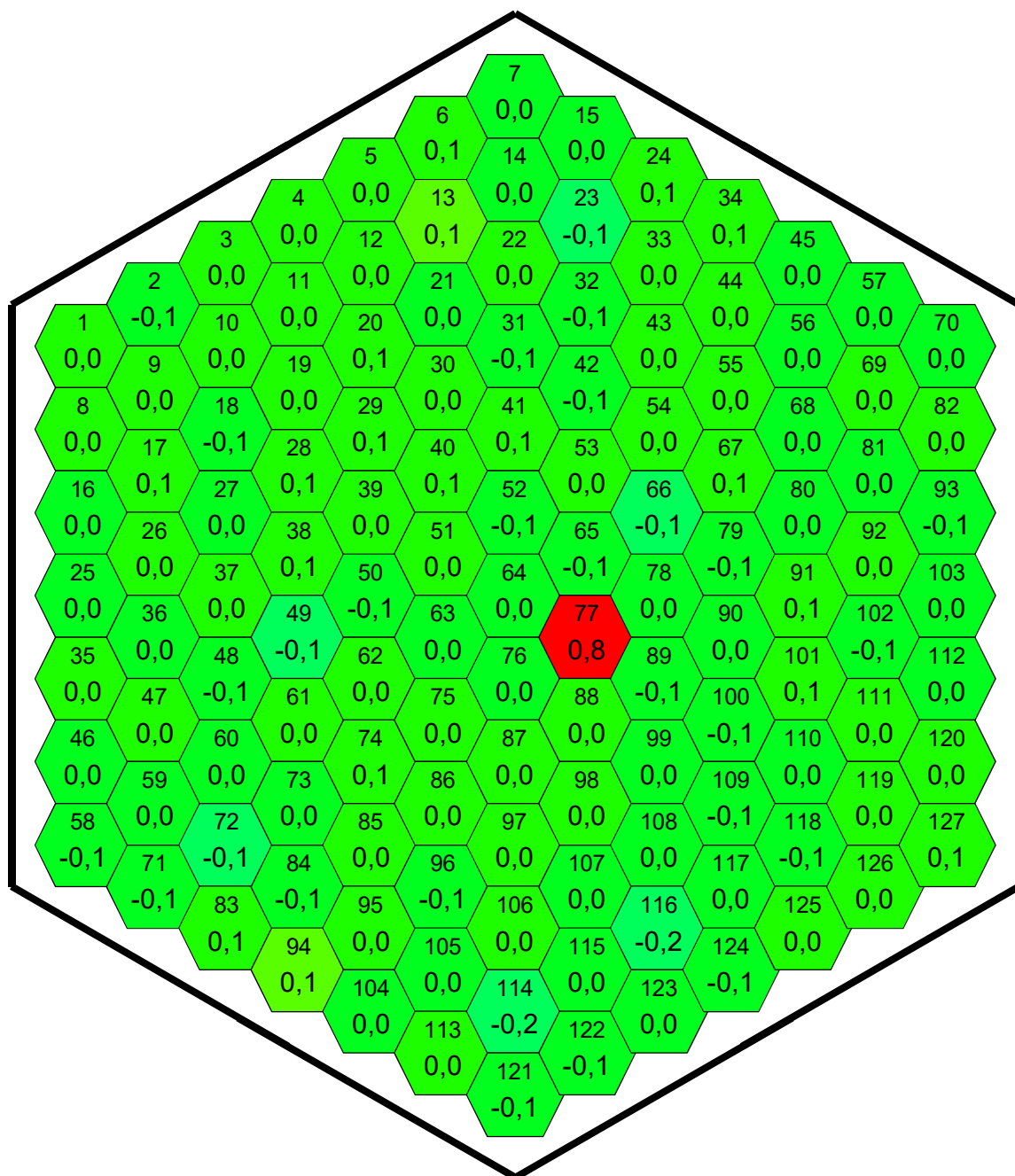
proutky mají v tomto případě na krajích mnohem více prostoru a dochází v nich k nárůstu výkonu až o 2,8 %.



Obr. 6.16: Rozložení relativního výkonu při změně rozteče o - 0,12 mm

6.5 Obohacení paliva

Druhou zkoumanou skupinou jsou změny v palivové uranové peletě. Jako první z této skupiny byl zkoumán vliv změny obohacení v jednotlivých typech palivových proutků. Změna obohacení byla provedena ve všech typech palivových proutků o stejnou odchylku, i když se v palivové kazetě vyskytují proutky s rozdílným procentem obohacení.



Obr. 6.17: Rozložení výkonu při změně obohacení o 0,005 % v palivovém proutku 77

V prvním případě byla odchylka pro změnu obohacení 0,005 %. K největším pozorovaným změnám došlo v případě palivových proutků s původním obohacením 4,4 % s přidaným Gd_2O_3 . V těchto proutcích by došlo i při tak nepatrné změně k nárůstu relativního výkonu o 1 % vzhledem k referenčním hodnotám. I u ostatních typů palivových proutků dochází ke značnému nárůstu výkonů. Nárůst se pohybuje kolem 0,7 % - 0,8 % relativního výkonu. Rozložení výkonu při změně obohacení o 0,005 % v palivovém proutku 77 je možné vidět na *Obr. 6.17*.

