3D model neutronového toku v reaktorech s šestihrannými kazetami ("Hex-Z")

Milan Hanuš,

Tomáš Berka, Marek Brandner, Roman Kužel, Aleš Matas

Katedra matematiky
Fakulta aplikovaných věd
Západočeská univerzita v Plzni

PANM 14

Dolní Maxov

1. - 6. 6. 2008

Přehled

- Motivace
- Matematický model
- Numerický model
- Algoritmus
- Výsledky a srovnání
- Závěr

Přehled

- Motivace
- Matematický model
- Numerický model
- Algoritmus
- Výsledky a srovnání
- Závěr

Význam neutronového toku

- Činnost jaderného reaktoru je určena rozložením neutronů (**neutronovým tokem**) v aktivní zóně (AZ)

Význam neutronového toku

- Činnost jaderného reaktoru je určena rozložením neutronů (**neutronovým tokem**) v aktivní zóně (AZ)
- Neutronový tok je dán konfigurací AZ

Význam neutronového toku

- Činnost jaderného reaktoru je určena rozložením neutronů (**neutronovým tokem**) v aktivní zóně (AZ)
- Neutronový tok je dán konfigurací AZ
- Složení AZ je nutné plánovat s ohledem na mnohá technická, ekonomická a bezpečnostní omezení

Význam neutronového toku

- Činnost jaderného reaktoru je určena rozložením neutronů (**neutronovým tokem**) v aktivní zóně (AZ)
- Neutronový tok je dán konfigurací AZ
- Složení AZ je nutné plánovat s ohledem na mnohá technická, ekonomická a bezpečnostní omezení

$\Rightarrow$ Velké množství návrhů, pro stanovení vhodnosti každého z nich je třeba vypočítat generovaný neutronový tok

Význam neutronového toku

- Činnost jaderného reaktoru je určena rozložením neutronů (**neutronovým tokem**) v aktivní zóně (AZ)
- Neutronový tok je dán konfigurací AZ
- Složení AZ je nutné plánovat s ohledem na mnohá technická, ekonomická a bezpečnostní omezení

$\Rightarrow$ Velké množství návrhů, pro stanovení vhodnosti každého z nich je třeba vypočítat generovaný neutronový tok $\Rightarrow$ výpočet musí být **přesný** a **rychlý**

Přehled

- Motivace
- **Matematický model**
- Numerický model
- Algoritmus
- Výsledky a srovnání
- Závěr

Přehled aproximací transportní teorie

Rovnice transportu neutronů

⇓

Stacionární rozložení

⇓

Difúzní model

⇓

Energetické kontinuum $\mapsto$ diskrétní energetické grupy

Integro-diferenciální rovnice popisující neznámou hustotu

neutronového toku:

$$\phi = \phi(\mathbf{r}, E, \mathbf{\Omega}, t)$$

Přehled aproximací transportní teorie

Rovnice transportu neutronů

$\Downarrow$

Stacionární rozložení

$\Downarrow$

Difúzní model

$\Downarrow$

Energetické kontinuum $\mapsto$ diskrétní energetické grupy

Integrální rovnice popisující neznámou hustotu

neutronového toku:

$$\phi = \phi(\mathbf{r}, E, \mathbf{\Omega}, \cancel{t})$$

Přehled aproximací transportní teorie

Rovnice transportu neutronů

$\Downarrow$

Stacionární rozložení

$\Downarrow$

Difúzní model

$\Downarrow$

Energetické kontinuum $\mapsto$ diskrétní energetické grupy

Integrální rovnice popisující neznámou hustotu

neutronového toku:

$$\phi = \phi(\mathbf{r}, E, \cancel{\mathbf{\Omega}}, \cancel{t})$$

neutronového proudu:

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}, E) = \int_{\mathbf{\Omega}} \mathbf{\Omega}\phi \,\mathrm{d}\mathbf{\Omega}$$

Přehled aproximací transportní teorie

Rovnice transportu neutronů

$\Downarrow$

Stacionární rozložení

$\Downarrow$

Difúzní model

$\Downarrow$

Energetické kontinuum $\mapsto$ diskrétní energetické grupy

Soustava integrálních rovnic popisujících neznámou hustotu

neutronového toku:

$$\phi^g = \phi^g(\mathbf{r}, \cancel{E}, \cancel{\boldsymbol{\Omega}}, \cancel{t})$$

neutronového proudu:

$$\mathbf{j}^g(\mathbf{r}, \cancel{E}) = \int_{\boldsymbol{\Omega}} \boldsymbol{\Omega} \phi^g \, \mathrm{d}\boldsymbol{\Omega}$$

Dvougrupová difúzní aproximace

Lokálně konzervativní tvar neutronové bilance ($\mathbf{r} = (x, y, z)$, $g = 1, 2$)

$$\nabla \cdot \mathbf{j}^g(\mathbf{r}) + \Sigma_r^g(\mathbf{r})\phi^g(\mathbf{r}) \qquad \sum_{\substack{g'=1 \\ g' \neq g}}^{2} \Sigma_s^{g' \to g}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r}) + \chi^g \sum_{g'=1}^{2} \nu\Sigma_f^{g'}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{j}^g(\mathbf{r}) = -D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}); \quad \gamma^g\phi^g(\mathbf{r}) + D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r}) = 0 \text{ pro } \mathbf{r} \in \partial\mathcal{C}$$

- Bilanční členy: difúze, absorpce, rozptyl, produkce díky štěpení
- Fickův zákon (konstitutivní vztah)

Dvougrupová difúzní aproximace

Lokálně konzervativní tvar neutronové bilance ($\mathbf{r} = (x, y, z)$, $g = 1, 2$)

$$\nabla \cdot \mathbf{j}^g(\mathbf{r}) + \Sigma_r^g(\mathbf{r})\phi^g(\mathbf{r}) \qquad \sum_{\substack{g'=1 \\ g'\neq g}}^{2} \Sigma_s^{g'\to g}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r}) + \chi^g \sum_{g'=1}^{2} \nu\Sigma_f^{g'}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{j}^g(\mathbf{r}) = -D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}); \quad \gamma^g\phi^g(\mathbf{r}) + D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r}) = 0 \text{ pro } \mathbf{r} \in \partial\mathcal{C}$$

- Bilanční členy: difúze, absorpce, rozptyl, produkce díky štěpení
- Fickův zákon (konstitutivní vztah)

Dvougrupová difúzní aproximace

Lokálně konzervativní tvar neutronové bilance ($\mathbf{r} = (x, y, z)$, $g = 1, 2$)

$$\nabla \cdot \mathbf{j}^g(\mathbf{r}) + \Sigma_r^g(\mathbf{r})\phi^g(\mathbf{r}) \qquad \sum_{\substack{g'=1 \\ g' \neq g}}^{2} \Sigma_s^{g' \to g}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r}) + \chi^g \sum_{g'=1}^{2} \nu\Sigma_f^{g'}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{j}^g(\mathbf{r}) = -D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}); \quad \gamma^g\phi^g(\mathbf{r}) + D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r}) = 0 \text{ pro } \mathbf{r} \in \partial\mathcal{C}$$

- Bilanční členy: difúze, absorpce, rozptyl, produkce díky štěpení
- Fickův zákon (konstitutivní vztah)

Dvougrupová difúzní aproximace

Lokálně konzervativní tvar neutronové bilance ($\mathbf{r} = (x, y, z)$, $g = 1, 2$)

$$\nabla \cdot \mathbf{j}^g(\mathbf{r}) + \Sigma_r^g(\mathbf{r})\phi^g(\mathbf{r}) \qquad \sum_{\substack{g'=1 \\ g'\neq g}}^{2} \Sigma_s^{g'\to g}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r}) + \chi^g \sum_{g'=1}^{2} \nu\Sigma_f^{g'}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{j}^g(\mathbf{r}) = -D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}); \quad \gamma^g\phi^g(\mathbf{r}) + D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r}) = 0 \text{ pro } \mathbf{r} \in \partial\mathcal{C}$$

- Bilanční členy: difúze, absorpce, rozptyl, produkce díky štěpení
- Fickův zákon (konstitutivní vztah)

Dvougrupová difúzní aproximace

Lokálně konzervativní tvar neutronové bilance ($\mathbf{r} = (x, y, z)$, $g = 1, 2$)

$$\nabla \cdot \mathbf{j}^g(\mathbf{r}) + \Sigma_r^g(\mathbf{r})\phi^g(\mathbf{r}) \qquad \sum_{\substack{g'=1 \\ g' \neq g}}^{2} \Sigma_s^{g' \to g}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r}) + \chi^g \sum_{g'=1}^{2} \nu\Sigma_f^{g'}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{j}^g(\mathbf{r}) = -D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}); \quad \gamma^g\phi^g(\mathbf{r}) + D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r}) = 0 \text{ pro } \mathbf{r} \in \partial\mathcal{C}$$

- Bilanční členy: difúze, absorpce, rozptyl, produkce díky štěpení
- Fickův zákon (konstitutivní vztah)

Dvougrupová difúzní aproximace

Lokálně konzervativní tvar neutronové bilance ($\mathbf{r} = (x, y, z)$, $g = 1, 2$)

$$\nabla \cdot \mathbf{j}^g(\mathbf{r}) + \Sigma_r^g(\mathbf{r})\phi^g(\mathbf{r}) \qquad \sum_{\substack{g'=1 \\ g' \neq g}}^{2} \Sigma_s^{g' \to g}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r}) + \chi^g \sum_{g'=1}^{2} \nu\Sigma_f^{g'}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{j}^g(\mathbf{r}) = -D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}); \quad \gamma^g\phi^g(\mathbf{r}) + D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r}) = 0 \text{ pro } \mathbf{r} \in \partial\mathcal{C}$$

- Bilanční členy: difúze, absorpce, rozptyl, produkce díky štěpení
- Fickův zákon (konstitutivní vztah)
- Robinova okrajová podmínka: pomocí **albedo koeficientu** γ popisuje, jak materiál v okolí AZ odráží uniklé neutrony nazpět

Dvougrupová difúzní aproximace

Lokálně konzervativní tvar neutronové bilance ($\mathbf{r} = (x, y, z)$, $g = 1, 2$)

$$\nabla \cdot \mathbf{j}^g(\mathbf{r}) + \Sigma_r^g(\mathbf{r})\phi^g(\mathbf{r}) \qquad \sum_{\substack{g'=1\\ g'\neq g}}^{2} \Sigma_s^{g'\to g}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r}) + \chi^g \sum_{g'=1}^{2} \nu\Sigma_f^{g'}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{j}^g(\mathbf{r}) = -D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}); \quad \gamma^g\phi^g(\mathbf{r}) + D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r}) = 0 \text{ pro } \mathbf{r} \in \partial\mathcal{C}$$

- Bilanční členy: difúze, absorpce, rozptyl, produkce díky štěpení
- Fickův zákon (konstitutivní vztah)
- Robinova okrajová podmínka: pomocí **albedo koeficientu** γ popisuje, jak materiál v okolí AZ odráží uniklé neutrony nazpět
- $D \geq d > 0$, $\nu\Sigma_f \geq \sigma_f > 0$, $\Sigma_r \geq 0$, $\Sigma_s \geq 0$: omezené, měřitelné, po částech hladké funkce; $\chi^1 = 1$, $\chi^2 = 0$

