

Teplotní pole - ilustrativní příklady

Modelování multifyzikálních problémů

Katedra elektrotechniky a počítačového modelování
Elektrotechnická fakulta
Západočeská univerzita v Plzni

25. května 2021

1 Typické příklady z teplotního pole

- Prostup tepla izolací
- Prostup tepla vícevrstvou izolací
- Prostup tepla izolací s uvažováním konvekce
- Přímý ohřev duté trubky s konvekcí
- Výkonový tranzistor
- Kotoučová brzda

2 Ukázky využití indukčního ohřevu v praxi

- Indukční ohřev měděného biletu
- Posuvný indukční ohřev feromagnetického dílu
- Návrh induktoru pro pájení

Typické příklady z teplotního pole

Typické příklady z teplotního pole (analytické řešení)

- Prostup tepla izolací
- Prostup tepla vícevrstvou izolací
- Prostup tepla izolací s uvažováním konvekce
- Přímý ohřev duté trubky s konvekcí

Praktické příklady z teplotního pole

- Výkonový tranzistor
- Kotoučová brzda



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



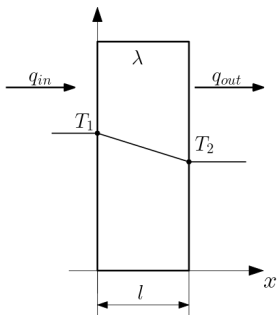
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Typické příklady z teplotního pole

Prostup tepla izolací

Uvažujme izolační desku o tloušťce l , s tepelnou vodivostí λ , kterou prochází tepelný tok. Teplota na vstupní straně je T_1 a na výstupní straně T_2 .



podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Jedná se o ustálený stav, vyjdeme z Laplaceovy rovnice

$$\Delta T = 0.$$

Předpokládáme, že tok dopadá homogenně na celou vstupní stranu a deska je rovná, pak platí nulové derivace pro osy y a z .

Dostaneme tedy rovnici

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0.$$

Integrací dostaneme

$$\frac{\partial T}{\partial x} = k_1.$$

Odtud je patrné, že směrnice změny teploty je konstanta a jedná se tedy o přímku.

Typické příklady z teplotního pole

Prostup tepla izolací

Druhou derivací pak dostaneme řešení

$$T = k_1 \cdot x + k_2 .$$

kde k_1 a k_2 jsou integrační konstanty, které získáme z okrajových podmínek.

Pro $x = 0$ dostáváme rovnici

$$T_1 = k_1 \cdot 0 + k_2 \implies k_2 = T_1 ,$$

pro $x = l$ pak

$$T_2 = k_1 \cdot l + k_2 \implies k_1 = \frac{T_2 - T_1}{l} .$$

Dosazením pak dostaneme vztah popisující změnu teploty

$$T = \frac{T_2 - T_1}{l} \cdot x + T_1 .$$

Z tohoto vztahu se dá odvodit výraz pro výpočet tepelného toku. Elementární tok dq , který projde plochou dS je

$$dq = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dS = -\lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{T_2 - T_1}{l} x + T_1 \right) dS .$$

Při rovinné geometrii a zanedbání okrajových jevů pak lze celkový tok definovat jako

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{l} S .$$

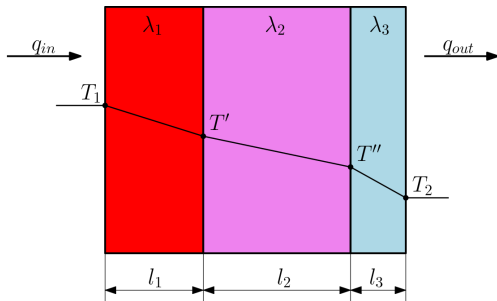
V analogii s Ohmovým zákonem lze výraz ještě upravit do následujícího tvaru

$$q = (T_1 - T_2) \frac{\lambda S}{l} = \frac{T_1 - T_2}{R} .$$

Typické příklady z teplotního pole

Prostup tepla vícevrstvou izolací

Výsledky odvozené v předchozím příkladu lze aplikovat i na vícevrstvé izolace. Plocha S je u všech vrstev stejná, liší se tloušťky a tepelné vodivosti. V ustáleném stavu bude vrstvami procházet totožný tepelný tok q .



podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Na základě dříve odvozeného řešení pro tepelný tok lze definovat pro jednotlivé vrstvy vztahy

$$q = \lambda_1 \frac{T_1 - T'}{l_1} S,$$

$$q = \lambda_2 \frac{T' - T''}{l_2} S,$$

$$q = \lambda_3 \frac{T'' - T_2}{l_3} S.$$

Ustálený tepelný tok celou izolací lze pak kombinací zápisu pro jednotlivé vrstvy definovat jako

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{l_1}{\lambda_1 S} + \frac{l_2}{\lambda_2 S} + \frac{l_3}{\lambda_3 S}} = \frac{T_1 - T_2}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Je tedy patrné, že izolační vrstvy řazené za sebou se z hlediska tepelných odporů chovají zcela analogicky k odporům elektrickým.