Druhá varianta byla spočtena pro snížení obohacení paliva o 0,005 %. Výpočty ukázaly, že v případě poklesu obohacení dochází zároveň i ke snížení relativního výkonu. Stejně jako v předchozím případě, největší pokles 1 % byl zaznamenán u proutků s obohacením 4,4 % s přidaným Gd_2O_3 . Stejný maximální pokles je možné sledovat i u proutků s obohacením 4,2 %. Vypočtené odchylky jsou uvedeny v *Tab. 6.4*.

| Provedená změna v: | +0,005% U-235 | | -0,005% U-235 | |
|-------------------------------|---------------|-----|---------------|-----|
| | Min | Max | Min | Max |
| PP - 77 | -0,2 | 0,8 | -0,7 | 0,2 |
| PP - 88 | -0,2 | 0,7 | -0,7 | 0,2 |
| PP - 100 | -0,1 | 0,8 | -0,8 | 0,2 |
| PP - 108 | -0,2 | 0,7 | -0,8 | 0,2 |
| PP - 110 | -0,1 | 0,9 | -0,9 | 0,2 |
| PP - 119 | -0,1 | 0,6 | -0,7 | 0,2 |
| PP - 124 | -0,2 | 0,7 | -0,9 | 0,2 |
| PP - 126 | -0,2 | 0,7 | -0,9 | 0,2 |
| PP - 127 | -0,2 | 0,8 | -0,9 | 0,2 |
| Skupina PP - 4,20% | -0,2 | 0,8 | -1,0 | 0,2 |
| Skupina PP - 4,40% | -0,4 | 0,7 | -0,7 | 0,4 |
| Skupina PP - 4,4% + Gd_2O_3 | -0,2 | 1,0 | -1,0 | 0,1 |
| Skupina PP - 4,95% | -0,5 | 0,4 | -0,4 | 0,7 |
| Celá kazeta | -0,2 | 0,3 | -0,7 | 0,3 |

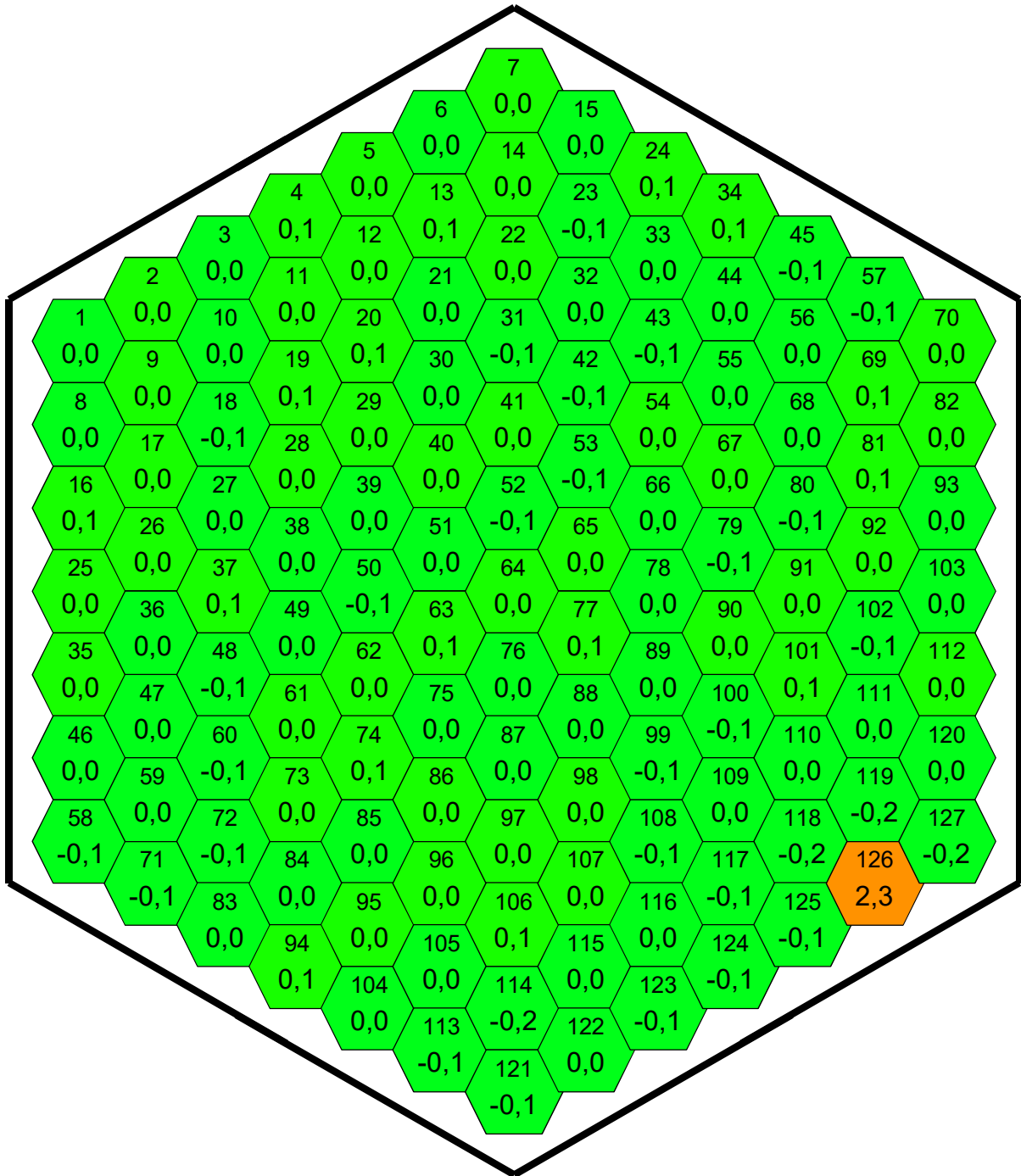
Tab. 6.4: Minimální a maximální odchylky výkonu při změně obohacení paliva [%]