Dvougrupová difúzní aproximace

Lokálně konzervativní tvar neutronové bilance ($\mathbf{r} = (x, y, z)$, $g = 1, 2$)

$$\nabla \cdot \mathbf{j}^g(\mathbf{r}) + \Sigma_r^g(\mathbf{r})\phi^g(\mathbf{r}) = \sum_{\substack{g'=1 \\ g' \neq g}}^{2} \Sigma_s^{g' \to g}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r}) + \frac{\chi^g}{k_{\text{eff}}} \sum_{g'=1}^{2} \nu\Sigma_f^{g'}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{j}^g(\mathbf{r}) = -D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}); \quad \gamma^g\phi^g(\mathbf{r}) + D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r}) = 0 \text{ pro } \mathbf{r} \in \partial\mathcal{C}$$

- Bilanční členy: difúze, absorpce, rozptyl, produkce díky štěpení
- Fickův zákon (konstitutivní vztah)
- Robinova okrajová podmínka: pomocí **albedo koeficientu** γ popisuje, jak materiál v okolí AZ odráží uniklé neutrony nazpět
- $D \geq d > 0$, $\nu\Sigma_f \geq \sigma_f > 0$, $\Sigma_r \geq 0$, $\Sigma_s \geq 0$: omezené, měřitelné, po částech hladké funkce; $\chi^1 = 1$, $\chi^2 = 0$
- k_{eff} . . . **kritické číslo** reaktoru

Dvougrupová difúzní aproximace

Lokálně konzervativní tvar neutronové bilance ($\mathbf{r} = (x, y, z)$, $g = 1, 2$)

$$\nabla \cdot \mathbf{j}^g(\mathbf{r}) + \Sigma_r^g(\mathbf{r})\phi^g(\mathbf{r}) = \sum_{\substack{g'=1 \\ g' \neq g}}^{2} \Sigma_s^{g' \to g}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r}) + \frac{\chi^g}{k_{\mathrm{eff}}} \sum_{g'=1}^{2} \nu\Sigma_f^{g'}(\mathbf{r})\phi^{g'}(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{j}^g(\mathbf{r}) = -D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}); \quad \gamma^g\phi^g(\mathbf{r}) + D^g(\mathbf{r})\nabla\phi^g(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r}) = 0 \text{ pro } \mathbf{r} \in \partial\mathcal{C}$$

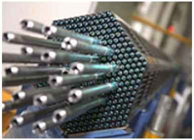
- Bilanční členy: difúze, absorpce, rozptyl, produkce díky štěpení
- Fickův zákon (konstitutivní vztah)
- Robinova okrajová podmínka: pomocí **albedo koeficientu** γ popisuje, jak materiál v okolí AZ odráží uniklé neutrony nazpět
- $D \geq d > 0$, $\nu\Sigma_f \geq \sigma_f > 0$, $\Sigma_r \geq 0$, $\Sigma_s \geq 0$: omezené, měřitelné, po částech hladké funkce; $\chi^1 = 1$, $\chi^2 = 0$
- k_{eff} . . . **kritické číslo** reaktoru
  - největší vlastní číslo o.ú. – jediné, pro něž existuje netriviální řešení ϕ s vlastnostmi reálného neutronového toku

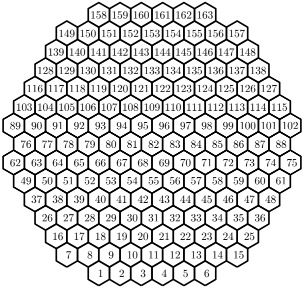
Přehled

- Motivace
- Matematický model
- **Numerický model**
- Algoritmus
- Výsledky a srovnání
- Závěr

Metoda kontrolních objemů (MKO)

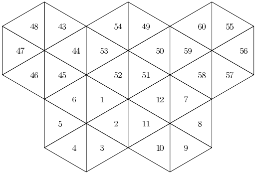
- Reaktory v ČR konstruovány pro palivové kazety s šestihranným průřezem

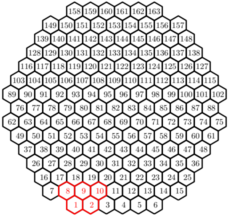




Metoda kontrolních objemů (MKO)

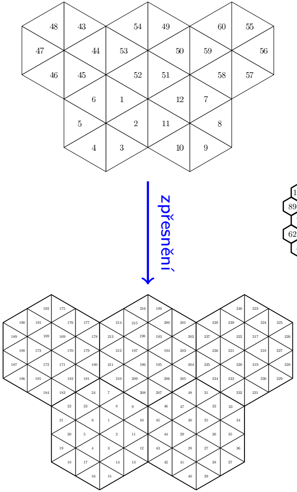
Standardní MKO

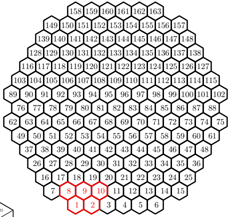




Metoda kontrolních objemů (MKO)

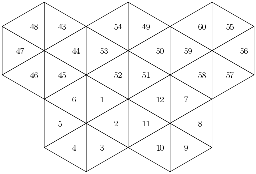
Standardní MKO





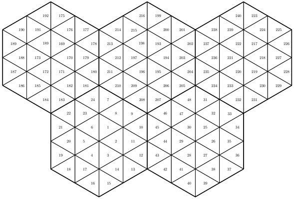
Metoda kontrolních objemů (MKO)

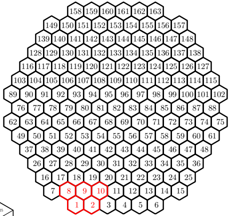
Standardní MKO



zjemněním sítě
⇓
zpomalení

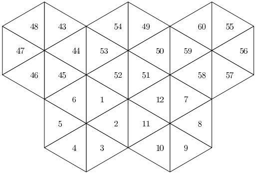
zpřesnění





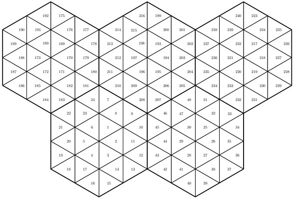
Metoda kontrolních objemů (MKO)

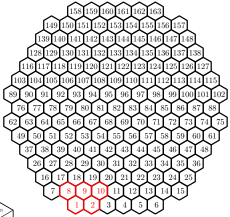
Standardní MKO



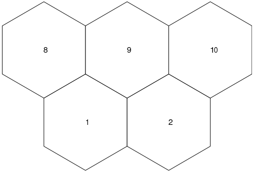
zjemněním sítě
⇓
zpomalení

zpřesnění



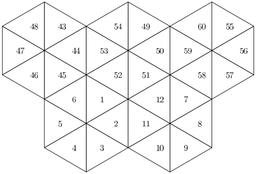


Nodální metoda



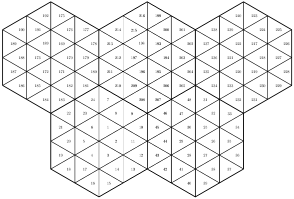
Metoda kontrolních objemů (MKO)

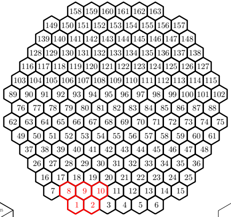
Standardní MKO



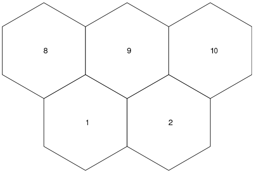
zjemněním sítě
⇓
zpomalení

zpřesnění

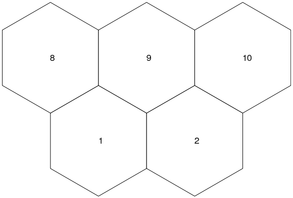




Nodální metoda

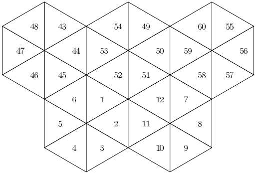


zpřesnění



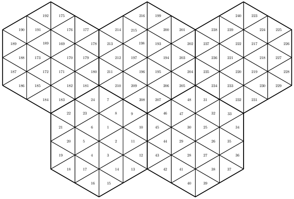
Metoda kontrolních objemů (MKO)

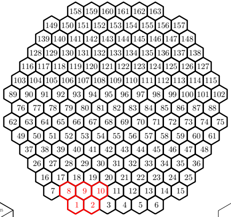
Standardní MKO



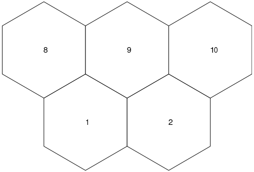
zjemněním sítě
⇓
zpomalení

zpřesnění



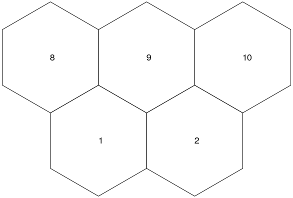


Nodální metoda



zpřesnění

stejná síť,
korekce pomocí
přesnější metody

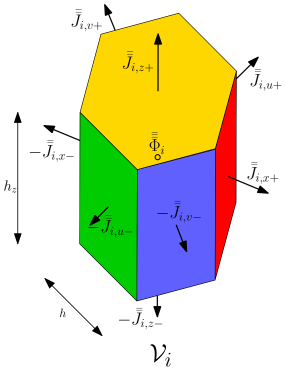


Nodální metoda

- 1 kontrolní objem (**nód**) $=$ 1 palivová kazeta, konstantní koeficienty

Nodální metoda

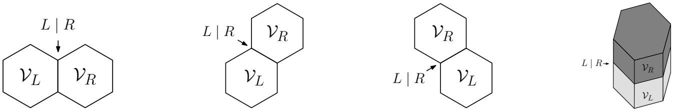
- 1 kontrolní objem (**nód**) = 1 palivová kazeta, konstantní koeficienty
- Diskrétní proměnné – integrální průměry:
  1. neutronového toku v nódu: $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i$
  2. neutronového proudu přes strany nódu: $\bar{\bar{J}}_{i,\bullet}$



Nodální metoda

- 1 kontrolní objem (**nód**) = 1 palivová kazeta, konstantní koeficienty
- Diskrétní proměnné – integrální průměry:
  1. neutronového toku v nódu: $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i$
  2. neutronového proudu přes strany nódu: $\bar{\bar{J}}_{i,\bullet}$
- **CMFD** (Coarse-Mesh, Finite-Difference) schéma
  - konzistentní a konzervativní aproximace proudů metodou konečných diferencí

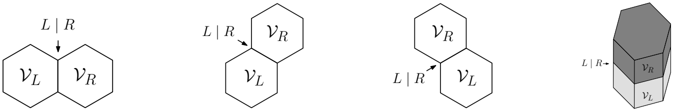
$$\boxed{\bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R)}$$