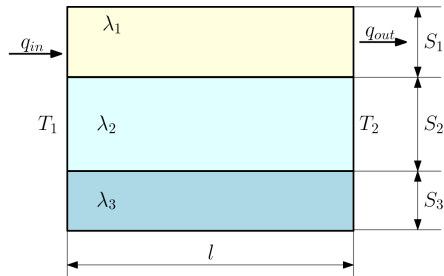
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Typické příklady z teplotního pole

Prostup tepla vícevrstvou izolací

Izolační vrstvy mohou být řazeny i paralelně ke směru přenosu tepelného toku (v praxi se nepoužívá).



Protože u paralelního vrstvení izolace je rozdílná plocha, na kterou tok dopadá platí

$$q = q_1 + q_2 + q_3 .$$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Pro jednotlivé vrstvy definujeme ze známého vztahu

$$q_1 = (T_1 - T_2) \frac{\lambda_1 S_1}{l} ,$$

$$q_2 = (T_1 - T_2) \frac{\lambda_2 S_2}{l} ,$$

$$q_3 = (T_1 - T_2) \frac{\lambda_3 S_3}{l} ,$$

Celkový tok pak lze zapsat jako

$$q = (T_1 - T_2) \left(\frac{\lambda_1 S_1}{l} + \frac{\lambda_2 S_2}{l} + \frac{\lambda_3 S_3}{l} \right) .$$

Pokud bychom opět analogicky k elektrickým veličinám definovali tepelnou vodivost $G = \frac{1}{R}$ lze vztah upravit

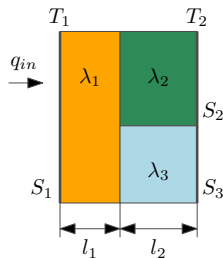
$$q = (T_1 - T_2) (G_1 + G_2 + G_3) .$$

podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Typické příklady z teplotního pole

Prostup tepla vícevrstvou izolací

Izolační vrstvy mohou být řazeny v obecné sério-paralelní kombinaci.



Pro odpory jednotlivých vrstev platí

$$R_1 = \frac{l_1}{\lambda_1 S_1}, R_2 = \frac{l_2}{\lambda_2 S_2}, R_3 = \frac{l_3}{\lambda_3 S_3}.$$

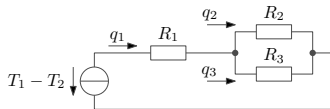
Celkový odpor lze vyjádřit ve tvaru

$$R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}.$$

Celkový tok pak lze zapsat jako

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R}.$$

Z analogie lze původní obrázek vyjádřit ve formě ekvivalentního obvodu

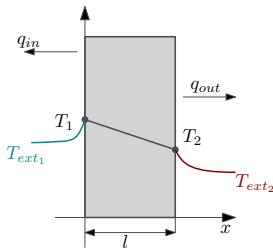


Rozdíl $T_1 - T_2$ odpovídá elektrickému napětí U a tok q elektrickému proudu. Lze konstatovat, že rovněž platí Kirchhoffovy zákony a metody analýzy elektrických obvodů.

Typické příklady z teplotního pole

Prostup tepla izolací s uvažováním konvekce

Uvažujme izolační desku o tloušťce l , s tepelnou vodivostí λ , kterou prochází tepelný tok. Fyzikálně reálnější je na vstupní a výstupní straně uvažovat přestup tepla do okolního média. Znalost teplot T_1 a T_2 je tak nahrazena konvekční okrajovou podmínkou.



podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Jedná se o ustálený stav, vyjdeme z Laplaceovy rovnice

$$\Delta T = 0.$$

Předpokládáme, že tok dopadá homogenně na celou vstupní stranu a deska je rovná, pak platí nulové derivace pro osy y a z .