6.6 Hustota paliva

Uranové pelety jsou složeny z atomů kyslíku a izotopů uranu (U-234, U-235 a U-238). V případě palivových tyčí, kde je navíc přidán ještě absorbátor Gd_2O_3 , jsou v peletách ještě izotopy Gd (Gd-154, Gd-155, Gd-156, Gd-157 a Gd-158). Při simulované změně hustoty musel být změněn poměr ve složení paliva. Hustota byla změněna z hodnoty $10,3795 \text{ g/cm}^3$ na hodnotu $10,7 \text{ g/cm}^3$. V *Tab. 6.5* je možné vidět, že hustota má na rozložení výkonu velký vliv, především při změnách u jednotlivých palivových proutků. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány při změně hustoty v palivových proutcích 77, 88, 100, 119, 126 a při změně skupiny s obohacením 4,2 %. Hodnota rozložení výkonu pro změnu hustoty provedenou v těchto zmiňovaných palivových proutcích dosahuje nárůst až o 2,3 % vzhledem k referenčním hodnotám. Rozložení výkonu v palivové kazetě při změně hustoty v proutku 126 je možné vidět na *Obr. 6.18*.

| Provedená změna v: | 10,7 g/cm ³ | |
|--|------------------------|-----|
| | Min | Max |
| PP - 77 | -0,3 | 2,3 |
| PP - 88 | -0,4 | 2,3 |
| PP - 100 | -0,5 | 2,3 |
| PP - 108 | -0,5 | 2,2 |
| PP - 110 | -0,5 | 2,1 |
| PP - 119 | -0,4 | 2,3 |
| PP - 124 | -0,4 | 2,2 |
| PP - 126 | -0,4 | 2,3 |
| PP - 127 | -0,4 | 2,2 |
| Skupina PP - 4,20% | -0,6 | 2,3 |
| Skupina PP - 4,40% | -0,5 | 1,7 |
| Skupina PP - 4,4% + Gd ₂ O ₃ | -0,4 | 2,2 |
| Skupina PP - 4,95% | -0,3 | 1,2 |
| Celá kazeta | -0,3 | 0,6 |

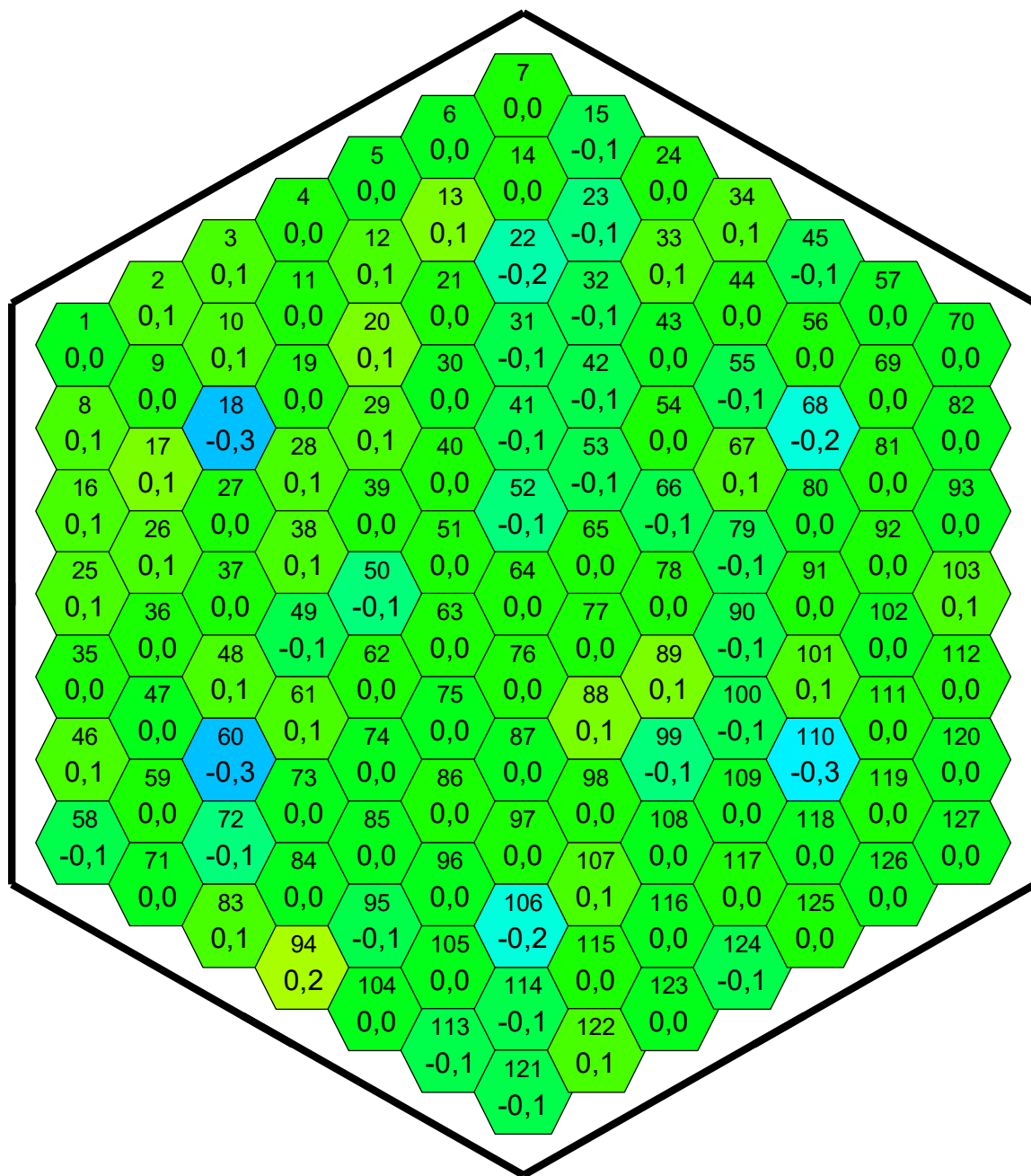
Tab. 6.5: Minimální a maximální odchylky výkonu při změně hustoty paliva [%]



Obr. 6.18: Rozložení výkonu při změně hustoty na $10,7\text{g/cm}^3$ v palivovém proutku 108

6.7 Obsah Gd_2O_3 v palivu

Sloučenina Gd_2O_3 se přidává do palivových pelet k práškovému UO_2 jako blokový absorbátor. Příměsí Gd_2O_3 se mění uranový poměr v tabletce a dochází k poklesu procenta zastoupení uranu. Tato sloučenina se využívá z důvodu vysokého účinného průřezu pro zachytávání tepelných neutronů a je součástí pouze 6 vybraných proutků. Na Obr. 6.4 je možné vidět palivovou kazetu PK-3 s rozmístěním palivových tyčí s příměsí Gd_2O_3 .



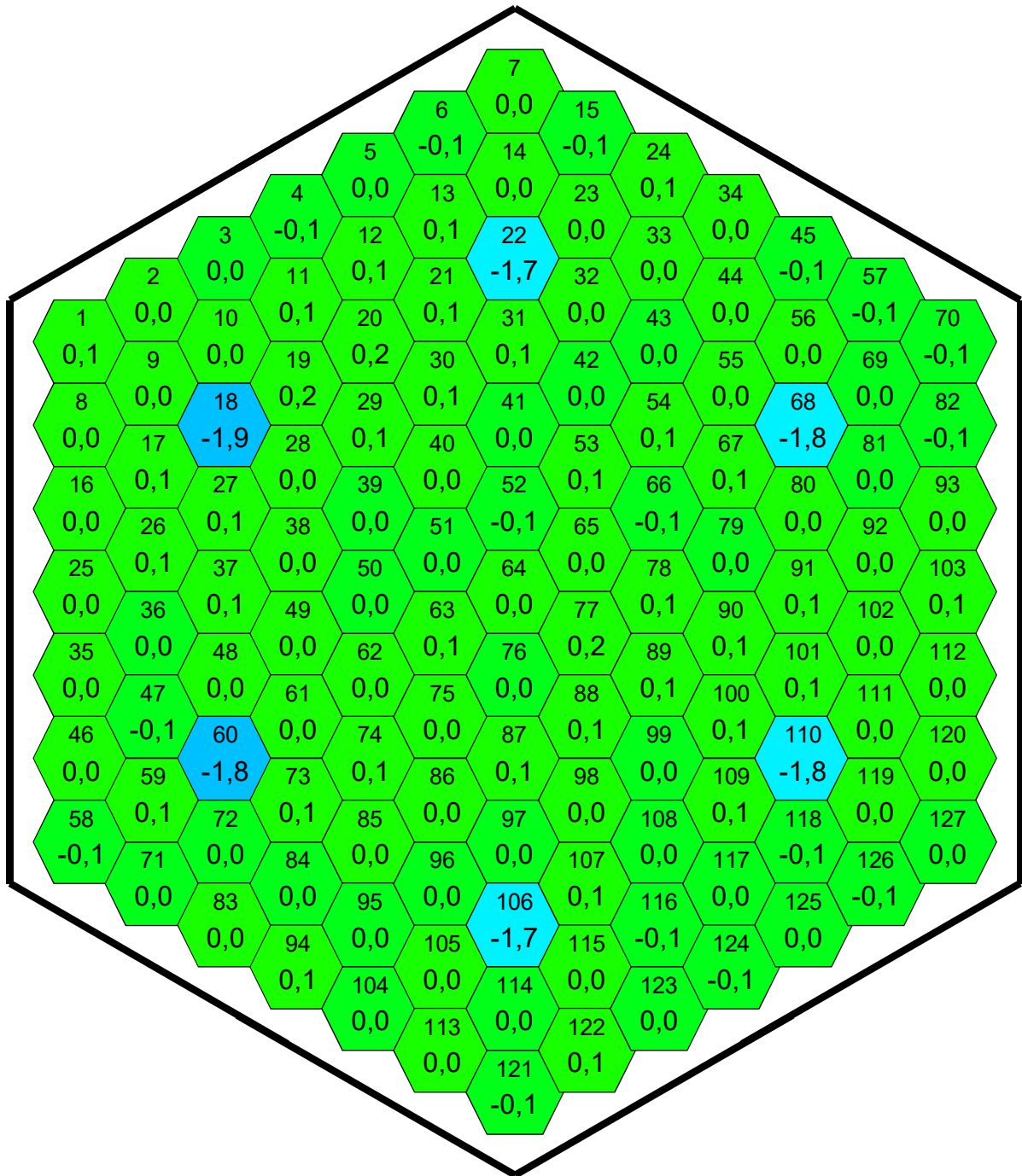
Obr. 6.19: Rozložení výkonu při změně obsahu Gd_2O_3 ve všech palivových proutcích obsahující absorbátor

V případě výpočtů s Gd_2O_3 došlo ke zvýšení množství z 5,0 % na 5,05 %. Výpočty zde byly provedeny pro změnu pouze v jednom proutku a pak následně pro celou skupinu šesti palivových proutků. Výsledné rozložení relativního výkonu je na *Obr. 6.19*. V palivové kazetě dochází k poklesu relativního výkonu vzhledem k referenčním hodnotám v místech, kde došlo ke změně množství absorbátoru. Snížení relativního výkonu je z důvodu změny poměru uran-absorbátor. S navýšením množství absorbátoru došlo ke snížení množství uranu.