Nodální metoda

- 1 kontrolní objem (**nód**) = 1 palivová kazeta, konstantní koeficienty
- Diskrétní proměnné – integrální průměry:
  1. neutronového toku v nódu: $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i$
  2. neutronového proudu přes strany nódu: $\bar{\bar{J}}_{i,\bullet}$
- **CMFD** (Coarse-Mesh, Finite-Difference) schéma
  - konzistentní a konzervativní aproximace proudů metodou konečných diferencí + oprava diskretizačních chyb kvůli hrubé síti

$$\boxed{\bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R)}$$



Nodální metoda

- 1 kontrolní objem (**nód**) = 1 palivová kazeta, konstantní koeficienty
- Diskrétní proměnné – integrální průměry:
  1. neutronového toku v nódu: $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i$
  2. neutronového proudu přes strany nódu: $\bar{\bar{J}}_{i,\bullet}$
- **CMFD** (Coarse-Mesh, Finite-Difference) schéma
  - konzistentní a konzervativní aproximace proudů metodou konečných diferencí + oprava diskretizačních chyb kvůli hrubé síti

$$\boxed{\bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R)}$$

$$\boxed{(\mathbf{M} + {}^{\mathrm{C}}\mathbf{D})\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}} = k_{\mathrm{eff}}^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}}}$$

- **vnitřní iterace**

Nodální metoda

- 1 kontrolní objem (**nód**) = 1 palivová kazeta, konstantní koeficienty
- Diskrétní proměnné – integrální průměry:
  1. neutronového toku v nódu: $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i$
  2. neutronového proudu přes strany nódu: $\bar{\bar{J}}_{i,\bullet}$
- **CMFD** (Coarse-Mesh, Finite-Difference) schéma
  - konzistentní a konzervativní aproximace proudů metodou konečných diferencí + oprava diskretizačních chyb kvůli hrubé síti

$$\bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R)$$

$$(\mathbf{M} + {}^{\mathrm{C}}\mathbf{D})\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}} = k_{\mathrm{eff}}^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}}$$

- **vnitřní iterace**
- nutná znalost rozložení zdrojů

Nodální metoda

- 1 kontrolní objem (**nód**) = 1 palivová kazeta, konstantní koeficienty
- Diskrétní proměnné – integrální průměry:
  1. neutronového toku v nódu: $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i$
  2. neutronového proudu přes strany nódu: $\bar{\bar{J}}_{i,\bullet}$
- **CMFD** (Coarse-Mesh, Finite-Difference) schéma
  - konzistentní a konzervativní aproximace proudů metodou konečných diferencí + oprava diskretizačních chyb kvůli hrubé síti

$$\boxed{\bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R)}$$

$$\boxed{(\mathbf{M} + {}^{\mathrm{C}}\mathbf{D})\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}} = k_{\mathrm{eff}}^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}}} \iff \boxed{k_{\mathrm{eff}}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}} = (\mathbf{M} + {}^{\mathrm{C}}\mathbf{D})^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}}}$$

- **vnitřní iterace**
- nutná znalost rozložení zdrojů

- **vnější iterace**

Nodální metoda

- 1 kontrolní objem (**nód**) = 1 palivová kazeta, konstantní koeficienty
- Diskrétní proměnné – integrální průměry:
  1. neutronového toku v nódu: $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i$
  2. neutronového proudu přes strany nódu: $\bar{\bar{J}}_{i,\bullet}$
- **CMFD** (Coarse-Mesh, Finite-Difference) schéma
  - konzistentní a konzervativní aproximace proudů metodou konečných diferencí + oprava diskretizačních chyb kvůli hrubé síti

$$\boxed{\bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R)}$$

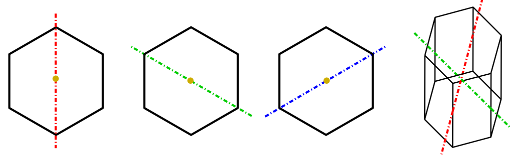
$$\boxed{(\mathbf{M} + {}^{\mathrm{C}}\mathbf{D})\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}} = k_{\mathrm{eff}}^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}}} \quad \Longleftrightarrow \quad \boxed{\overbrace{k_{\mathrm{eff}}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}}}^{\text{do vnitřní iterace}} = \overbrace{(\mathbf{M} + {}^{\mathrm{C}}\mathbf{D})^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}}}^{\text{z vnější iterace}}}$$

- **vnitřní iterace**
- nutná znalost rozložení zdrojů

- **vnější iterace**
- mocninná metoda pro maticový problém vl. č.

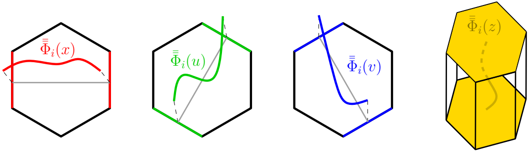
Určení opravných faktorů

- Integrace difúzní rovnice přes nodální řez kolmý na směr $\xi \in \{ x, \quad u, \quad v, \quad z \}$



Určení opravných faktorů

- Integrace difúzní rovnice přes nodální řez kolmý na směr
  $\xi \in \{ \quad x, \quad u, \quad v, \quad z \quad \}$

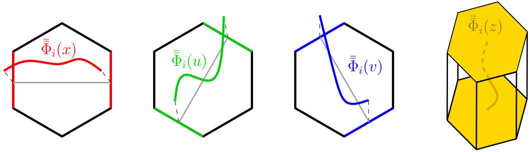


$\Rightarrow$ čtyři 1D difúzní rovnice

$$\boxed{-D_i \frac{\mathrm{d}^2 \bar{\bar{\phi}}_i(\xi)}{\mathrm{d}x^2} + \Sigma_{i,r} \bar{\bar{\phi}}_i(\xi) = \bar{\bar{s}}_i(\xi) - \bar{\bar{l}}_i^t(\xi)}$$

Určení opravných faktorů

- Integrace difúzní rovnice přes nodální řez kolmý na směr $\xi \in \{ x, u, v, z \}$



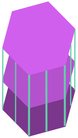
$\Rightarrow$ čtyři 1D difúzní rovnice

$$-D_i \frac{\mathrm{d}^2 \bar{\bar{\phi}}_i(\xi)}{\mathrm{d}x^2} + \Sigma_{i,r} \bar{\bar{\phi}}_i(\xi) = \bar{\bar{s}}_i(\xi) - \bar{\bar{l}}_i^t(\xi)$$

pro příčný průměr toku

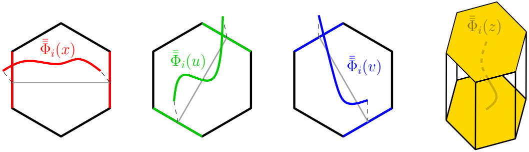
axiální

$$\bar{\bar{\phi}}_i(z) := \frac{1}{B} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-y_i^t(x)}^{y_i^t(x)} \phi(x, y, z) \mathrm{d}y \, \mathrm{d}x$$



Určení opravných faktorů

- Integrace difúzní rovnice přes nodální řez kolmý na směr
$\xi \in \{ \quad x, \quad u, \quad v, \quad z \quad \}$



$\Rightarrow$ čtyři 1D difúzní rovnice

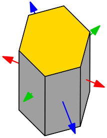
$$-D_i \frac{\mathrm{d}^2 \bar{\bar{\phi}}_i(\xi)}{\mathrm{d}x^2} + \Sigma_{i,r} \bar{\bar{\phi}}_i(\xi) = \bar{\bar{s}}_i(\xi) - \bar{\bar{l}}_i^t(\xi)$$

pro příčný průměr toku

axiální

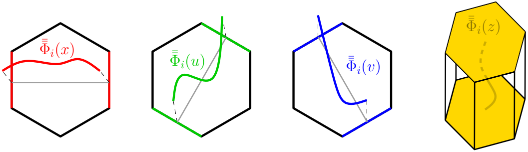
$$\bar{\bar{\phi}}_i(z) := \frac{1}{B} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-y_i^t(x)}^{y_i^t(x)} \phi(x,y,z) \mathrm{d}y \, \mathrm{d}x$$

$\overset{\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2}}{\Longrightarrow}$ příčný únik neutronů



Určení opravných faktorů

- Integrace difúzní rovnice přes nodální řez kolmý na směr $\xi \in \{ x, u, v, z \}$



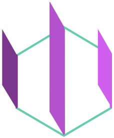
$\Rightarrow$ čtyři 1D difúzní rovnice

$$-D_i \frac{\mathrm{d}^2 \bar{\bar{\phi}}_i(\xi)}{\mathrm{d}x^2} + \Sigma_{i,r} \bar{\bar{\phi}}_i(\xi) = \bar{\bar{s}}_i(\xi) - \bar{\bar{l}}_i^t(\xi)$$

pro příčný průměr toku

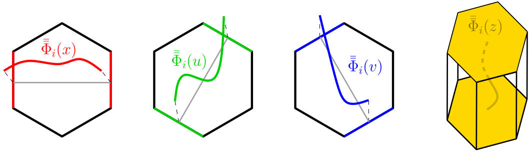
radiální

$$\bar{\bar{\phi}}_i(\xi) := \frac{1}{h_z} \int_{-\frac{h_z}{2}}^{\frac{h_z}{2}} \frac{1}{2 y_i^t(\xi)} \int_{-y_i^t(\xi)}^{y_i^t(\xi)} \phi(x, y, z) \mathrm{d}y \, \mathrm{d}z$$



Určení opravných faktorů

- Integrace difúzní rovnice přes nodální řez kolmý na směr $\xi \in \{ \quad x, \quad u, \quad v, \quad z \quad \}$



$\Rightarrow$ čtyři 1D difúzní rovnice

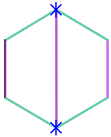
$$-D_i \frac{\mathrm{d}^2 \bar{\bar\phi}_i(\xi)}{\mathrm{d}x^2} + \Sigma_{i,r} \bar{\bar\phi}_i(\xi) = \bar{\bar s}_i(\xi) - \bar{\bar l}_i^t(\xi)$$

pro příčný průměr toku

radiální

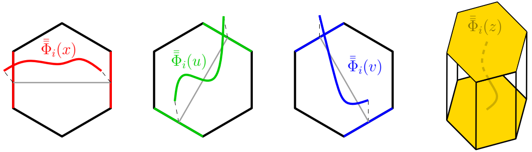
$$\bar{\bar\phi}_i(\xi) := \frac{1}{h_z} \int_{-\frac{h_z}{2}}^{\frac{h_z}{2}} \frac{1}{2y_i^t(\xi)} \int_{-y_i^t(\xi)}^{y_i^t(\xi)} \phi(x,y,z) \mathrm{d}y \, \mathrm{d}z$$

$\xRightarrow{\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2}}$ příčný únik neutronů



Určení opravných faktorů

- Integrace difúzní rovnice přes nodální řez kolmý na směr $\xi \in \{ x, u, v, z \}$



$\Rightarrow$ čtyři 1D difúzní rovnice

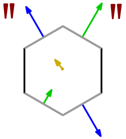
$$-D_i \frac{\mathrm{d}^2 \bar{\bar{\phi}}_i(\xi)}{\mathrm{d}x^2} + \Sigma_{i,r} \bar{\bar{\phi}}_i(\xi) = \bar{\bar{s}}_i(\xi) - \bar{\bar{l}}_i^t(\xi)$$

pro příčný průměr toku

radiální

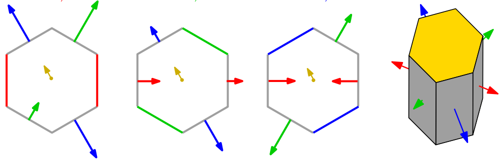
$$\bar{\bar{\phi}}_i(\xi) := \frac{1}{h_z} \int_{-\frac{h_z}{2}}^{\frac{h_z}{2}} \frac{1}{2y_i^t(\xi)} \int_{-y_i^t(\xi)}^{y_i^t(\xi)} \phi(x,y,z) \mathrm{d}y \, \mathrm{d}z$$

$\xRightarrow{\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2}}$ příčný únik neutronů ?



