Moderní numerické metody pro neutroniku a sdružené úlohy

Milan Hanuš (mhanus@kma.zcu.cz)

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Motivace

- Přesná simulace jaderného reaktoru vyžaduje zachycení mnoha provázaných fyzikálních jevů ⇒ přirozeně nelineární úloha.
- Tyto jevy lze zhruba zařadit do následujících 4 oblastí, z nichž se dále (velmi zjednodušeně) zaměříme pouze na první dvě.

Neutronika - rozložení neutronového toku $\varphi = \varphi(\mathbf{x}, \mathbf{\Omega}, E, t)$

- monoenergetická difúzní aproximace
- rychlá transienta (~~změna izotop. složení~~, ~~zpožděné neutr.~~): dominantní teplotní vazba skrze Dopplerův efekt

$$\frac{1}{v}\frac{\partial \varphi}{\partial t} - \nabla \cdot D \nabla \varphi + \left[\Sigma_r(T) - \nu \Sigma_f\right]\varphi = q_\varphi$$

Vedení tepla - Rozložení teploty $T = T(\mathbf{x}, t)$ v palivu

- ovlivňuje neutroniku, proudění chladiva i str. namáhání
- přestup tepla mezi palivem a chladivem je základním omezujícím faktorem pro provozní výkon reaktoru

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot k(T) \nabla T - \kappa \Sigma_f \varphi = q_T$$

Termohydraulika - vývoj proudového pole chladiva/moder.

Strukturální mechanika - termoelasticita struktur aktivní zóny

Metoda štěpení operátorů

Řešení jednotlivých fyzikálních modelů prostředky speciálně vyvinutými pro každý z nich zvlášť. Např.

Neutronika – nodální metoda

Teplo – konečné diference

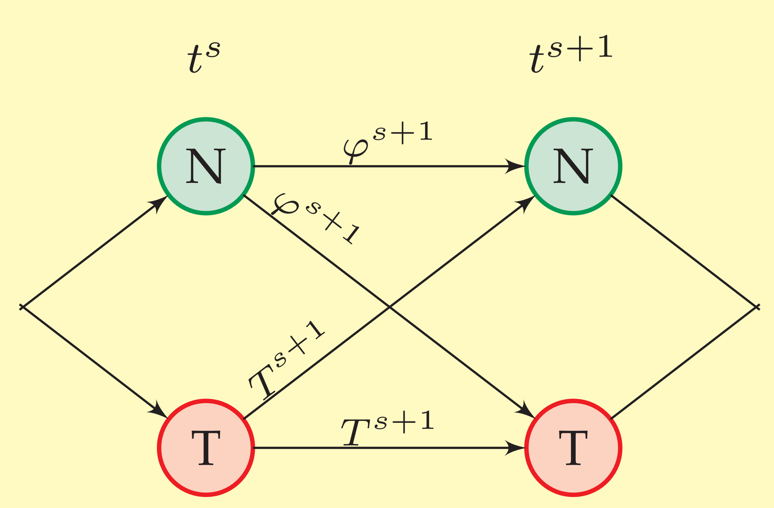
Proudění – konečné objemy

Termoelasticita – konečné prvky (FEM)

(+) využití existujících ověřených kódů

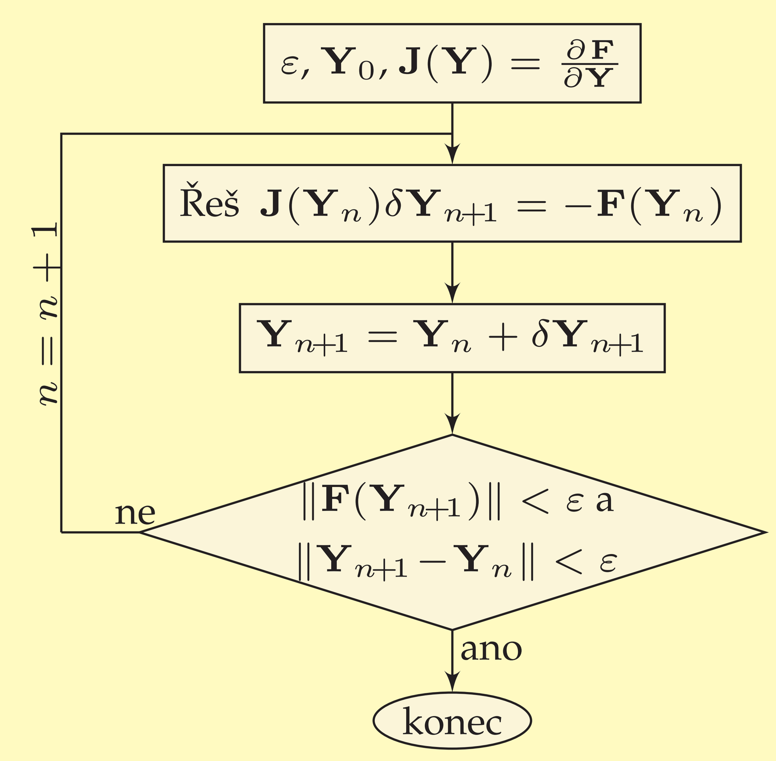
(–) netriviální datové přenosy mezi kódy