6.8 Vliv axiální mezery mezi peletkami

Palivové pelety se vkládají do palivových proutků pomocí vibrací. Teoreticky je možné, že dojde k situaci, kdy pelety nejsou dokonale na sobě, ale vznikne mezi nimi malá mezera. Tento stav je velmi složité simulovat. Pro tento druh analýzy byl vyvinut náhradní model, který má dostačující vypovídající hodnotu z hlediska výsledků rozložení výkonu. Teoretická axiální mezera, která by mohla vzniknout, byla stanovena na hodnotu 2 mm. Určil se objemový poměr mezi tabletkou s přidanou teoretickou mezerou a teoreticky dokonalým palivem bez mezery. Tímto poměrem se upravila hustota paliva, která se pak použila jako substitute pro simulaci vzniklé axiální mezery v palivových proutkách.

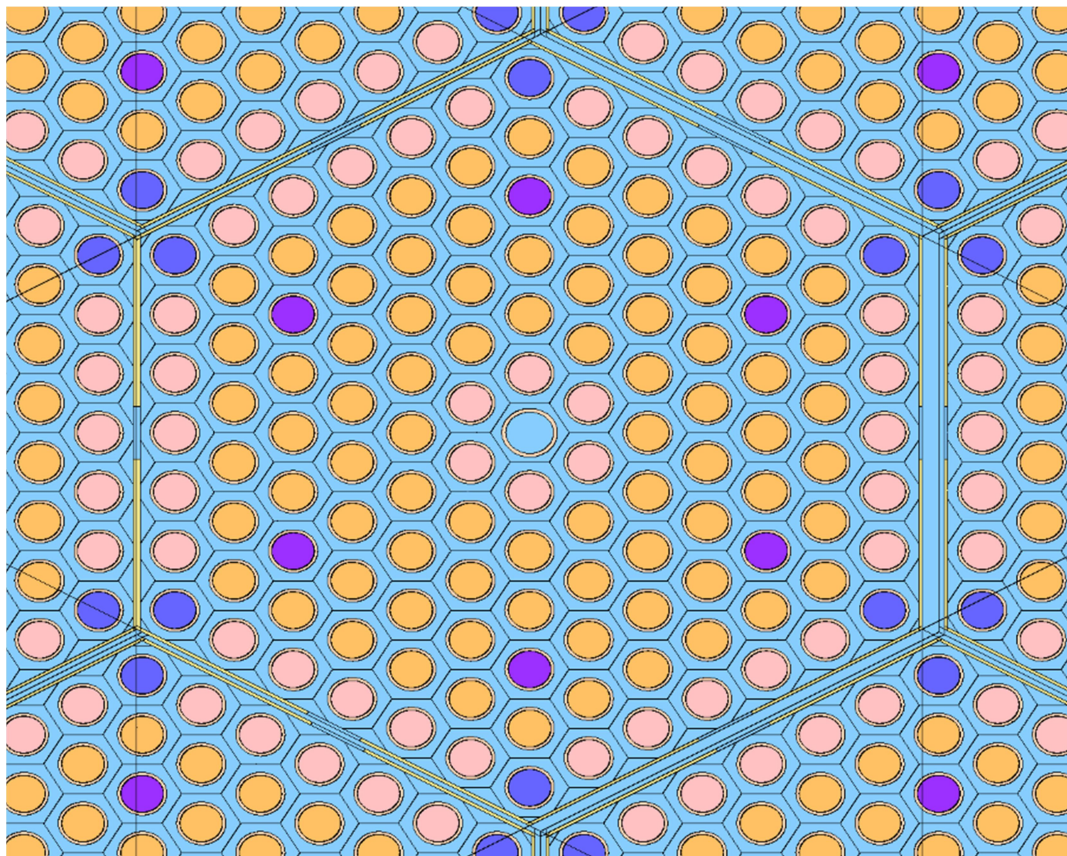
Z výstupních hodnot je vidět maximální pokles relativního výkonu o 1,9 % u proutků s obohacením 4,4 % s přidaným absorbatorem Gd_2O_3 . Rozložení výkonu v celé palivové kazetě je vykresleno na *Obr. 6.20*.