Určení opravných faktorů

- Integrace difúzní rovnice přes nodální řez kolmý na směr $\xi \in \{ x, u, v, z \}$



$\Rightarrow$ čtyři 1D difúzní rovnice

$$-D_i \frac{\mathrm{d}^2 \bar{\bar{\phi}}_i(\xi)}{\mathrm{d}x^2} + \Sigma_{i,r} \bar{\bar{\phi}}_i(\xi) = \bar{\bar{s}}_i(\xi) - \bar{\bar{l}}_i^t(\xi)$$

příčný únik neutronů

- svazuje rovnice pro různé směry $\Rightarrow$ aproximace

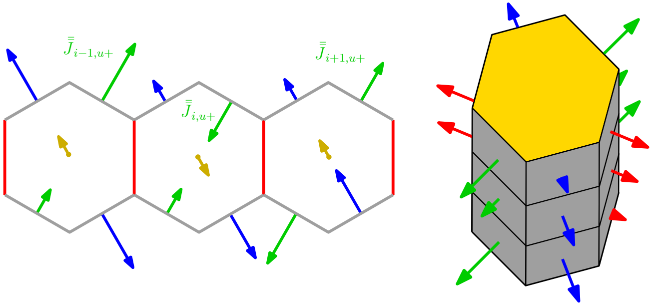
Aproximace členů příčného úniku (PÚČ)

- Požadavek konzistence nodálních průměrů veličin v 1D a 3D

M. R. Wagner
Three-Dimensional Nodal Diffusion and Transport Theory Methods for Hexagonal-z Geometry.
Nucl. Sci. Eng., 103:377–391, May 1989.

Aproximace členů příčného úniku (PÚČ)

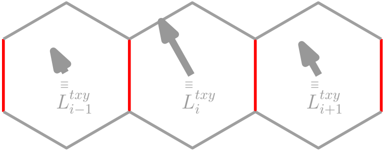
- Požadavek konzistence nodálních průměrů veličin v 1D a 3D
- 1D profil PÚČ aproximován parabolou zachovávající nodální průměr PÚČ v nódu samém a jeho dvou sousedech

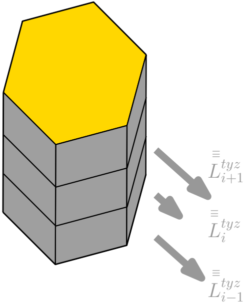


M. R. Wagner
Three-Dimensional Nodal Diffusion and Transport Theory Methods for Hexagonal-z Geometry.
Nucl. Sci. Eng., 103:377–391, May 1989.

Aproximace členů příčného úniku (PÚČ)

- Požadavek konzistence nodálních průměrů veličin v 1D a 3D
- 1D profil PÚČ aproximován parabolou zachovávající nodální průměr PÚČ v nódu samém a jeho dvou sousedech

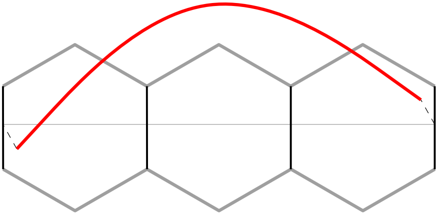


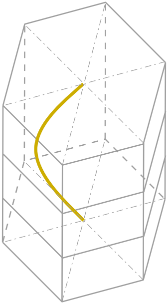


M. R. Wagner
Three-Dimensional Nodal Diffusion and Transport Theory Methods for Hexagonal-z Geometry.
Nucl. Sci. Eng., 103:377–391, May 1989.

Aproximace členů příčného úniku (PÚČ)

- Požadavek konzistence nodálních průměrů veličin v 1D a 3D
- 1D profil PÚČ aproximován parabolou zachovávající nodální průměr PÚČ v nódu samém a jeho dvou sousedech

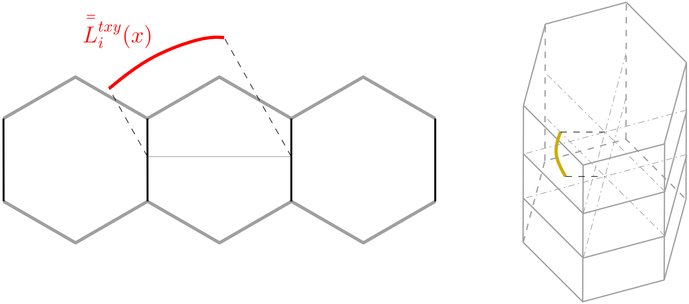




M. R. Wagner
Three-Dimensional Nodal Diffusion and Transport Theory Methods for Hexagonal-z Geometry.
Nucl. Sci. Eng., 103:377–391, May 1989.

Aproximace členů příčného úniku (PÚČ)

- Požadavek konzistence nodálních průměrů veličin v 1D a 3D
- 1D profil PÚČ aproximován parabolou zachovávající nodální průměr PÚČ v nódu samém a jeho dvou sousedech



M. R. Wagner
Three-Dimensional Nodal Diffusion and Transport Theory Methods for Hexagonal-z Geometry.
Nucl. Sci. Eng., 103:377–391, May 1989.

Řešení 1D rovnic (směr x)

1D difúzní rovnice pro daný nód a grupu

$$-D_i \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2} \bar{\bar{\Phi}}_i(x) + \Sigma_{i,r} \bar{\bar{\phi}}_i(x) = \bar{\bar{s}}_i(x) - \bar{\bar{l}}_i^t(x)$$

$$\approx \bar{\bar{L}}_i^{t\cdot\cdot}(\xi)$$

Řešení 1D rovnic (směr x)

1D difúzní rovnice pro daný nód a grupu

$$-D_i \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2}\bar{\bar{\Phi}}_i(x) + \Sigma_{i,r}\bar{\bar{\phi}}_i(x) = \bar{\bar{s}}_i(x) - \bar{\bar{l}}_i^t(x)$$

$\approx$ polynom 2. řádu

Řešení 1D rovnic (směr x)

1D difúzní rovnice pro daný nód a grupu

$$-D_i \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2} \bar{\bar{\phi}}_i(x) + \Sigma_{i,r} \bar{\bar{\phi}}_i(x) = \bar{\bar{s}}_i(x) - \bar{\bar{l}}_i^t(x)$$

$\bar{\bar{\Phi}}_i(x) \approx \bar{\bar{\phi}}_i(x)$

$\approx$ polynom 2. řádu

1D profil toku (analytické řešení difúzní rovnice)

$$\bar{\bar{\Phi}}_i(x) = C_1 \cosh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + C_2 \sinh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + \sum_{n=0}^{2} a_n p_n(x)$$

Řešení 1D rovnic (směr x)

1D difúzní rovnice pro daný nód a grupu

$$-D_i \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2}\bar{\bar{\phi}}_i(x) + \Sigma_{i,r}\bar{\bar{\phi}}_i(x) = \bar{\bar{s}}_i(x) - \bar{\bar{l}}_i^t(x)$$

$\bar{\bar{\Phi}}_i(x) \approx \bar{\bar{\phi}}_i(x)$

$\approx$ polynom 2. řádu

1D profil toku (analytické řešení difúzní rovnice)

$$\bar{\bar{\Phi}}_i(x) = C_1 \cosh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + C_2 \sinh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + \sum_{n=0}^{2} a_n p_n(x)$$

polynom řádu n

Řešení 1D rovnic (směr x)

1D difúzní rovnice pro daný nód a grupu

$$-D_i \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2} \bar{\bar{\phi}}_i(x) + \Sigma_{i,r} \bar{\bar{\phi}}_i(x) = \bar{\bar{s}}_i(x) - \bar{\bar{l}}_i^t(x)$$

$\bar{\bar{\Phi}}_i(x) \approx \bar{\bar{\phi}}_i(x)$

$\approx$ polynom 2. řádu

1D profil toku (analytické řešení difúzní rovnice)

$$\bar{\bar{\Phi}}_i(x) = C_1 \cosh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + C_2 \sinh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + \sum_{n=0}^{2} a_n p_n(x)$$

polynom řádu n

- 5 neznámých koeficientů pro každý nód a grupu

Řešení 1D rovnic (směr x)

Metoda vážených reziduí

$$\int_{-h/2}^{h/2} p_0(x)\left(-D_i \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2}\bar{\bar{\Phi}}_i(x)+\Sigma_{i,r}\bar{\bar{\phi}}_i(x)\right)\mathrm{d}x = \int_{-h/2}^{h/2} p_0(x)\left(\bar{\bar{s}}_i(x)-\bar{\bar{l}}_i^t(x)\right)\mathrm{d}x$$

1D profil toku (analytické řešení difúzní rovnice)

$$\bar{\bar{\Phi}}_i(x) = C_1 \cosh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + C_2 \sinh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + \sum_{n=0}^{2} a_n p_n(x)$$

polynom řádu n

- 5 neznámých koeficientů pro každý nód a grupu
  - metoda vážených reziduí

Řešení 1D rovnic (směr x)

Metoda vážených reziduí

$$\int_{-h/2}^{h/2} p_1(x)\left(-D_i \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2}\bar{\bar{\Phi}}_i(x) + \Sigma_{i,r}\bar{\bar{\phi}}_i(x)\right)\mathrm{d}x = \int_{-h/2}^{h/2} p_1(x)\left(\bar{\bar{s}}_i(x) - \bar{\bar{l}}_i^t(x)\right)\mathrm{d}x$$

1D profil toku (analytické řešení difúzní rovnice)

$$\bar{\bar{\Phi}}_i(x) = C_1 \cosh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + C_2 \sinh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + \sum_{n=0}^{2} a_n p_n(x)$$

polynom řádu n

- 5 neznámých koeficientů pro každý nód a grupu
  - metoda vážených reziduí

Řešení 1D rovnic (směr x)

Metoda vážených reziduí

$$\int_{-h/2}^{h/2} p_2(x)\left(-D_i \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2}\bar{\bar{\Phi}}_i(x) + \Sigma_{i,r}\bar{\bar{\phi}}_i(x)\right)\mathrm{d}x = \int_{-h/2}^{h/2} p_2(x)\left(\bar{\bar{s}}_i(x) - \bar{\bar{l}}_i^t(x)\right)\mathrm{d}x$$