(–) ztráta nelinearity řešeného problému



Jednolité řešení sdružené úlohy

- Jednotná diskretizace všech modelů: F E M
- Řešení nelineární soustavy: $\mathbf{F}(\mathbf{Y}) = \mathbf{0}$



(+) flexib. prostorová i časová diskretizace

(+) snadné přidružení dalších modelů

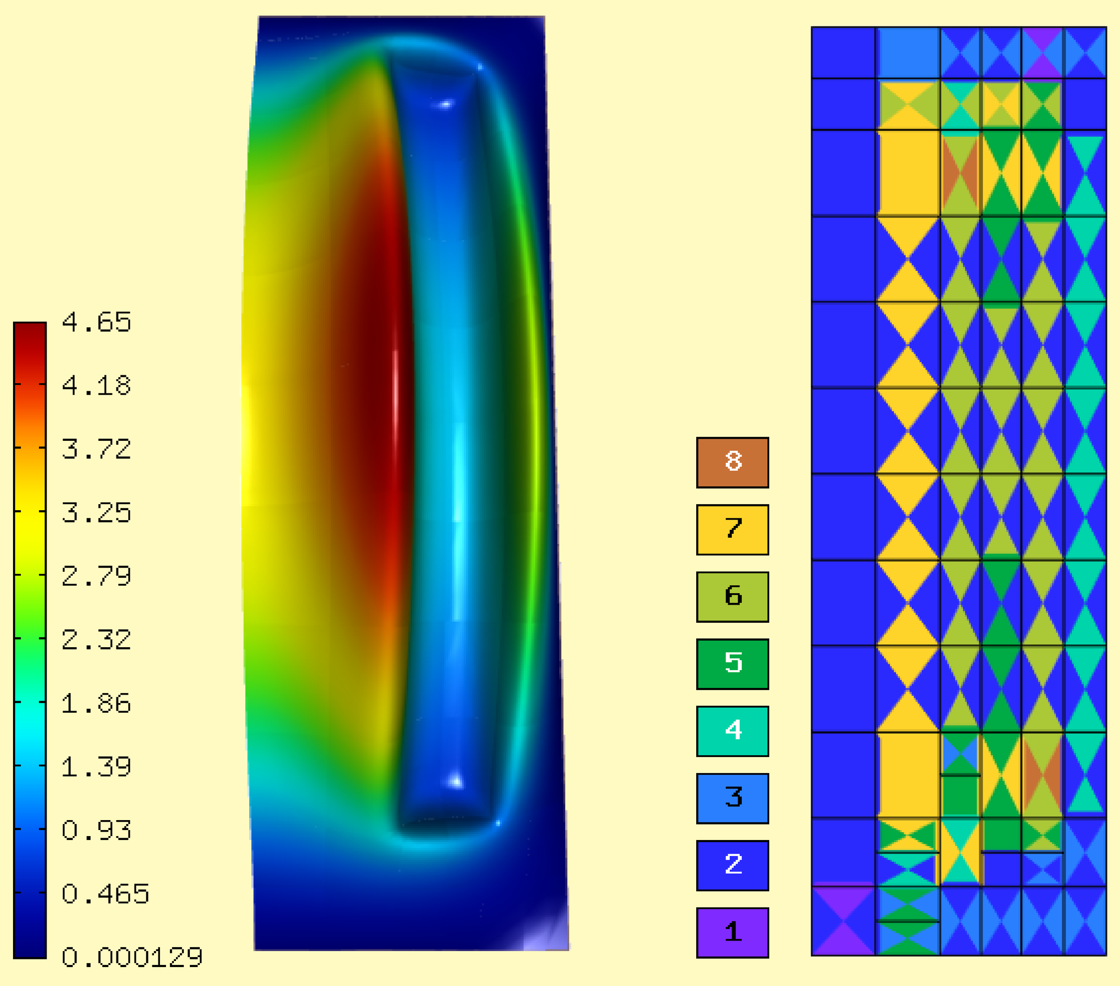
(+) řešení respektuje nelinearitu úlohy

(–) zvýšení počtu neznámých ⇒ potřeba

- efektivních řešičů soustav
- efektivní automatické adaptivity

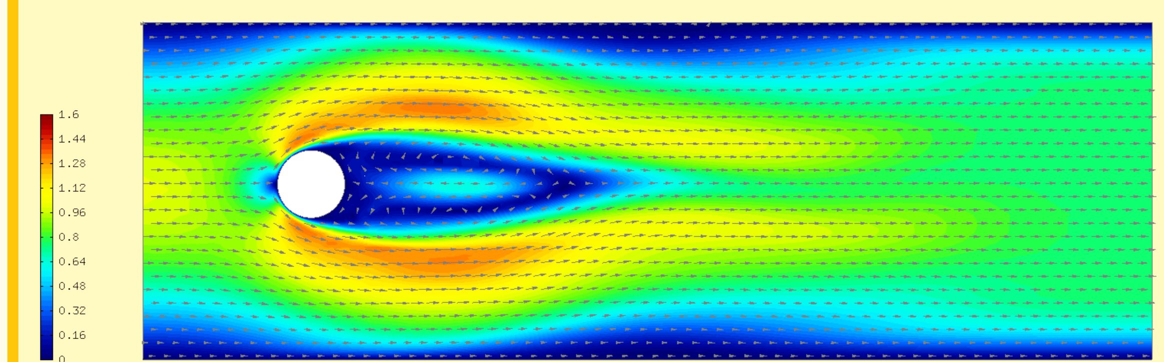
Ukázka praktického použití FEM

- Řešeno balíkem Hermes (http://hpfem.org)
- VHTR – 4-grupový výpočet, kritická úloha

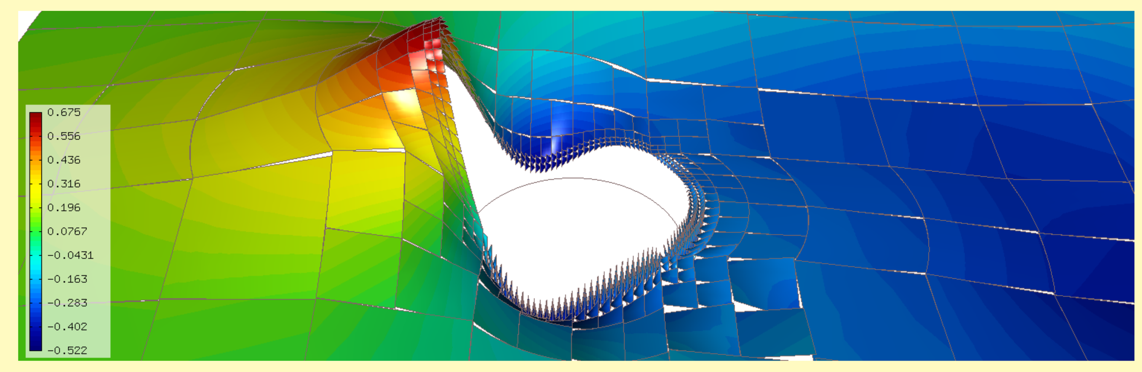


φ_{thermal} výsledná výpočetní síť

- Laminární nestlačitelné proudění (NS)



rychlostní pole, $t = 20$ s, spojitá aproximace



tlakové pole, $t = 20$ s, nespojitá aproximace

Neutronika/teplo – slabá formulace

- Implicitní Eulerova metoda: $\dfrac{\partial f}{\partial t} \approx \dfrac{f^r - f^{r-1}}{\Delta t}$, $f^r \overset{\text{ozn.}}{=} f(\mathbf{x}, t^r)$