Dostaneme tedy rovnici

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0.$$

Integrací dostaneme

$$\frac{\partial T}{\partial x} = k_1.$$

Odtud je patrné, že směrnice změny teploty je konstanta a jedná se tedy o přímku.

Typické příklady z teplotního pole

Prostup tepla izolací s uvažováním konvekce

Druhou derivací pak dostaneme řešení

$$T(x) = k_1 \cdot x + k_2 .$$

kde k_1 a k_2 jsou integrační konstanty.

Pro řešení vycházíme z okrajové podmínky pro konvekci (záporné znaménko značí odvod tepla směrem ven):

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T - T_{\text{ext}}).$$

Dosazením vztahu pro řešení $T(x)$ a $\frac{\partial T}{\partial x}$ pak dostaneme:

$$-\lambda k_1 = \alpha(k_1 \cdot x + k_2 - T_{\text{ext}})$$

V případě odvodu tepla potom získáme pro $x = 0$:

$$-\lambda(-k_1) = \alpha_1(k_1 \cdot 0 + k_2 - T_{\text{ext}_1}),$$

$$\lambda \cdot k_1 = \alpha_1(k_2 - T_{\text{ext}_1}),$$

neboť derivace ve směru normály je na této hraně záporná.

Pro odvod tepla konvekcí pro $x = l$ je také potřeba zohlednit orientaci toku jako vektorové veličiny, pak obdržíme:

$$-\lambda \cdot k_1 = \alpha_2(k_1 \cdot l + k_2 - T_{\text{ext}_2})$$

Integrační konstanty k_1 a k_2 získáme z okrajové podmínky, potom získáme soustavu rovnic:

$$\begin{bmatrix} -\lambda & \alpha_1 \\ \lambda + \alpha_2 l & \alpha_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 T_{\text{ext}_1} \\ \alpha_2 T_{\text{ext}_2} \end{bmatrix} .$$



EVROPSKÁ UNIE
Evropská strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

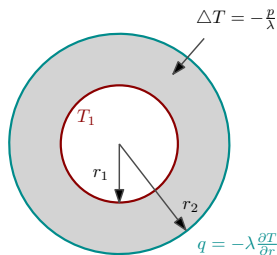


podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Typické příklady z teplotního pole

Přímý ohřev duté trubky s konvekcí

Kromě prostupu tepla rovinnou geometrií se velmi často setkáváme s geometrií válcového tvaru. Uvažujme dutý vodič z vodivého materiálu ohříváný vnitřními ztrátami p . Uvnitř je protékán chladicí vodou cirkulující přes výměník o konstantní teplotě T_1 . Na vnější straně uvažujeme konvekci tepla do okolního prostředí definovanou teplotou okolí T_{ext} a koeficientem přestupu tepla α .



Pro popis teploty přímého ohřevu vycházíme z Poissonovy rovnice ve tvaru:

$$\Delta T = -\frac{p}{\lambda}.$$

Jednorozměrné řešení této rovnice v radiálním směru lze zapsat jako:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{p}{\lambda}.$$

Rovnici zintegrujeme

$$r \frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{p}{\lambda} \frac{r^2}{2} + k_1.$$

Upravíme

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{p}{\lambda} \frac{r}{2} + \frac{k_1}{r}.$$

Typické příklady z teplotního pole

Přímý ohřev duté trubky s konvekcí

Po integraci získáme obecné řešení pro teplotu

$$T(r) = -\frac{pr^2}{4\lambda} + k_1 \ln r + k_2,$$

kde k_1 a k_2 jsou integrační konstanty.

Potom pro $r = r_1$:

$$T_1 = -\frac{pr_1^2}{4\lambda} + k_1 \ln r_1 + k_2,$$

Pro řešení $r = r_2$ vycházíme z okrajové podmínky pro konvekci:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T - T_{\text{ext}}).$$

Dosažením

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{p}{\lambda} \frac{r}{2} + \frac{k_1}{r_2}$$

do předchozího vztahu získáme:

$$-\frac{pr_2}{2\lambda} + \frac{k_1}{r_2} = \frac{\alpha(T_{\text{ext}} - T_2)}{\lambda},$$

kde

$$T_2 = -\frac{pr_2^2}{4\lambda} + k_1 \ln r_2 + k_2.$$

Integrační konstanty k_1 a k_2 pak získáme řešením soustavy rovnic:

$$\begin{bmatrix} \ln r_1 & 1 \\ \frac{1}{r_2} + \frac{\alpha}{\lambda} \ln r_2 & \frac{\alpha}{\lambda} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 + \frac{pr_1^2}{4\lambda} \\ \frac{pr_2}{2\lambda} + \frac{\alpha T_{\text{ext}}}{\lambda} + \frac{\alpha pr_2^2}{4\lambda^2} \end{bmatrix}$$