Obr. 6.20: Rozložení výkonu při uvažování axiální mezery velké 2 mm v palivových proutcích s absorbátorem Gd_2O_3

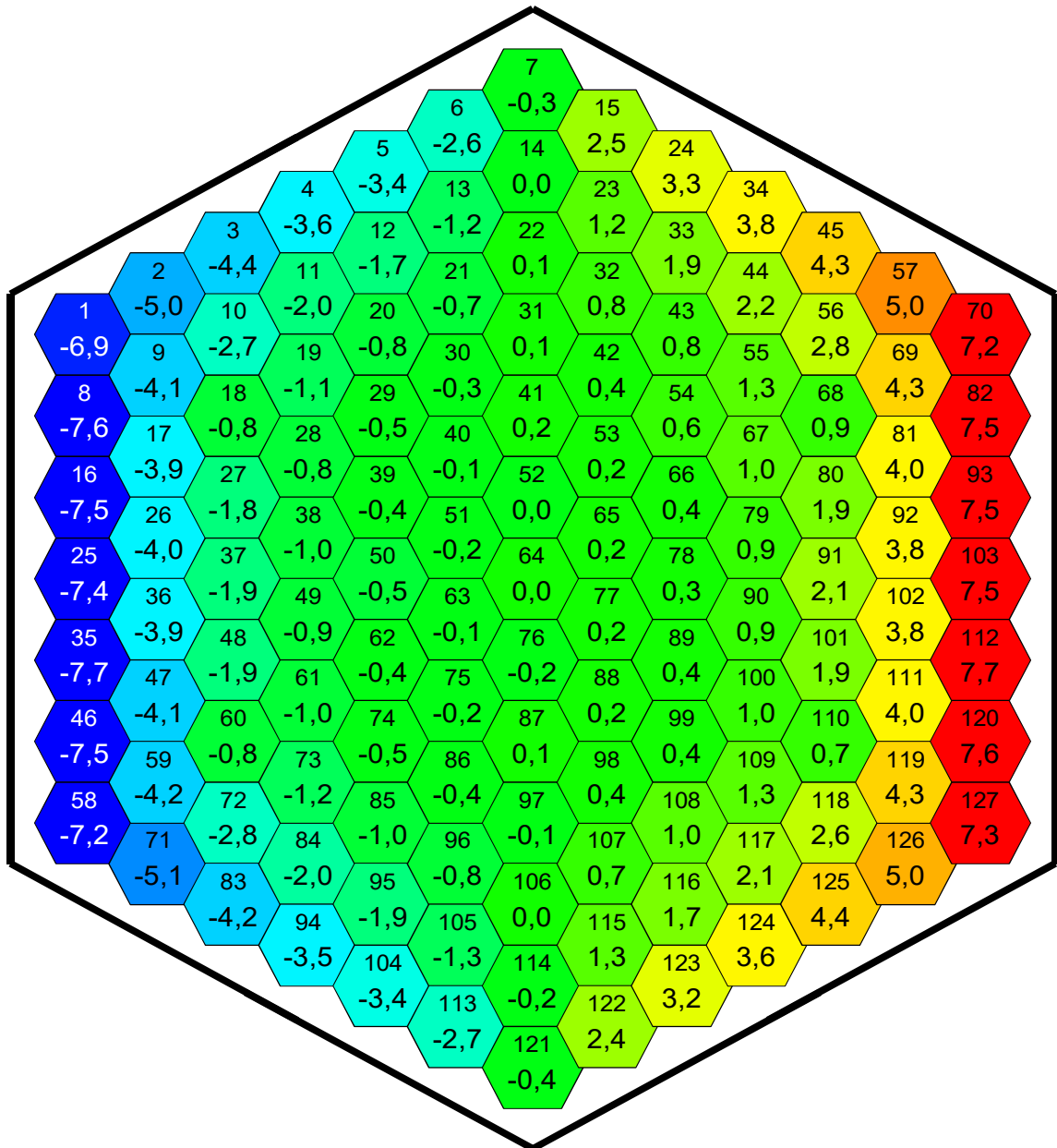
6.9 Změna polohy palivové kazety

Poslední výpočty nejistot byly zaměřeny na změny polohy celé palivové kazety. Na *Obr. 6.21* je znázorněna geometrie vymodelována v Serpentu. Celá kazeta byla posunuta o 2 mm tak, aby se na jedné straně testovací kazeta dotýkala sousední palivové kazety a na druhé vznikla 4 mm mezera.



Obr. 6.21: Názorný model ze Serpentu znázorňující posun kazety

Rozložení výkonu v palivové kazetě je na *Obr. 6.22*. V případě, když by došlo k posunutí celé kazety, dojde k velké změně relativního výkonu ve zkoumaných oblastech. V případě dotyku dvou palivových kazet dojde ke snížení možnosti moderace paliva. To má za následek, že výkon v těchto místech výrazně klesne, a to až o 7,7 % vzhledem k referenčním hodnotám. Opačně na druhé straně kazety, kde vznikne větší prostor, je moderace větší a tím roste výkon až o 7,7 %. K takovýmto velkým odchylkám dochází pouze v periferních oblastech, které jsou v bezprostřední blízkosti simulované změny. Ve středu palivové kazety je relativní výkon téměř beze změny.