1D profil toku (analytické řešení difúzní rovnice)

$$\bar{\bar{\Phi}}_i(x) = C_1 \cosh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + C_2 \sinh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + \sum_{n=0}^{2} a_n p_n(x)$$

polynom řádu n

- 5 neznámých koeficientů pro každý nód a grupu
  - metoda vážených reziduí

Řešení 1D rovnic (směr x)

Spojitost proudů a toků

$$\bar{\bar{J}}_{L|R} = \bar{\bar{J}}_{R|L}, \quad \bar{\bar{\Phi}}_L\left(\frac{h}{2}\right) = \bar{\bar{\Phi}}_R\left(-\frac{h}{2}\right)$$

1D profil toku (analytické řešení difúzní rovnice)

$$\bar{\bar{\Phi}}_i(x) = C_1 \cosh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + C_2 \sinh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + \sum_{n=0}^{2} a_n \underbrace{p_n(x)}_{\text{polynom řádu } n}$$

- 5 neznámých koeficientů pro každý nód a grupu
  - metoda vážených reziduí
  - spojitost toků
  - spojitost proudů

  $\left.\begin{array}{l}\text{spojitost toků}\\ \text{spojitost proudů}\end{array}\right\}$ na rozhraní dvou nódů

Řešení 1D rovnic (směr x)

Zachování integrálního průměru toku

$$\int_{-h/2}^{h/2} 2y_i^t(x)\bar{\bar{\Phi}}_i(x)\mathrm{d}x = \bar{\bar{\bar{\Phi}}}$$

1D profil toku (analytické řešení difúzní rovnice)

$$\bar{\bar{\Phi}}_i(x) = C_1 \cosh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + C_2 \sinh\left(\sqrt{\Sigma_{i,r}/D_i}\right) + \sum_{n=0}^{2} a_n \underbrace{p_n(x)}_{\text{polynom řádu } n}$$

- 5 neznámých koeficientů pro každý nód a grupu
  - metoda vážených reziduí
  - spojitost toků
  - spojitost proudů

    } na rozhraní dvou nódů
  - toky a proudy na rozhraní svázány Fickovým vztahem

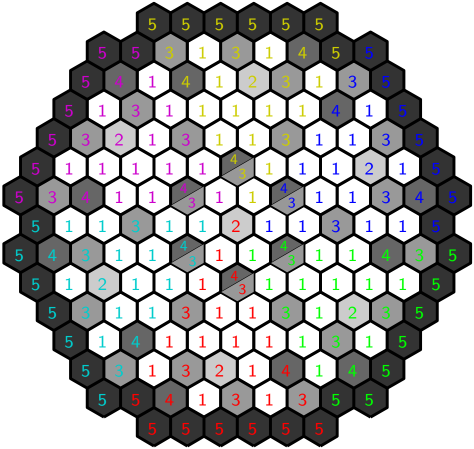
    $\Rightarrow$ dodatečná podmínka zachování průměrného toku

Přehled

- Motivace
- Matematický model
- Numerický model
- **Algoritmus**
- Výsledky a srovnání
- Závěr

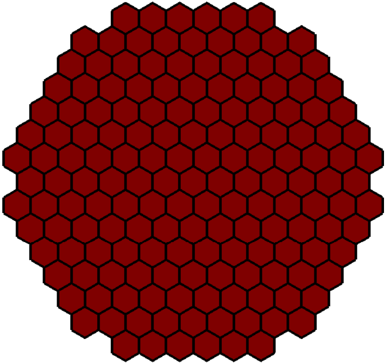
Modelová úloha

- Příčná konfigurace AZ: 5 typů kazet v 60° symetrii, rozteč 23.6 cm, $\gamma_{rad} = 0.125$
- Podélná konfigurace AZ: výška 200 cm, 10 řezů, 6 řídících tyčí zpola vytažených, $\gamma_{ax} = 0.15$



CMFD výpočet (v jednom řezu AZ)

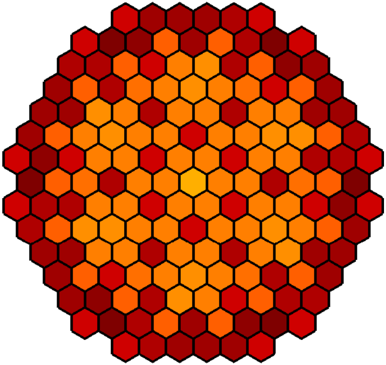
$k_{\text{eff}}^{(0)}$, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(0)}$



$$k_{\text{eff}}^{(0)} = 1.000000$$

CMFD výpočet (v jednom řezu AZ)

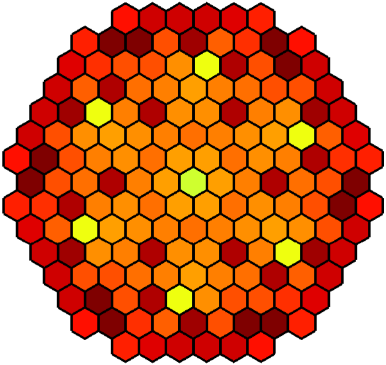
$$k_{\text{eff}}^{(0)},\ \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(0)} \dashrightarrow \mathbf{M}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}} = k_{\text{eff}}^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}} \dashrightarrow k_{\text{eff}}^{(1)},\ \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(1)}$$



$$k_{\text{eff}}^{(1)} = 1.014235$$

CMFD výpočet (v jednom řezu AZ)

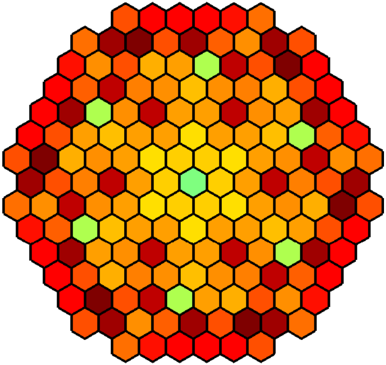
$$k_{\text{eff}}^{(0)},\ \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(0)} \dashrightarrow \mathbf{M}\bar{\bar{\bar{\boldsymbol{\Phi}}}} = k_{\text{eff}}^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\boldsymbol{\Phi}}}} \dashrightarrow k_{\text{eff}}^{(2)},\ \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(2)}$$



$$k_{\text{eff}}^{(2)} = 1.020357$$

CMFD výpočet (v jednom řezu AZ)

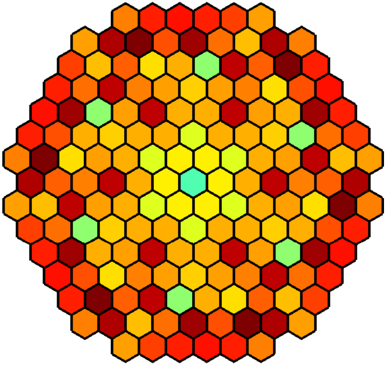
$$k_{\text{eff}}^{(0)},\ \overline{\overline{\overline{\Phi}}}_i^{(0)} \dashrightarrow \mathbf{M}\overline{\overline{\overline{\Phi}}} = k_{\text{eff}}^{-1}\mathbf{F}\overline{\overline{\overline{\Phi}}} \dashrightarrow k_{\text{eff}}^{(3)},\ \overline{\overline{\overline{\Phi}}}_i^{(3)}$$



$$k_{\text{eff}}^{(3)} = 1.022752$$

CMFD výpočet (v jednom řezu AZ)

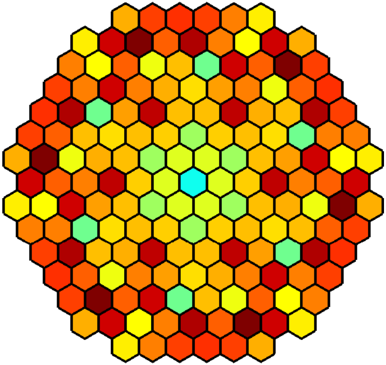
$$k_{\text{eff}}^{(0)},\ \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(0)} \dashrightarrow \mathbf{M}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}} = k_{\text{eff}}^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}} \dashrightarrow k_{\text{eff}}^{(4)},\ \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(4)}$$



$$k_{\text{eff}}^{(4)} = 1.023843$$

CMFD výpočet (v jednom řezu AZ)

$$k_{\mathrm{eff}}^{(0)},\ \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(0)} \dashrightarrow \mathbf{M}\bar{\bar{\bar{\boldsymbol{\Phi}}}} = k_{\mathrm{eff}}^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\boldsymbol{\Phi}}}} \dashrightarrow k_{\mathrm{eff}}^{(5)},\ \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(5)}$$

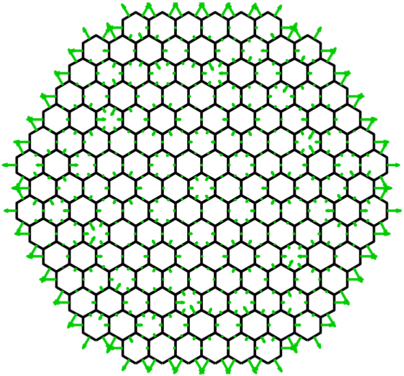


$$k_{\mathrm{eff}}^{(5)} = 1.024439$$

CMFD výpočet (v jednom řezu AZ)

$$k_{\text{eff}}^{(0)},\ \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(0)} \dashrightarrow \mathbf{M}\bar{\bar{\bar{\Phi}}} = k_{\text{eff}}^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\Phi}}} \dashrightarrow k_{\text{eff}}^{(5)},\ \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(5)}$$

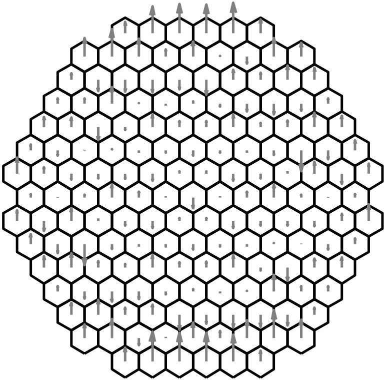
$$\bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L\right) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R\right)$$

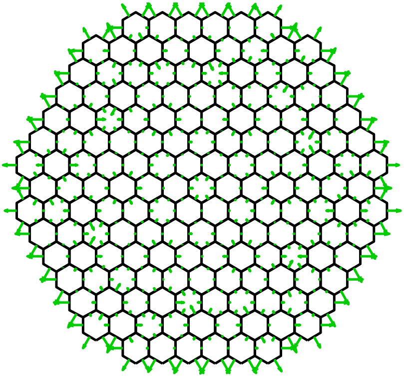


CMFD výpočet (v jednom řezu AZ)

$$k_{\text{eff}}^{(0)},\ \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(0)} \dashrightarrow \mathbf{M}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}} = k_{\text{eff}}^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}} \dashrightarrow k_{\text{eff}}^{(5)},\ \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(5)}$$

$$\bar{\bar{\bar{L}}}_i^{txy} \dashleftarrow \bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L\right) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R\right)$$

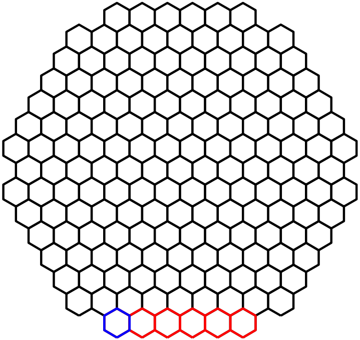




Výpočet opravných faktorů

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_1$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{0,1,2}$, γ_{rad}

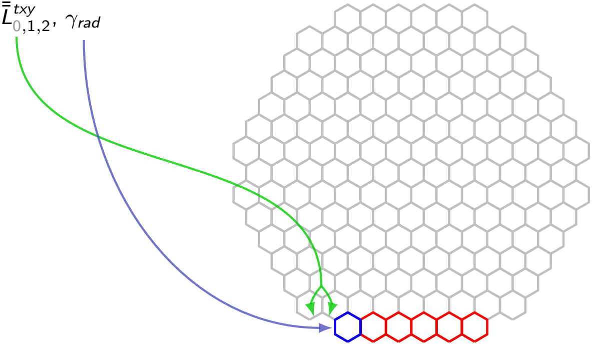


Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

Výpočet opravných faktorů

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_1$

$$\xrightarrow{\text{in}} \; k_{\text{eff}},\ \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_1,\ \bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{0,1,2},\ \gamma_{rad}$$



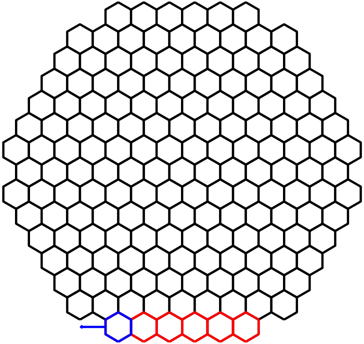
Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

Výpočet opravných faktorů

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_1$

$\overset{\text{in}}{\dashrightarrow}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_1$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{0,1,2}$, γ_{rad}

$\overset{\text{out}}{\dashrightarrow}$ $\bar{\bar{J}}_{0|1}$



Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

Výpočet opravných faktorů

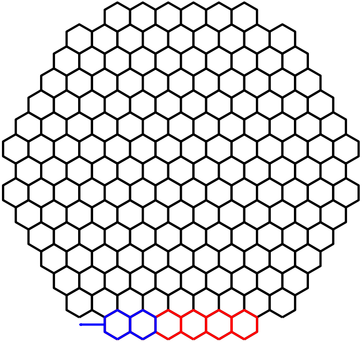
- 1D úloha pro $\mathcal{V}_1$

  $\overset{\text{in}}{\dashrightarrow}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_1$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{0,1,2}$, γ_{rad}

  $\overset{\text{out}}{\dashrightarrow}$ $\bar{\bar{J}}_{0|1}$

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_2$

  $\overset{\text{in}}{\dashrightarrow}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_2$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{1,2,3}$,
  výsledky z $\mathcal{V}_1$



Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

Výpočet opravných faktorů

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_1$

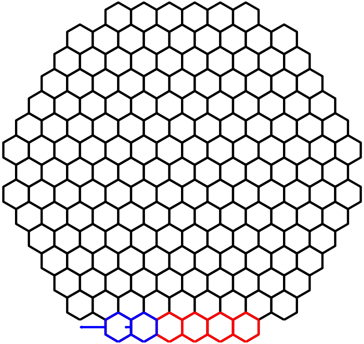
  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_1$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{0,1,2}$, γ_{rad}

  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{0|1}$

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_2$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_2$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{1,2,3}$,
  výsledky z $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{1|2}$



Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

Výpočet opravných faktorů

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_1$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{0,1,2}$, γ_{rad}

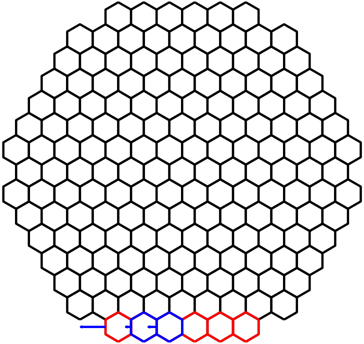
  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{0|1}$

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_2$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_2$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{1,2,3}$, výsledky z $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{1|2}$

- $\bar{\bar{J}}_{2|3}$



Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

Výpočet opravných faktorů

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_1$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{0,1,2}$, γ_{rad}

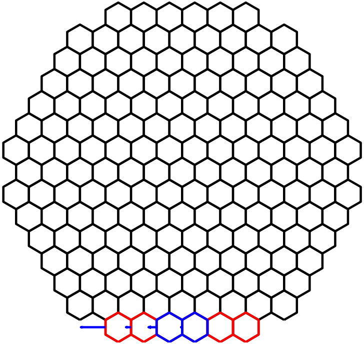
  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{0|1}$

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_2$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_2$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{1,2,3}$, výsledky z $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{1|2}$

- $\bar{\bar{J}}_{2|3}$, $\bar{\bar{J}}_{3|4}$



Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

Výpočet opravných faktorů

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_1$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{0,1,2}$, γ_{rad}

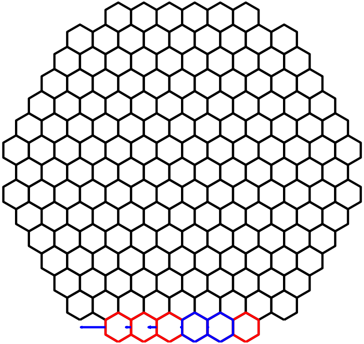
  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{0|1}$

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_2$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_2$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{1,2,3}$,
  výsledky z $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{1|2}$

- $\bar{\bar{J}}_{2|3}$, $\bar{\bar{J}}_{3|4}$, $\bar{\bar{J}}_{4|5}$



Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

Výpočet opravných faktorů

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_1$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{0,1,2}$, γ_{rad}

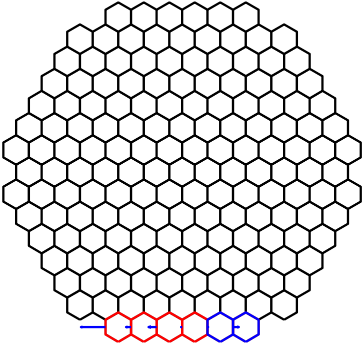
  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{0|1}$

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_2$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_2$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{1,2,3}$,
  výsledky z $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{1|2}$

- $\bar{\bar{J}}_{2|3}$, $\bar{\bar{J}}_{3|4}$, $\bar{\bar{J}}_{4|5}$, $\bar{\bar{J}}_{5|6}$



Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

Výpočet opravných faktorů

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_1$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{0,1,2}$, γ_{rad}

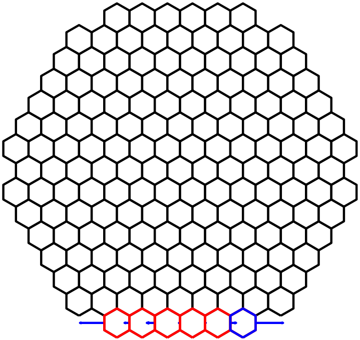
  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{0|1}$

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_2$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_2$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{1,2,3}$, výsledky z $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{1|2}$

- $\bar{\bar{J}}_{2|3}$, $\bar{\bar{J}}_{3|4}$, $\bar{\bar{J}}_{4|5}$, $\bar{\bar{J}}_{5|6}$, $\bar{\bar{J}}_{6|7}$



Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

Výpočet opravných faktorů

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_1$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{0,1,2}$, γ_{rad}

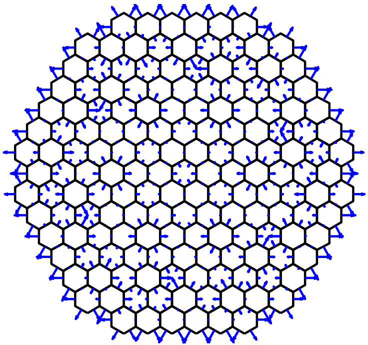
  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{0|1}$

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_2$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_2$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{1,2,3}$, výsledky z $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{1|2}$

- $\bar{\bar{J}}_{2|3}$, $\bar{\bar{J}}_{3|4}$, $\bar{\bar{J}}_{4|5}$, $\bar{\bar{J}}_{5|6}$, $\bar{\bar{J}}_{6|7}$, . . .
- $\bar{\bar{J}}_{L|R}$



Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

Výpočet opravných faktorů

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_1$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{0,1,2}$, γ_{rad}

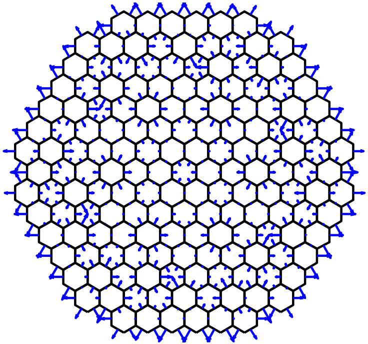
  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{0|1}$

- 1D úloha pro $\mathcal{V}_2$

  $\xrightarrow{\text{in}}$ k_{eff}, $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_2$, $\bar{\bar{\bar{L}}}^{txy}_{1,2,3}$, výsledky z $\mathcal{V}_1$

  $\xrightarrow{\text{out}}$ $\bar{\bar{J}}_{1|2}$

- $\bar{\bar{J}}_{2|3}$, $\bar{\bar{J}}_{3|4}$, $\bar{\bar{J}}_{4|5}$, $\bar{\bar{J}}_{5|6}$, $\bar{\bar{J}}_{6|7}$, . . .
- $\bar{\bar{J}}_{L|R}$
- analogicky v dalších řezech

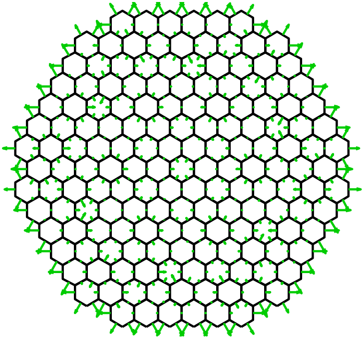


Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

Korekce CMFD aproximace

Hrubá (CMFD) aproximace $\bar{\bar{J}}_{L|R}$

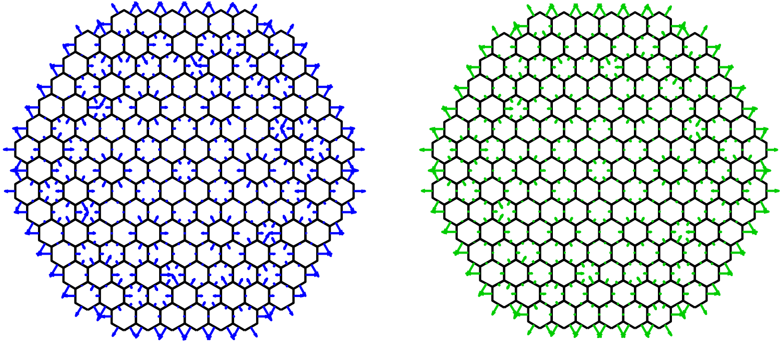
$$\bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L\right) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R\right)$$



Korekce CMFD aproximace

Hrubá (CMFD) aproximace $\bar{\bar{J}}_{L|R}$ je srovnána s přesnějším $\bar{\bar{J}}_{L|R}$

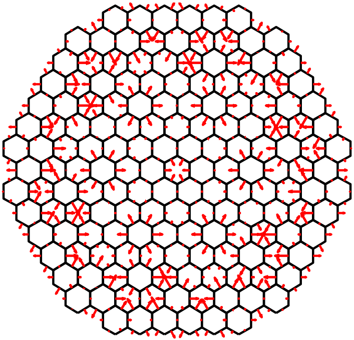
$$\bar{\bar{J}}_{L|R} \equiv \bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L\right) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R\right)$$



Korekce CMFD aproximace

Hrubá (CMFD) aproximace $\bar{\bar{J}}_{L|R}$ je srovnána s přesnějším $\bar{J}_{L|R}$ prostřednictvím opravných faktorů

$$\bar{J}_{L|R} \equiv \bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L\right) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R\right)$$



Korekce CMFD aproximace

Hrubá (CMFD) aproximace $\bar{\bar{J}}_{L|R}$ je srovnána s přesnějším $\bar{\bar{J}}_{L|R}$ prostřednictvím opravných faktorů

$$\bar{\bar{J}}_{L|R} \equiv \bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L\right) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R\right)$$

$${}^{\mathrm{C}}D_{L|R} = \frac{1}{\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R}\left[\bar{\bar{J}}_{L|R} + \tfrac{2D_L D_R}{h(D_L+D_R)}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L\right)\right]$$

Korekce CMFD aproximace

Hrubá (CMFD) aproximace $\bar{\bar{J}}_{L|R}$ je srovnána s přesnějším $\bar{J}_{L|R}$ prostřednictvím opravných faktorů

$$\bar{J}_{L|R} \equiv \bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L\right) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R\right)$$

$${}^{\mathrm{C}}D_{L|R} = \frac{1}{\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R}\left[\bar{\bar{J}}_{L|R} + \frac{2D_L D_R}{h(D_L+D_R)}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L\right)\right]$$

CMFD soustava: $(\mathbf{M} + {}^{\mathrm{C}}\mathbf{D})\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}} = k_{\mathrm{eff}}^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\mathbf{\Phi}}}}$

Korekce CMFD aproximace

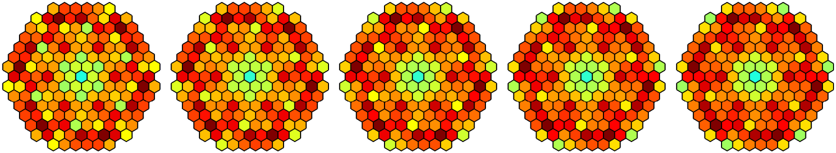
Hrubá (CMFD) aproximace $\bar{\bar{J}}_{L|R}$ je srovnána s přesnějším $\bar{\bar{J}}_{L|R}$ prostřednictvím opravných faktorů

$$\bar{\bar{J}}_{L|R} \equiv \bar{\bar{J}}_{L|R} = -\frac{2D_L D_R}{h(D_L + D_R)}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L\right) + {}^{\mathrm{C}}D_{L|R}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R\right)$$

$${}^{\mathrm{C}}D_{L|R} = \frac{1}{\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L + \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R}\left[\bar{\bar{J}}_{L|R} + \frac{2D_L D_R}{h(D_L+D_R)}\left(\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_R - \bar{\bar{\bar{\Phi}}}_L\right)\right]$$

CMFD soustava: $(\mathbf{M} + {}^{\mathrm{C}}\mathbf{D})\bar{\bar{\bar{\boldsymbol{\Phi}}}} = k_{\mathrm{eff}}^{-1}\mathbf{F}\bar{\bar{\bar{\boldsymbol{\Phi}}}}$

$\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(6)}$ $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(7)}$ $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(8)}$ $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(9)}$ $\bar{\bar{\bar{\Phi}}}_i^{(10)}$



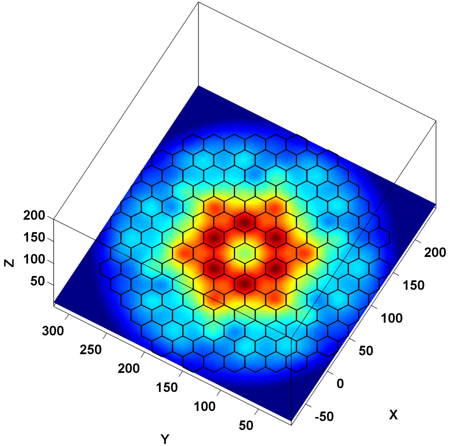
$k_{\mathrm{eff}}^{(6)} = 1.024818$ $k_{\mathrm{eff}}^{(7)} = 1.013238$ $k_{\mathrm{eff}}^{(8)} = 1.014099$ $k_{\mathrm{eff}}^{(9)} = 1.014527$ $k_{\mathrm{eff}}^{(10)} = 1.014782$

Přehled

- Motivace
- Matematický model
- Numerický model
- Algoritmus
- **Výsledky a srovnání**
- Závěr

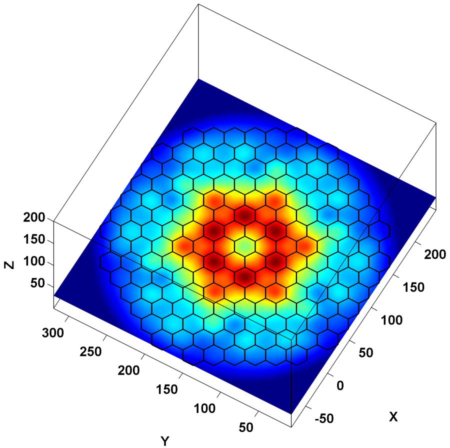
Rozložení průměrných nodálních výkonů

$$\bar{\bar{\bar{P}}}_i := \frac{\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i}{\frac{1}{N}\sum_{\mathcal{V}_i}\left(\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i\right)}$$



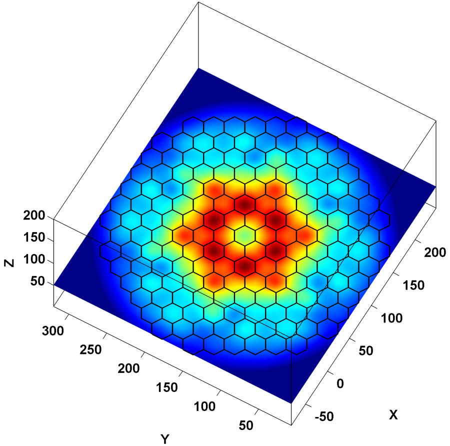
Rozložení průměrných nodálních výkonů

$$\bar{\bar{\bar{P}}}_i := \frac{\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i}{\frac{1}{N}\sum_{\mathcal{V}_i}\left(\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i\right)}$$



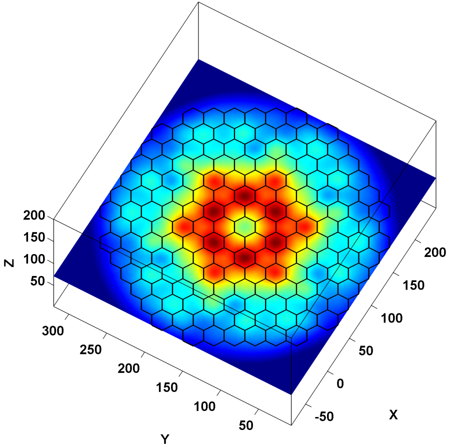
Rozložení průměrných nodálních výkonů

$$\bar{\bar{\bar{P}}}_i := \frac{\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i}{\frac{1}{N}\sum\limits_{\mathcal{V}_i}\left(\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i\right)}$$



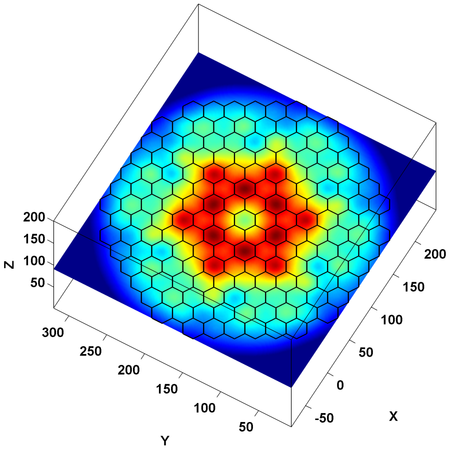
Rozložení průměrných nodálních výkonů

$$\bar{\bar{\bar{P}}}_i := \frac{\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i}{\frac{1}{N}\sum_{\mathcal{V}_i}\left(\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i\right)}$$



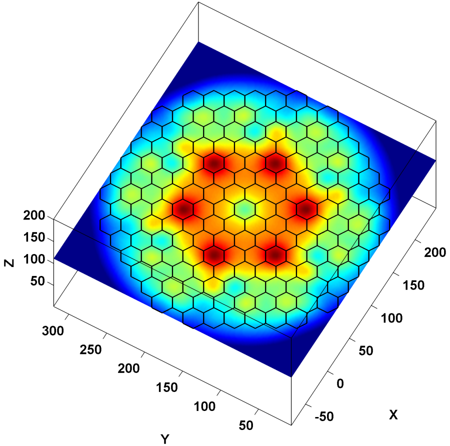
Rozložení průměrných nodálních výkonů

$$\bar{\bar{\bar{P}}}_i := \frac{\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i}{\frac{1}{N}\sum_{\mathcal{V}_i}\left(\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i\right)}$$



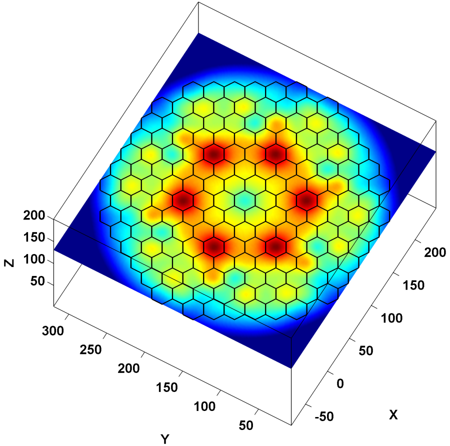
Rozložení průměrných nodálních výkonů

$$\bar{\bar{\bar{P}}}_i := \frac{\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i}{\frac{1}{N}\sum_{\mathcal{V}_i}\left(\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i\right)}$$



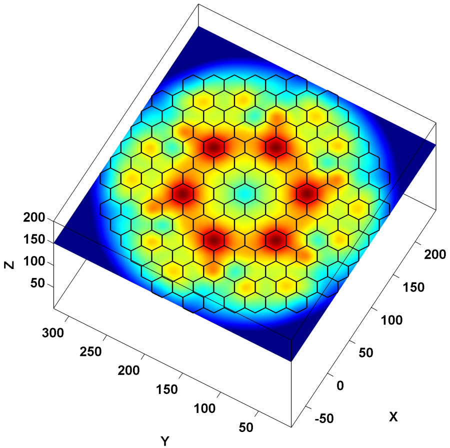
Rozložení průměrných nodálních výkonů

$$\bar{\bar{\bar{P}}}_i := \frac{\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i}{\frac{1}{N}\sum_{\mathcal{V}_i}\left(\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i\right)}$$



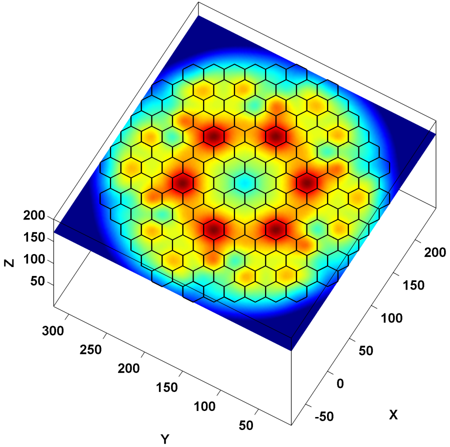
Rozložení průměrných nodálních výkonů

$$\bar{\bar{\bar{P}}}_i := \frac{\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i}{\frac{1}{N}\sum\limits_{\mathcal{V}_i}\left(\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i\right)}$$



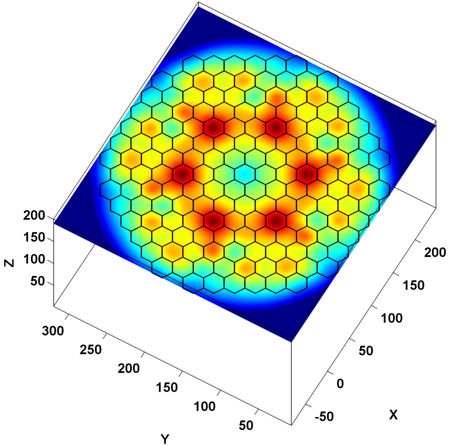
Rozložení průměrných nodálních výkonů

$$\overline{\overline{\overline{P}}}_i := \frac{\nu\Sigma^1_{i,f}\overline{\overline{\overline{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\overline{\overline{\overline{\Phi}}}^2_i}{\frac{1}{N}\sum\limits_{\mathcal{V}_i}\left(\nu\Sigma^1_{i,f}\overline{\overline{\overline{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\overline{\overline{\overline{\Phi}}}^2_i\right)}$$



Rozložení průměrných nodálních výkonů

$$\bar{\bar{\bar{P}}}_i \; := \; \frac{\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i}{\frac{1}{N}\sum_{\mathcal{V}_i}\left(\nu\Sigma^1_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^1_i + \nu\Sigma^2_{i,f}\bar{\bar{\bar{\Phi}}}^2_i\right)}$$



Popis implementace

- Programováno v MATLABu, verze 2007b
- Žádná speciální optimalizace výkonu, pouze použití metod pro řídké matice a automatické podpory vícejádrových počítačů poskytované MATLABem
- Počítač: Intel Core 2 Duo 6600 @ 2.40GHz, 2 GB RAM, Win XP SP2

Popis implementace

- Programováno v MATLABu, verze 2007b
- Žádná speciální optimalizace výkonu, pouze použití metod pro řídké matice a automatické podpory vícejádrových počítačů poskytované MATLABem
- Počítač: Intel Core 2 Duo 6600 @ 2.40GHz, 2 GB RAM, Win XP SP2

1. Referenční řešení: FMFD (Fine-Mesh, Finite-Difference)
    - 864 △/⬡
    - 80 iterací mocninné metody
        - 25 iterací metody sdružených gradientů
        - předpodmínění neúplnou Choleského faktorizací

Popis implementace

- Programováno v MATLABu, verze 2007b
- Žádná speciální optimalizace výkonu, pouze použití metod pro řídké matice a automatické podpory vícejádrových počítačů poskytované MATLABem
- Počítač: Intel Core 2 Duo 6600 @ 2.40GHz, 2 GB RAM, Win XP SP2

1. Referenční řešení: FMFD (Fine-Mesh, Finite-Difference)
    - 864 △/⬡
    - 80 iterací mocninné metody
        - 25 iterací metody sdružených gradientů
        - předpodmínění neúplnou Choleského faktorizací
2. Nodální metoda: CMFD (Coarse-Mesh, Finite-Difference)
    - 20 iterací mocninné metody
        - Řešení CMFD soustavy přímou metodou
    - Nodální výpočet pro zpřesnění
        - Využití symetrie AZ (výpočet pouze v 1/6 reaktoru)

Popis implementace

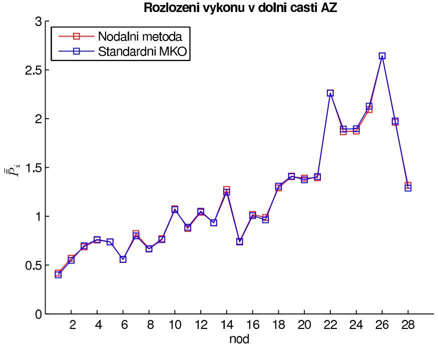
- Programováno v MATLABu, verze 2007b
- Žádná speciální optimalizace výkonu, pouze použití metod pro řídké matice a automatické podpory vícejádrových počítačů poskytované MATLABem
- Počítač: Intel Core 2 Duo 6600 @ 2.40GHz, 2 GB RAM, Win XP SP2

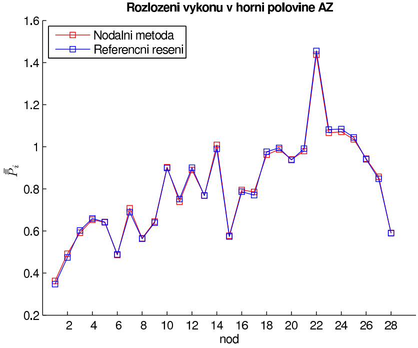
1. Referenční řešení: FMFD (Fine-Mesh, Finite-Difference)
   - 864 △/⬡
   - 80 iterací mocninné metody
     - 25 iterací metody sdružených gradientů
     - předpodmínění neúplnou Choleského faktorizací
2. Nodální metoda: CMFD (Coarse-Mesh, Finite-Difference)
   - 20 iterací mocninné metody
     - Řešení CMFD soustavy přímou metodou
   - Nodální výpočet pro zpřesnění
     - Využití symetrie AZ (výpočet pouze v 1/6 reaktoru)

20×

Porovnání výsledků

	$\max_{\mathcal{V}_i} \Delta \bar{\bar{\bar{P}}}_i$	Δk_{eff}	čas [s]	špičkové využití paměti [MB]
FMFD	0.00%	0.00%	2752	1344.77
CMFD	4.36%	0.012%	87	27.58





Přehled

- Motivace
- Matematický model
- Numerický model
- Algoritmus
- Výsledky a srovnání
- **Závěr**

Shrnutí

- Analýza jaderných reaktorů založena na znalosti rozložení neutronového toku

Shrnutí

- Analýza jaderných reaktorů založena na znalosti rozložení neutronového toku
- Dvougrupový difúzní model je dobrým kompromisem mezi použitelností a efektivitou výpočtu

Shrnutí

- Analýza jaderných reaktorů založena na znalosti rozložení neutronového toku
- Dvougrupový difúzní model je dobrým kompromisem mezi použitelností a efektivitou výpočtu
- Hrubosíťové konečně-diferenční aproximace na úrovni celé AZ

Shrnutí

- Analýza jaderných reaktorů založena na znalosti rozložení neutronového toku
- Dvougrupový difúzní model je dobrým kompromisem mezi použitelností a efektivitou výpočtu
- Hrubosíťové konečně-diferenční aproximace na úrovni celé AZ + zpřesňující nodální výpočty na dvojicích kazet (semi-analyticky)

Shrnutí

- Analýza jaderných reaktorů založena na znalosti rozložení neutronového toku
- Dvougrupový difúzní model je dobrým kompromisem mezi použitelností a efektivitou výpočtu
- Hrubosíťové konečně-diferenční aproximace na úrovni celé AZ + zpřesňující nodální výpočty na dvojicích kazet (semi-analyticky) = dostatečně přesné a rychlé řešení

Shrnutí

- Analýza jaderných reaktorů založena na znalosti rozložení neutronového toku
- Dvougrupový difúzní model je dobrým kompromisem mezi použitelností a efektivitou výpočtu
- Hrubosíťové konečně-diferenční aproximace na úrovni celé AZ + zpřesňující nodální výpočty na dvojicích kazet (semi-analyticky) = dostatečně přesné a rychlé řešení
- Nodální úlohy získány metodou příčné integrace

Shrnutí

- Analýza jaderných reaktorů založena na znalosti rozložení neutronového toku
- Dvougrupový difúzní model je dobrým kompromisem mezi použitelností a efektivitou výpočtu
- Hrubosíťové konečně-diferenční aproximace na úrovni celé AZ + zpřesňující nodální výpočty na dvojicích kazet (semi-analyticky) = dostatečně přesné a rychlé řešení
- Nodální úlohy získány metodou příčné integrace ⇒ příčné únikové členy

Shrnutí

- Analýza jaderných reaktorů založena na znalosti rozložení neutronového toku
- Dvougrupový difúzní model je dobrým kompromisem mezi použitelností a efektivitou výpočtu
- Hrubosíťové konečně-diferenční aproximace na úrovni celé AZ + zpřesňující nodální výpočty na dvojicích kazet (semi-analyticky) = dostatečně přesné a rychlé řešení
- Nodální úlohy získány metodou příčné integrace $\Rightarrow$ příčné únikové členy $\Rightarrow$ komplikace na šestiúhelníkových oblastech

Shrnutí

- Analýza jaderných reaktorů založena na znalosti rozložení neutronového toku
- Dvougrupový difúzní model je dobrým kompromisem mezi použitelností a efektivitou výpočtu
- Hrubosíťové konečně-diferenční aproximace na úrovni celé AZ + zpřesňující nodální výpočty na dvojicích kazet (semi-analyticky) = dostatečně přesné a rychlé řešení
- Nodální úlohy získány metodou příčné integrace ⇒ příčné únikové členy ⇒ komplikace na šestiúhelníkových oblastech
- Problém lze vyřešit při zachování konzistence původní 3D a nodálních 1D úloh

Vybrané zdroje

Y. A. Chao and Y. A. Shatilla
Conformal Mapping and Hexagonal Nodal Methods – II: Implementation in the ANC-H Code
Nucl. Sci. Eng., 121:210–225, October 1995.

Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

M. R. Wagner
Three-Dimensional Nodal Diffusion and Transport Theory Methods for Hexagonal-z Geometry.
Nucl. Sci. Eng., 103:377–391, May 1989.

Vybrané zdroje

Y. A. Chao and Y. A. Shatilla
Conformal Mapping and Hexagonal Nodal Methods – II: Implementation in the ANC-H Code
Nucl. Sci. Eng., 121:210–225, October 1995.

Xue Dong Fu and Nam Zin Cho
Nonlinear Analytic and Semi-Analytic Nodal Methods for Multigroup Neutron Diffusion Calculations.
J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo, Jpn.), 39(10):1015–1025, October 2002.

M. R. Wagner
Three-Dimensional Nodal Diffusion and Transport Theory Methods for Hexagonal-z Geometry.
Nucl. Sci. Eng., 103:377–391, May 1989.

— Děkuji za pozornost —

Výzkum byl podporován projektem 1M0545 a výzkumným záměrem MSM 4977751301