EVROPSKÁ UNIE
Podpora inovací a rozvoje
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



podklady byly zhotoveny za podpory projektu
ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Typické příklady z teplotního pole

Výkonový tranzistor

Výkonový tranzistor

Vlivem průchodu elektrického proudu se tranzistor zahřívá a je nutné ho chladit. Chladič musí být navržen tak, aby teplota čipu nepřesáhla požadovanou teplotu 90 °C.

Elektrické proudové pole je popsáno rovnicí ve tvaru

$$\operatorname{div} \gamma \operatorname{grad} \varphi = 0$$

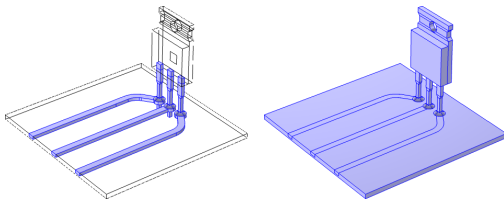
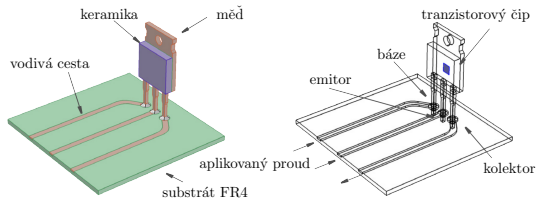
doplněnou o okrajové podmínky známé proudové hustoty na bázi, kolektoru a emitoru.

Teplotní pole je popsáno rovnicí ve tvaru

$$\operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} T) = -w,$$

doplněnou o okrajové podmínky konvekce. Člen

$w = \frac{J^2}{\gamma}$ představuje ztráty získané z řešení proudového pole.



Oblast pro řešení proudového a teplotního pole



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

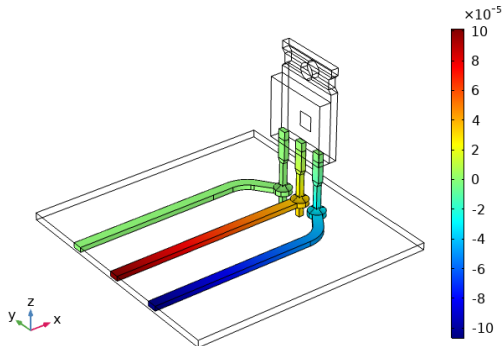


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Typické příklady z teplotního pole

Výkonový tranzistor



Rozložení elektrického potenciálu



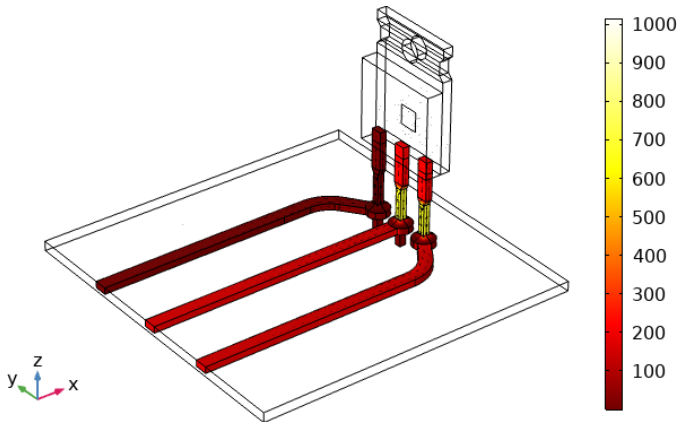
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Typické příklady z teplotního pole

Výkonový tranzistor



Rozložení Jouleových ztrát



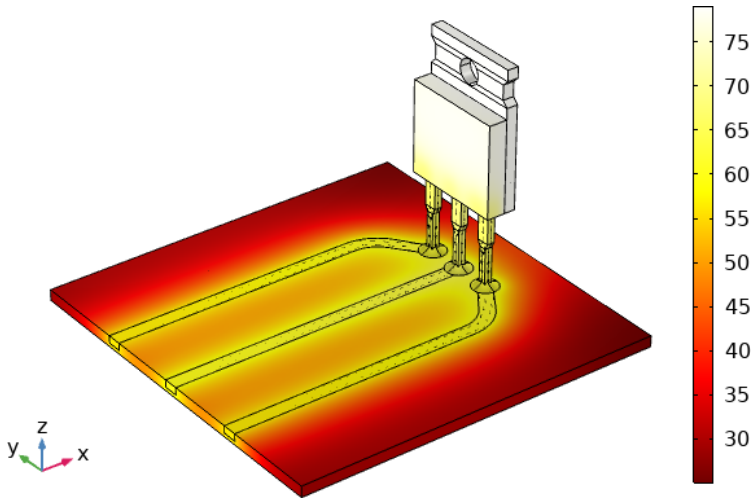
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Typické příklady z teplotního pole

Výkonový tranzistor



Rozložení teploty (maximální teplota je 81 °C)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy



podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013230)

Typické příklady z teplotního pole

Kotoučová brzda

Kotoučová brzda

Vozidlo o hmotnosti 1800 kg se pohybuje rychlostí 90 km/h.
Řidič zabrzdí po dobu 2 sekund sníží rychlost na 25 km/h.
Poloměr disku je 14 cm a tloušťka 13 mm.

Teplotní pole je popsáno časově proměnnou rovnicí ve tvaru

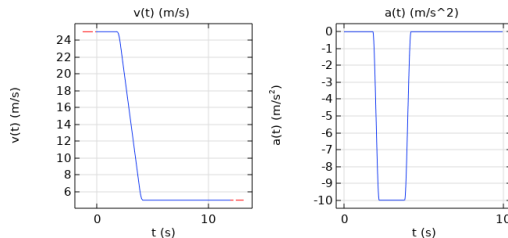
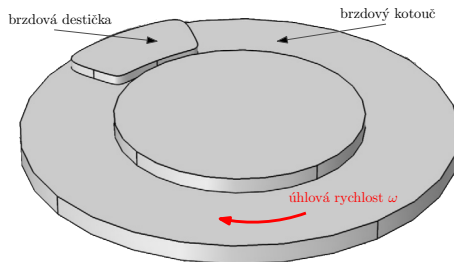
$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} T \right) - w,$$

doplněnou o okrajové podmínky konvekce a radiace. Člen w představuje ztráty úměrné změně kinetické energie.
Pohybový člen obsahuje výraz

$$v_x = \frac{-y \cdot v(t)}{R} \quad \text{a} \quad v_y = \frac{x \cdot v(t)}{R},$$

kde R je poloměr disku a $v(t)$ časový průběh rychlosti.

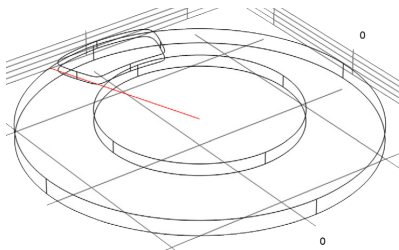
podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)



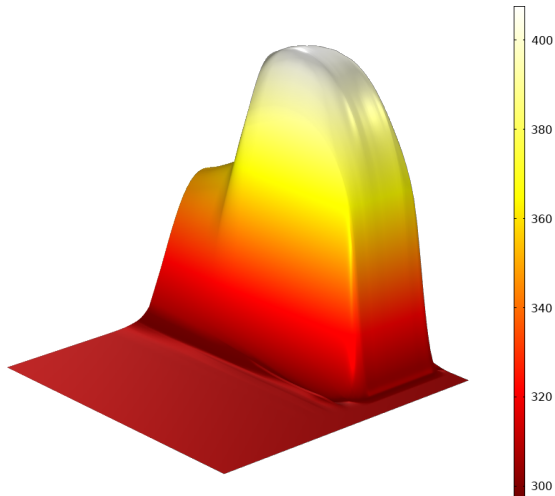
Předepsaný časový profil rychlosti a zrychlení

Typické příklady z teplotního pole

Kotoučová brzda



podklady byly zhotoveny za
podpory projektu ESF II
(reg. č.
CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)



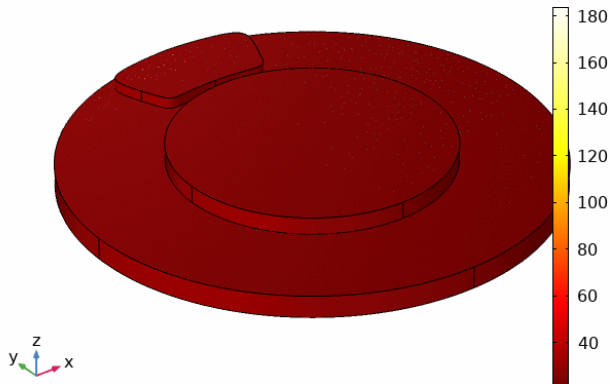
Teplotní profil podél červené linie

Typické příklady z teplotního pole

Kotoučová brzda

Time=0 s

Surface: Temperature (degC)



Časový průběh rozložení teploty



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy



podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(roz. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0012220)

Ukázky využití indukčního ohřevu v praxi

Ukázky využití indukčního ohřevu v praxi

- Indukční ohřev měděného biletu
- Posuvný indukční ohřev feromagnetického dílu
- Návrh induktoru pro pájení



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Ukázky využití indukčního ohřevu v praxi

Indukční ohřev měděného biletu

Typickým příkladem indukčního ohřevu je ohřev biletu, tedy vodivé vsázky v induktoru kruhového respektive válcového tvaru (solenoidu). Například ohřev měděného biletu.

Společným řešením elektromagnetického

$$\Delta \underline{A} - j\omega\gamma\mu\underline{A} = -\mu\underline{J}_{\text{ext}},$$

a teplotního pole

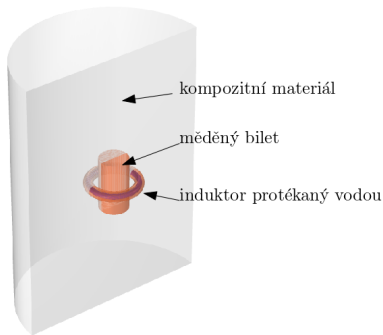
$$\text{div} (\lambda \text{grad } T) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - w,$$

je možné respektovat i teplotní nelinearitu elektrické vodivosti mědi definovanou vztahem

$$\gamma(T) = \frac{1}{\rho_0 (1 + \alpha (T - T_0))},$$

kde ρ_0 je rezistivita, α teplotní koeficient rezistivity a T_0 je referenční (výchozí) teplota.

podklady byly zhotoveny za podpory
projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)



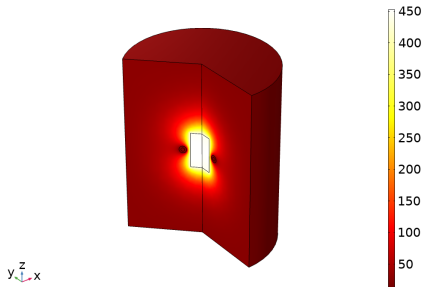
Induktor je chlazení vodou s turbulentním prouděním

$$Q_c = \frac{\frac{dM}{dt} c_p (T_{\text{in}} - T)}{2\pi r S},$$

kde $\frac{dM}{dt}$ je hmotnostní průtok chladicí vody, T_{in} je teplota na vstupu, S je průřez kanálu a r je souřadnice.

Ukázky využití indukčního ohřevu v praxi

Indukční ohřev měděného biletu



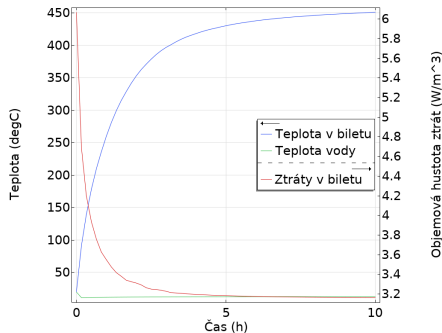
Rozložení teploty



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



Vývoj teploty a objemových ztrát ve středu biletu v čase

podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Ukázky využití indukčního ohřevu v praxi

Posuvný indukční ohřev feromagnetického dílu

Pomocí numerického modelu je možné řešit i posuvný indukční ohřev. Rychlost posunu je zpravidla zanedbatelná vůči rychlosti časové změny harmonického průběhu. Proto je v popisu obou polí zanedbán posuvný člen.

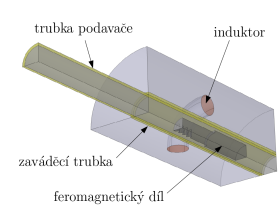
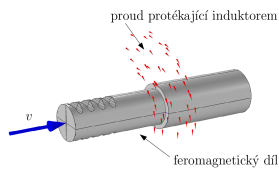
Je tak možné posun řešit pomocí posunu sítě. V COMSolu je tak nutné vytvořit kontaktní problém. plochy obou částí, které jsou v kontaktu ale budou posouvány vůči sobě jsou definovány jako tzv. identický pár.

Vsázka v podobě feromagnetického dílu je posouvána rychlostí v skrz toroidní cívku o N závitů protékanou proudem I s frekvencí f .

Problém je analyzován pro dvě různé frekvence s důrazem na potřebnou změnu sítě.

$$f_1 = 1 \text{ kHz}$$

$$f_2 = 25 \text{ kHz}$$



podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

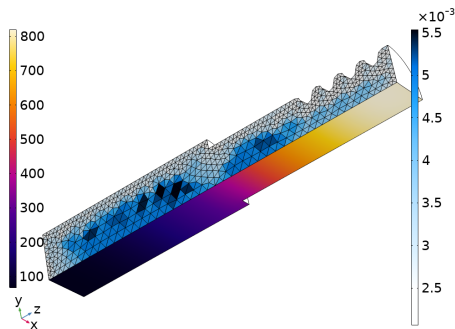


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Ukázky využití indukčního ohřevu v praxi

Posuvný indukční ohřev feromagnetického dílu



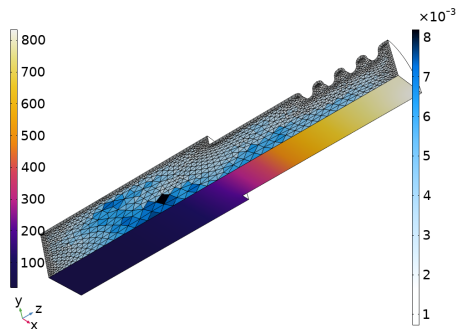
Velikost elementů sítě ve vsázce a rozložení teploty pro $f = 1$ kHz



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

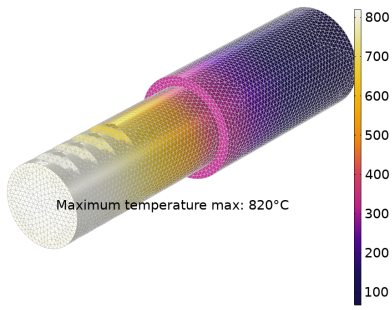


Velikost elementů sítě ve vsázce a rozložení teploty pro $f = 25$ kHz

podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Ukázky využití indukčního ohřevu v praxi

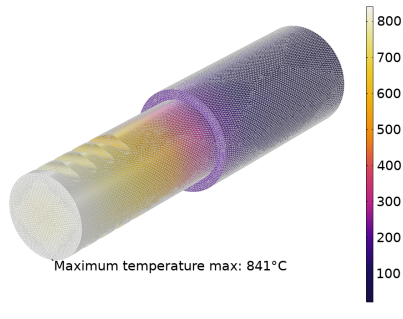
Posuvný indukční ohřev feromagnetického dílu



Rozložení teploty pro $f = 1$ kHz



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

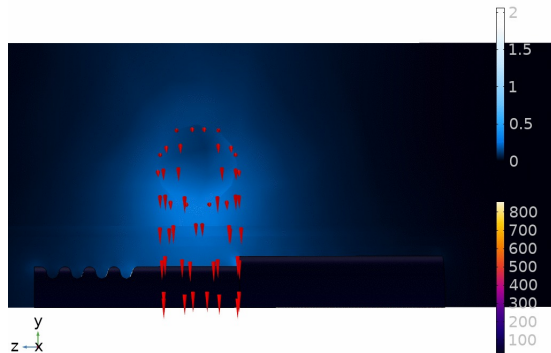


Rozložení teploty pro $f = 25$ kHz

podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Ukázky využití indukčního ohřevu v praxi

Posuvný indukční ohřev feromagnetického dílu



Posun vsázky induktorem



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Ukázky využití indukčního ohřevu v praxi

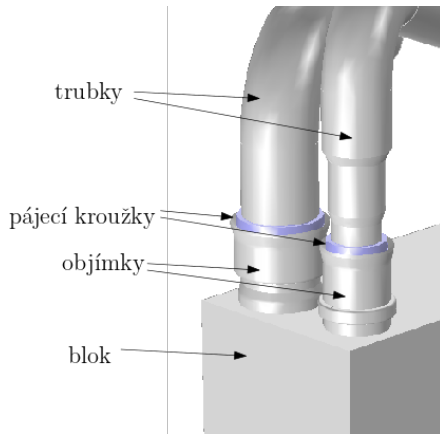
Návrh induktoru pro pájení

Tento návrh byl realizován jako projekt smluvního výzkumu s konkrétním průmyslovým partnerem.

Zákazník přišel s požadavkem návrhu, optimalizace a prototypové výroby induktoru pro speciální aplikaci pájení hliníku.

Přišel s daným tvarem pájených komponent a dalšími limity které bylo nutno dodržet:

- daný maximální čas procesu
- dosažení přesné požadované teploty pájení
 $T_{\max} \pm 20^{\circ}\text{C}$
- maximální absorbovaný výkon (omezen výkonem zdroje)
- zdrojem omezené pásmo frekvence - tedy impedance induktoru
- výrobní opakovatelnost a přesnost



podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

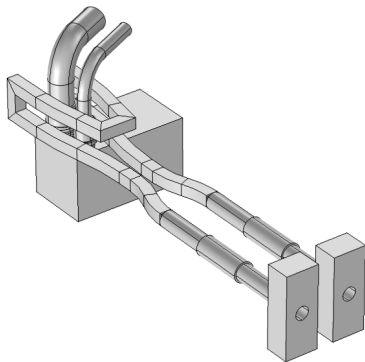


Ukázky využití indukčního ohřevu v praxi

Návrh induktoru pro pájení

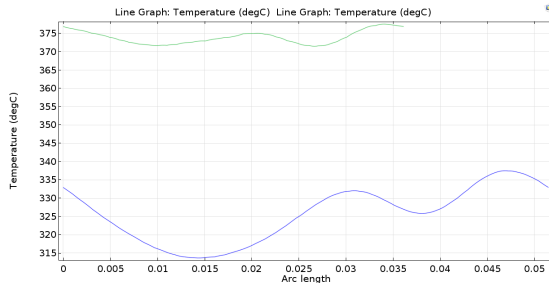
Z předchozího projektu jsme znali chování induktoru z Cu profilu 8×8 mm v kombinaci se zdrojem a linkou zákazníka.

Z těchto informací jsme vyšli a zkusili jako první navrhnout přibližný tvar z tohoto profilu.



Důležité bylo se impedančně příliš neodchýlit, aby se induktor v procesu pájení se vsázkou nacházel v optimálním frekvenčním oknu a bylo tak možné využít plný potenciál zdroje.

Dalším důležitým faktorem bylo ideálně současné roztavení obou pájecích kroužků po celém obvodu. Z toho důvodu bylo v modelu nutné sledovat teplotu po obvodu obou kroužků.



podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

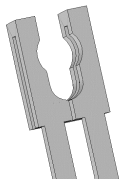


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

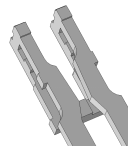


Ukázky využití indukčního ohřevu v praxi

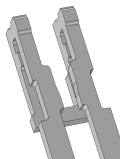
Návrh induktoru pro pájení



varianta 1



varianta 3



varianta 2

Bylo tedy zvoleno několik návrhů a provedena analýza pomocí numerického modelu. Nejblíže požadovaným parametrům byla varianta třetí, která se dále upravovala a přepočítávala s ohledem na další detailní srovnání a doladění požadavků.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

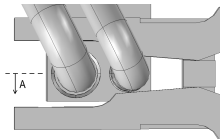


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

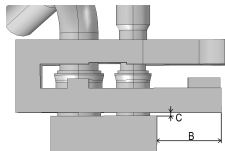
podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Ukázky využití indukčního ohřevu v praxi

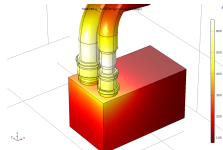
Návrh induktoru pro pájení



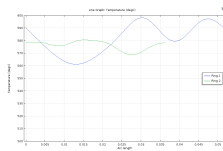
Finální varianta – horní pohled



Finální varianta – boční pohled



Finální varianta – rozložení tepla



Finální varianta – srovnání teploty na kroužcích



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

podklady byly zhotoveny za podpory projektu ESF II
(reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239)

Děkuji za pozornost

Katedra elektrotechniky a počítačového modelování
Elektrotechnická fakulta
Západočeská univerzita v Plzni