Obr. 6.22: Rozložení výkonu při posunutí celé palivové kazety PK-3 o 2 mm

7 Shrnutí výpočtů

Výpočet všech 131 modelových výpočtů bylo provedeno s 1 000 000 neutronů/cyklus v 6600 iteracích. Počet neaktivní generace neutronů byl zvolen 60. Jednotlivé vlivy mechanických nejistot jsou rozepsány v předchozí kapitole 6. Kompletní přehled výsledků je uveden v Tab. 7.1. Jsou zde vypsané veškeré limitní hodnoty pro simulovanou změnu v palivovém proutku, skupině proutků nebo celé kazetě.

| Provedená změna v: | | | PP | | | | | | | | | PS | | | | PK |
|----------------------------------|------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|------|--------|
| | | | 77 | 88 | 100 | 108 | 110 | 119 | 124 | 126 | 127 | 4,2 | 4,4 | 4,4+Gd2O3 | 4,95 | Kazeta |
| Průměr pokrytí vnější průměr | 9,05 mm | Min | -0,3 | -0,3 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,4 | -0,5 |
| | | Max | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,3 |
| | 9,15 mm | Min | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,3 | -0,2 | -0,3 | -0,2 | -0,4 | -0,3 |
| | | Max | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,5 |
| Průměr pokrytí vnitřní průměr | 7,96 mm | Min | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,2 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 |
| | | Max | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| | 7,99 mm | Min | -0,3 | -0,3 | -0,2 | -0,3 | -0,2 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,4 | -0,3 | -0,3 |
| | | Max | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,3 |
| Vnější průměr pelety | 7,78 mm | Min | -0,3 | -0,4 | -0,5 | -0,5 | -0,5 | -0,4 | -0,4 | -0,4 | -0,4 | -0,6 | -0,5 | -0,4 | -0,3 | -0,3 |
| | | Max | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,2 |
| Rozteč palivových proutků | 12,48 mm | Min | | | | | | | | | | -2,1 | | | | |
| | | Max | | | | | | | | | | 2,8 | | | | |
| | 12,72 mm | Min | | | | | | | | | | -2,8 | | | | |
| | | Max | | | | | | | | | | 2,1 | | | | |
| Obohacení paliva | 0,005% | Min | -0,2 | -0,2 | -0,1 | -0,2 | -0,1 | -0,1 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,4 | -0,2 | -0,5 | -0,2 |
| | | Max | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,9 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 1,0 | 0,4 | 0,3 |
| | -0,005% | Min | -0,7 | -0,7 | -0,8 | -0,8 | -0,9 | -0,7 | -0,9 | -0,9 | -0,9 | -1,0 | -0,7 | -1,0 | -0,4 | -0,7 |
| | | Max | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,1 | 0,7 | 0,3 |
| Hustota | 10,7 g/cm ³ | Min | -0,3 | -0,4 | -0,5 | -0,5 | -0,5 | -0,4 | -0,4 | -0,4 | -0,4 | -0,6 | -0,5 | -0,4 | -0,3 | -0,3 |
| | | Max | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,2 | 2,1 | 2,3 | 2,2 | 2,3 | 2,2 | 2,3 | 1,7 | 2,2 | 1,2 | 0,6 |
| Obsah Gd | Gd2O3 | Min | | | | | | | | | | -0,2 | | | | |
| | | Max | | | | | | | | | | 0,2 | | | | |
| Axiální mezera | 2 mm | Min | -1,5 | -1,5 | -1,7 | -1,7 | -1,7 | -1,6 | -1,7 | -1,7 | -1,6 | -1,6 | -1,3 | -1,9 | -1,0 | -0,9 |
| | | Max | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,7 | 0,2 | 1,4 | 0,5 |
| Posun kazety | 2 mm | Min | | | | | | | | | | -7,7 | | | | |
| | | Max | | | | | | | | | | 7,7 | | | | |

Tab.7.1: Přehled vypočítaných minim a maxim rozložení výkonu v PK-3

Z těchto výpočtů lze získat ucelený přehled o chování palivové kazety PK-3 při vložení do aktivní zóny. Na první pohled je vidět, že i nepatrná změna v geometrii nebo palivovém složení má velký vliv na celkové rozložení v palivové kazetě.

Na Obr. 6.10 je možné pozorovat statistickou chybu metody Monte Carlo. Celkové rozložení výkonu v palivové kazetě PK-3 při změně pokrytí vnitřního průměru palivového proutku se mění pouze minimálně. Pro naprosto přesné výsledky by bylo potřeba zvýšit počet historií neutronů o několik řádů. Z hlediska výpočtu je to časově velmi náročné. Cílem této práce bylo však stanovit největší vlivy geometrických faktorů. Je patrné, že průměr pokrytí vnitřního průměru palivového proutku má téměř zanedbatelný vliv a není potřeba se tím v budoucnu detailně zabývat.

Výsledné hodnoty ukazují, že největší vliv na změnu výkonu má posun palivové kazety v aktivní zóně, kde dochází ke změně až 7,7 %. Na základě tohoto rozboru vznikla dodatečná analýza, která je věnována pouze posunu palivové kazety. Druhý významný vliv má změna rozteče palivových proučků v palivovém souboru, kde se výkon mění až o 2,8 %. V případě ostatních faktorů nejsou změny výkonu zanedbatelné, ale nedosahují takových hodnot jako v předchozích dvou zmiňovaných případech.

Závěr

Předkládaná diplomová práce se zabývá provedením citlivostní analýzy geometrických faktorů na rozložení výkonu v palivovém souboru PK-3, který by měl být použit v jaderném reaktoru VVER-440 v Dukovanech.

První teoretická část poskytuje informace k objasnění výše uvedené problematiky. Je zde popsán jaderný reaktor a jeho aktivní zóna. Následuje stručný úvod do reaktorové fyziky, aby čtenář získal základní vědomosti související s tímto problémem. Z tohoto důvodu jsou vysvětleny neutronové interakce, štěpná řetězová reakce a multiplikační faktor s kritickými podmínkami. Další kapitola je věnována štěpné reakci z hlediska zisku a využitelnosti energie, vývinu tepla a činiteli rozložení výkonu. Na tuto kapitolu navazuje stručná charakteristika inženýrských faktorů, jejichž mechanická složka je předmětem analýzy této diplomové práce.

Jedním z úkolů diplomové práce bylo seznámit se s výpočetním kódem Serpent. Tím se zabývá poslední kapitola teoretické části. Zároveň se zabývá statistickou metodou výpočtu Monte Carlo. Jsou zde popsány jednotlivé příkazy kódu Serpent, jež byly aplikovány při modelování geometrie testované aktivní zóny a definicích materiálů či parametrů potřebných při výpočtech. Všechny tyto příkazy byly použity pro výpočet 131 modelů (viz praktická část diplomové práce).

Výsledky modelů jsou diskutovány v posledních kapitolách diplomové práce. Jsou zde uvedeny tabulky výsledných limitních hodnot. Pro každý geometrický faktor byl vybrán a vykreslen model rozložení výkonu v palivové kazetě PK-3, na kterém je demonstrována daná neurčitost.

Veškeré výstupy, jež byly v souvislosti s diplomovou prací získány, dávají přesný přehled o tom, jak se bude chovat kazeta PK-3 při možných odchylkách geometrických faktorů. Jedná se o první výpočty tohoto typu. Následně budou výsledky předány firmě Škoda JS a. s., pro kterou byla diplomová práce vypracována. Výsledky budou sloužit jako podklad pro metodiku ohledně geometrických faktorů a také k dalším analýzám.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HEZOUČKÝ, František, ŠTECH, Svatobor. *Základy teorie normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními reaktory*. 1. Vyd. ZČU 2014
- [2] ZEMAN, Jaroslav. *Reaktorová fyzika 1*. Praha: ČVUT Praha, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 1989. ISBN 80-01-01933-0
- [3] JEVREMOVIC, Tanja. *Nuclear Principles in Engineering*. 2005 ISBN 0-387-23284-2.
- [4] BURKET, Daneš. *Palivové vsázky se zdokonaleným palivem na jaderné elektrárně Dukovany*. Dukovany, 2003. Dizertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Karel Matějka, Csc.
- [5] LEWIS, Elmer E. *Fundamentals of nuclear reactor physics*. 2008. ISBN 0080560431
- [6] ŠKODA – ZÁVOD ENERGETICKÉ STROJÍRENSTVÍ, *Dispozice betonové šachty reaktoru: technická dokumentace*. Centrální archiv EDU, 1987. AE 130 38P
- [7] ZDEBOR, Jan. 4.1.3. *Vnitřní Části* [prezentace]. 2014. [cit. 2021-05-01]
- [8] ZDEBOR, Jan. 4. *Hlavní technologické celky jaderné elektrárny* [prezentace]. 2014. [cit. 2021-05-01]
- [9] ZDEBOR, Jan. 4.1.4. *Palivové články*, 4.1.5. *Řídící tyče* [prezentace]. 2014. [cit. 2021-05-01]
- [10] SMOLA, Luděk. *Rozložení výkonu a teplot v palivových souborech reaktoru VVER-440 na elektrárně Dukovany*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně
- [11] SPRINZL, Daniel, ŠTECH Svatobor. *Metodika odvození inženýrských faktorů a tvorba limitů ETE*. 2015
- [12] SPRINZL, Daniel. *Inženýrské faktory a limity výkonového rozložení v AZ ETE s LTA WSE*. 2018
- [13] Vývin tepla [online]. Dostupné z: http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/2014-ZS_1-vyvin-tepla.pdf [Cit. 20.2.2021]
- [14] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. *Neutronics. A Nuclear Energy Division Monograph*. CEA Saclay and Groupe Moniteur, Paris 2015. ISBN 978-2-281-11372-3
- [15] REUSS, Paul. *Neutron physics*. EDP Sciences, 2008. ISBN 978-2-7598-0041-4

- [16] Štěpení [online] dostupné z:
<https://www.physics.muni.cz/~blazkova/dp/Stepeni.htm> [cit. 14.2.2021]
- [17] R. LAMARSH, Jhon. *Introduction to nuclear engineering 2nd edition*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1983. ISBN 0-201-14200-7
- [18] Serpent – A Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code [online] dostupné z: <http://montecarlo.vtt.fi/> [cit. 16.2.2021]
- [19] DŘÍMAL, Jiří, TRUNEC, David. *Úvod do metody Monte Carlo*. Přírodovědná fakulta UJEP, katedra fyzikální elektroniky, BRNO 1988
- [20] HRACH, Rudolf. *Počítačová fyzika I*. UJEP, Fakulta pedagogická, 2003
- [21] Simulační metody typu Monte Carlo [online] dostupné z:
http://fast10.vsb.cz/krejsa/studium/sbs_tema03.pdf [cit. 5.5.2021]
- [22] LÄPPENEN, J. *Serpent – a Continuous energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code*, VIT Research Centre of Finland, Helsinky, 2015
- [23] Atomové jádro a jaderné reakce [online] dostupné z: <https://www.gymkren.cz/wp-content/uploads/UO29.-Atomové-jádro-a-jaderné-reakce.pdf> [cit. 8.5.2021]
- [24] KLOBOUČEK, Jan. *Jaderná energetika*. Liberec: Technická universita v Liberci, Fakulta strojní, 2005
- [25] VIMPEL, J., MIKOLÁŠ, P., SPRINZL, D. *'FULL-CORE' VVER-440 RK3+ BENCHMARK PROPOSAL*. Škoda JS a. s., 2019