- v čase t^s: $\mathbf{F}^s(\mathbf{Y}^s) = \begin{bmatrix} \mathbf{F}^s_\varphi(\mathbf{Y}^s) \\ \mathbf{F}^s_T(\mathbf{Y}^s) \end{bmatrix} = \mathbf{0}$, $\quad \mathbf{Y}^s = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}^s_\varphi \\ \mathbf{Y}^s_T \end{bmatrix}$, $\quad \mathbf{Y}^s_\varphi$ reprezentuje $\varphi^s \overset{\text{ozn.}}{=} \varphi(\mathbf{x}, t^s)$, $\mathbf{Y}^s_T$ reprezentuje $T^s \overset{\text{ozn.}}{=} T(\mathbf{x}, t^s)$

$$F^s_{\varphi,i}(\mathbf{Y}) = \int_V \left[\frac{1}{v\Delta t}\left(\varphi^s - \varphi^{s-1}\right)\Phi_i + D\nabla\varphi^s\nabla\Phi_i + \left(\Sigma_r(T^s) - \nu\Sigma_f\right)\varphi^s\Phi_i - q_\varphi\Phi_i\right] \mathrm{d}V$$

$$F^s_{T,j}(\mathbf{Y}) = \int_V \left[\frac{\rho c_p}{\Delta t}\left(T^s - T^{s-1}\right)\Theta_j + k(T^s)\nabla T^s\nabla\Theta_j - \kappa\Sigma_f\varphi^s\Theta_j - q_T\Theta_j\right] \mathrm{d}V$$

s vhodně vybranými funkcemi $\{\Phi_i\}$, $\{\Theta_j\}$.

Řešení ukázkové úlohy – adaptace v čase $t_{\text{fin}} = 3$ s: – porovnání s přesným řeš.:

φ:

T: