TODO!!!

Definice 0.1 (Lineární PDR)

Parciální diferenciální rovnice (PDR) je lineární, jde-li ji zapsat ve tvaru

$$\sum_{|\alpha| \leqslant m, \alpha \in (\mathbb{N}_0)^n} a_\alpha D^\alpha u = f$$

pro neznámou funkci u, $f(x)$ a $a_\alpha(x)$ je dáno ($x \in \Omega \in \mathbb{R}^n$).

Je-li $f \equiv 0$, pak říkáme, že PDR je homogenní (bez pravé strany). Pokud a_α jsou konstanty, pak říkáme, že PDR je s konstantními koeficienty.

Definice 0.2 (Semilineární PDR)

Semilineární rovnice má tvar

$$\sum_{|\alpha|=m} a_\alpha D^\alpha u + b = 0,$$

kde $a(x)$ a $b(x, u, \nabla u, \ldots, \nabla^{n-1} u)$ je dáno.

Definice 0.3 (Kvazilineární PDR)

Kvazilineární rovnice je

$$\sum_{|\alpha|=m} a_\alpha D^\alpha u + f = 0,$$

kde $a_\alpha(x, u, \nabla u, \ldots, \nabla^{m-1} u)$ a $f(x, u, \nabla u, \ldots, \nabla^{m-1} u)$ je dáno.

Definice 0.4 (Řád rovnice)

m v předchozích definicích nazýváme řád rovnice.

Definice 0.5 (Korektně zadaný problém)

Problém je korektně zadaný podle Hadamarda, pokud má řešení, řešení je jednoznačné a řešení závisí spojitě na datech.

Definice 0.6 (Klasické řešení)

Rovnice platí bodově, derivace jsou spojité.

Definice 0.7 (Okrajové podmínky)

Dirichlet: zadaná hodnota na hranici.

Neumann: zadány normálové tečny na hranici.

1 Cauchyova úloha pro kvazilineární rovnici 1. řádu

Definice 1.1

Buď $a_1, \ldots, a_n,\ f \in \mathbb{C}(\mathbb{R} \times \mathbb{R}^n)$, $n \in \mathbb{N} \setminus \{1\}$. Rovnici

$$\sum_{j=1}^{n} a_j(u(x), x)\partial_j u(x) = f(u(x), x), \qquad x \in \mathbb{R}^n$$

nazveme kvazilineární rovnici prvního řádu.

Počáteční podmínku předepisujeme ve tvaru $u(0, \overline{x}) = u_0(\overline{x})$, kde $\overline{x} \in \mathbb{R}^{n-1}$. Funkci $u : \Omega \to \mathbb{R}$, $\omega \subseteq \mathbb{R}^n$ nazveme klasickým řešením Cauchyovy úlohy pro kvazilineární rovnici 1. řádu, pokud $u \in \mathbb{C}^1(\Omega)$ a podmínky platí bodově v Ω.

2 Klasifikace lineárních rovnic 2. řádu

Poznámka (Lineární rovnice druhého řádu)

$$\sum_{i,j=1}^{n} a_{ij}(x)\partial_i\partial_j u(x) + \sum_{i=1}^{n} b_i(x)\partial_i u(x) + c(x)u(x) = f(x),$$

kde a_{ij}, b_i, c, f jsou dané funkce, $i, j \in [n]$, u neznámá funkce.

Zafixujeme $x_0 \in \mathbb{R}^n$, aby rovnice byla definována na nějakém $U(x_0)$. Chceme také rovnici transformovat tak, aby $A = (a_{ij})$ byla diagonální. Budeme pp. A je symetrická (neboť pro $u \in C^2(\ldots)$: $\partial_i\partial_j u = \partial_j\partial_i u$)

Definice 2.1 (Transformace diferenciální rovnice)

Vezmeme nějaké y_0 a $U(y_0)$ a hladké? zobrazení $\varphi(y_0) = x_0$ a $\varphi(U(y_0)) \subset U(x_0)$.

Definujeme funkci v: $u(x) = v(Px)$, kde $P \in M^{n\times n}$ je regulární matice. $u(\overbrace{P^{-1}y}^{\varphi(y)}) = v(y)$.

Dosadíme do rovnice výše:

$$\partial_i u(x) = \sum_{k=1}^{n} \partial_k v(Px)P_{ki}, \qquad \partial_j\partial_i u(x) = \sum_{k=1}^{m} P_{ki} \sum_{l=1}^{n} P_{lj}\partial_k\partial v(Px),$$

$$\sum_{i,j,k,l=1}^{n} \partial_k\partial_l v(Px)P_{ki}a_{ij}(x)(P^T)_{jl} = \sum_{k,l=1}^{n} \partial_k\partial_l v(Px)(PA(x)P^T)_{kl}$$

LA: $A(x_0)$ je symetrická, tedy ze Sylvestrova zákona setrvačnosti existuje P regulární taková, že $PA(x_0)P^T = \operatorname{diag}(d_1, \dots, d_n)$ pro $d_i \in \{-1, 0, 1\}$. Pozor, P není určena jednoznačně, ale $d_1, \dots, d_n$ ano až na permutaci.

Taktéž lze najít P tak, aby $P^T = P^{-1}$ a $PA(x_0)P^{-1} = \operatorname{diag}(d_1, \dots, d_n)$ pro $d \in \mathbb{R}$.

Například
Vlnová rovnice v 1D: $\partial_t^2 u - \partial_x^2 u = 0$.

Laplaceova rovnice v 2D: $\partial_x^2 u + \partial_y^2 u = 0$.

Rovnice vedení tepla: $\partial_t u - \partial_x^2 u = 0$.

Definice 2.2 (Typy diferenciální rovnice 2. řádu)

Řekneme, že lineární diferenciální rovnice je

eliptická v x_0, pokud $\operatorname{sgn} A(x_0) = (n, 0, 0)$ nebo $(0, 0, n)$; (Laplace)

hyperbolická v x_0, pokud $\operatorname{sgn} A(x_0) = (n-1, 0, 1)$ nebo $(1, 0, n-1)$; (vlnová)

parabolická v x_0, pokud $\operatorname{sgn} A(x_0) = (n-1, 1, 0)$ nebo $(0, 1, n-1)$ a v případě $\operatorname{sgn} A(x_0) = (n-1, 1, 0)$ navíc požadujeme, aby koeficient b_n (odpovídající $d_n = 0$) po transformaci byl v bodě x_0 záporný, a v opačném případě kladný; (vedení tepla)

Věta 2.1

Buď S hyperbolická na okolí $x_0 \in \mathbb{R}^2$, $a_{11}, a_{12}, a_{22} \in C^1(U(x_0))$, $a_{11} \neq 0$ na $U(x_0)$. Pak lze

$$a_{11}\partial_1^2 u + 2a_{12}\partial_1\partial_2 u + a_{22}\partial_2^2 u = 0$$

transformovat do tvaru $\partial_1\partial_2 v = f(\partial_1 v, \partial_2 v, v)$ na $V(x_0)$ pro vhodnou funkci f a okolí V.

Důkaz
Dokázáno na cvičení. □

3 Vlnová rovnice

Tvrzení 3.1 (Obecné řešení vlnové rovnice v 1D)

Řešení $\partial_t^2 u - c^2\partial_x^2 u = 0$, kterou lze transformovat na $\partial_1\partial_2 v = 0$, dostaneme skrze $\partial_2 v(\varrho\sigma) = \tilde{V}_1(\sigma)$, tedy $\int_0^\infty \tilde{V}_1(\tau)d\tau + V_2(\varrho) = V_1(\sigma) + V_2(\varrho) = v(\varrho, \sigma)$.

Obecným řešením je tedy

$$u(t, x) = V_1(x - ct) + V_2(x + ct),$$

pro dost hladké funkce V_1, V_2.

Poznámka (Úloha pro vlnovou rovnici (Cauchyova úloha))
Pro dané $f : (0,T) \times \mathbb{R} \to \mathbb{R}$. Hledáme řešení $u : [0,+\infty) \times \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ takové, že

$$\partial_t^2 u - \partial_x^2 u = f \text{ v } (0,T) \times \mathbb{R}.$$

A $u(0,x) = u_0(x)$, $\partial_t u(0,x) = u_1(x)$ ($\partial_t u$ musí jít spojitě rozšířit do $(0,x)$ a $\partial_t u(0,x)$ je hodnota tohoto rozšíření).

Definice 3.1 (d'Alambertova formule)

$$u(t,x) = \frac{1}{2}(u_0(x+t) + u_0(x-t)) + \frac{1}{2}\int_{x-t}^{x+t} u_1(s)ds.$$

Lemma 3.2

$$\partial_t \int_0^t u_\tau(t,x)d\tau = u_t(t,x) + \int_0^t \partial_1 u_\tau(t,x)d\tau$$

Důkaz
$U(t,s,x) := \int_0^t u_\tau(s,x)d\tau$. Chceme $\partial_t[U(t,t,x)] = (\partial_1 U)(t,t,x) + (\partial_2 U)(t,t,x)$.

$$\partial_t u(t,x) = u_t(t,x) + \int_0^t \partial_1 u_\tau(t,x)d\tau.$$

□

Poznámka (Duhamelův princip)
Aneb jak určit řešení (libovolné lineární rovnice) pro $f \not\equiv 0$, $u_0 = 0$, $u_1 = 0$ (pokud známe řešení pro $f = 0$).

Najdeme řešení $\partial_t^2 u - \partial_x^2 u = 0$ v $(\tau, T) \times \mathbb{R}$ ($\tau \in (0,T)$) s počátečními podmínkami $u(\tau,x) = 0$ a $\partial_t u(\tau,x) = f(\tau,x)$, $x \in \mathbb{R}$. Označme ho u_τ.

Tvrdíme, že $u(t,x) := \int_0^t u_\tau(t,x)d\tau$ je řešení s $f \not\equiv 0$.

$$\partial_t u(t,x) = u_t(t,x) + \int_0^t \partial_1 u_\tau(t,x)d\tau = 0 + \int_0^t \partial_1 u_\tau(t,x)d\tau$$

$$\partial_t^2 u(t,x) = \partial_1 u_t(t,x) + \int_0^t \partial_1^2 u_\tau(t,x)d\tau = f(t,x) + \int_0^t \partial_1^2 u_\tau(t,x)d\tau$$

$$\partial_t^2 u(t,x) - \partial_x^2 u(t,x) = f(t,x) + \int_0^t (\partial_1^2 u_\tau(t,x) - \partial_2^2 u_\tau(t,x))d\tau = f(t,x) + \int_0^t 0 d\tau = f(t,x).$$

Očividně navíc $u(0,x) = 0$ a $\partial_t u(0,x) = 0$.

Dosazením řešení z d'Alambertovy formule:

$$u(t,x) = \int_0^t u_\tau(t,x)d\tau = \int_0^t \frac{1}{2}\int_{x-t+\tau}^{x+t-\tau} f(\tau,s)dsd\tau$$

Definice 3.2

Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ otevřená, $k \in \mathbb{N}_0$.

$$C^k(\overline{\Omega}) = \left\{f \in \Omega \to \mathbb{R} | \alpha \in (\mathbb{N}_0)^n, |\alpha| \leqslant k \implies D^\alpha f \text{ je možné spojitě rozšířit na } \overline{\Omega}\right\}.$$

Pro $T > 0$ definujeme $C^k([0,T) \times \mathbb{R}) :=$

$$\left\{f : (0,T) \times \mathbb{R} \mid \alpha \in (\mathbb{N}_0)^2, |\alpha| \leqslant k \implies D^\alpha f \text{ lze spojitě rozšířit na } [0,T) \times \mathbb{R}\right\}.$$

Poznámka
Podobné prostory zavedeme podobně.

Pro omezené Ω lze zavést i tím, že $D^\alpha f$ jsou stejnoměrně spojité.

Nerozlišujeme mezi $D^\alpha f$ a jeho rozšířením na hranici.

Lemma 3.3

Ať f, $\partial_2 f \in C([0,T) \times \mathbb{R})$ pro zvolené $T > 0$. Pak pro $F(t,x) := \int_0^t f(\tau,x)d\tau$ je

$$F \in C^1([0,T) \times \mathbb{R}) \wedge \partial_1 F(t,x) = f(t,x) \wedge \partial_2 F(t,x) = \int_0^t \partial_2 f(\tau,x)d\tau.$$

Důkaz (Náznak)
Platí $\partial_1 F(t,x) = f(t,x)$ pro $(t,x) \in (0,T) \times \mathbb{R}$, protože pro pevné $x \in \mathbb{R}$ je $\tau \mapsto f(\tau,x)$ spojité $\implies \partial_1 F_t \in C([0,T) \times \mathbb{R})$.

$$\partial_2 F(t,x) = \int_0^t \partial_2 f(\tau,x)d\tau,$$

protože derivjeme integrál dle parametru x, t je pevné. ($f(\cdot,x)$ je měřitelná ze spojitosti, $\exists x_0 \in \mathbb{R} : f(\cdot,x_0) \in L^1(0,t)$ ze spojitosti pro $t < T$, $\exists \partial_2 f(t,x)$ všude (tj. i skoro všude) z $\partial_2 \in C(\ldots)$, integrovatelná majoranta existuje z $|\partial_2 f(t,x)| \leqslant \max_{[0,t]\times[-K,K]} \partial_2 f$ pro vhodné $K > 0$). □

Věta 3.4

Buď $u_0 \in C^2(\mathbb{R})$, $u_1 \in C^1(\mathbb{R})$, $T > 0$, $f \in C^1([0,T) \times \mathbb{R})$. Definujeme

$$u(t,x) = u_1(t,x) + u_2(t,x),$$

kde u_1, u_2 jsou u z d'Alambertovy formule a Duhamelova principu. Pak platí $u \in C^2([0,T) \times \mathbb{R})$, $\partial_1^2 u - \partial_2^2 u = f$ v $(0,T) \times \mathbb{R}$, $u = u_0$, $\partial_t u = u_1$ v $\{0\} \times \mathbb{R}$.

Důkaz

„$u_2 \in C^1([0,T) \times \mathbb{R})$“: Ano, pokud $F(\tau,t,x) := \int_{x-t+\tau}^{x+t-\tau} f(\tau,s)ds$ splňuje $F, \partial_2 F, \partial^3 F \in C([0,T) \times \mathbb{R})$. $G(\tau,\alpha,\beta) := \int_\alpha^\beta f(\tau,s)ds$ je spojitá na $[0,T) \times \mathbb{R}^2$ z vlastností f, tedy F podmínky splňuje.

Z lemmatu tedy máme

$$u_2 \in C^1([0,T) \times \mathbb{R}), \partial u_2(t,x) = \frac{1}{2}F(t,t,x) + \frac{1}{2}\int_0^t \partial_2 F(\tau,t,x)d\tau = \frac{1}{2}\int_0^t \partial_2 F(\tau,t,x)d\tau$$

Podobně $\partial_t u_2 \in C^1([0,T) \times \mathbb{R})$.

$$\partial_t^2 u_2(t,x) = \frac{1}{2}\partial_2 F(t,t,x) + \frac{1}{2}\int_0^t \partial_2^2 F(\tau,t,x)d\tau.$$

$$\partial_2 F(\tau,t,x) = f(\tau, x + (t-\tau)) + f(\tau, x - (t-\tau))$$

$$\partial_2 = F(t,t,x) = 2f(t,x),$$

$$\partial_t^2 u_2(t,x) = f(t,x) + \frac{1}{2}\int_0^t \partial_2 f(\tau, x + (t-\tau)) - \partial_2 f(\tau, x - (t-\tau))d\tau.$$

Existence ∂_x^2 stejně jako v předchozím. Její výpočet:

$$\partial_3^2 F(\tau,t,x) = (\partial_2 f)(\tau, x + t - \tau) - (\partial_3 f)(\tau, x - t + \tau)$$

$$\partial_x^2 u_2(t,x) = \frac{1}{2}\int_0^t \partial_3^2 F(\tau,t,x)d\tau = \frac{1}{2}\int_0^t \partial_2 f(\tau, x + t - \tau) - \partial_2 f(\tau, x - t + \tau)d\tau.$$

Tedy $\partial_t^2 u_2 - \partial_x^2 u_2 = f$ na $(0,T) \times \mathbb{R}$. $u_2 = 0$ a $\partial_t u_2 = 0$ v $\{0\} \times \mathbb{R}$. □

Lemma 3.5 (O rozšiřování)

Buď $g : [0,+\infty) \to \mathbb{R}$, $\tilde{g}$ liché rozšíření na $\mathbb{R}$.

- *Je-li $g(0) = 0$ a $g \in C([0,+\infty))$, je $\tilde{g} \in C(\mathbb{R})$.*
- *Je-li $g(0) = 0$ a $g \in C^1([0,+\infty))$, je $\tilde{g} \in C^1(\mathbb{R})$.*
- *Je-li $g''(0) = g(0) = 0$ a $g \in C^2([0,+\infty))$, je $\tilde{g} \in C^2(\mathbb{R})$.*

Důkaz
Pro $x < 0$: $\tilde{g}(x) = -g(-x)$, $\lim_{x\to 0_-} \tilde{g}(x) = \lim_{x\to 0_-} -g(-x) = \lim_{y\to 0_+} -g(y) = 0$.

Pro $x < 0$: $\tilde{g}(x) = -g(-x)$, $\lim_{x\to 0_-} \tilde{g}'(x) = \lim_{x\to 0_-} g'(-x) = \lim_{y\to 0_+} g'(y)$. Tedy $\tilde{g}'_+(0) = \tilde{g}'_-(0) = \tilde{g}'(0)$.

Třetí případ je analogicky. □

Poznámka (Počátečně okrajová úloha v $(0,T) \times (0,+\infty)$)
Pro dané funkce $u_0, u_1 : (0,+\infty) \to \mathbb{R}$, $T > 0$, $f : [0,T) \times [0,+\infty) \to \mathbb{R}$ najděte $u : [0,T) \times [0,+\infty) \to \mathbb{R}$, které řeší $\partial_1^2 u - \partial_2^2 u = f$ v $(0,T) \times (0,+\infty)$, $u = 0$ v $[0,T) \times \{0\}$, $u = u_0$ a $\partial_t u = u_1$ v $\{0\} \times [0,\infty)$.

Definujeme $\tilde{u}_0, \tilde{u}_1, \tilde{f}$ jako lichá rozšíření.

$$u(t,x) := \frac{1}{2}\left(\tilde{u}_0(x+t) + \tilde{u}_0(x-t)\right) + \frac{1}{2}\int_{x-t}^{x+t} \tilde{u}_1(s)ds + \frac{1}{2}\int_0^t \int_{x-t+\tau}^{x+t-\tau} \tilde{f}(\tau,s)dsd\tau.$$

Upočítali jsme to a vyšlo to.

Věta 3.6

Buď $T > 0$, $f \in C^1([0,T) \times [0,\infty))$, $u_0 \in C^2([0,+\infty))$, $u_1 \in C^1([0,+\infty))$, $f(t,0) = 0$ $\forall t \in [0,T)$, $u_0(0) = u_0''(0) = 0$, $u_1(0) = 0$. Pak u definované

$$u(t,x) = \textit{formule z předchozí věty}, \qquad x > 0, t > 0, x \geqslant t,$$

$$u(t,x) = \frac{1}{2}\left(u_0(t+x) - u_0(t-x)\right) + \frac{1}{2}\int_{t-x}^{x+t} u_1(\sigma)d\sigma +$$

$$+\frac{1}{2}\int_{t-x}^{t}\int_{x-t+\tau}^{x+t-\tau} f(\tau,s)dsd\tau + \frac{1}{2}\int_0^{t-x}\int_{t-\tau-x}^{x+t-\tau} f(\tau,s)dsd\tau, \qquad x > 0, t > 0, x < t.$$

Důkaz
Přímočarý. □

Poznámka (Počátečně okrajová úloha v $(0,T) \times (0,l)$)
Pro dané funkce $u_0, u_1 : (0,l) \to \mathbb{R}$, $l > 0$ a $f : (0,T) \times (0,l) \to \mathbb{R}$ najděte $u : (0,T) \times (0,l)$, $u = u_0$ a $\partial_1 u = u_1$ v $\{0\} \times (0,l)$, $u = 0$ v $(0,T) \times \{0,l\}$.

Věta 3.7

Obdobně předchozí větě, jen rozšiřujeme „liše periodicky“.

Důkaz
Obdobně předchozí větě, jen rozšiřujeme „liše periodicky“. □

Poznámka
Pak jsme ještě vyměnili podmínku $u = 0$ v $(0, T) \times \{0\}$ za $\partial_t u = 0$ v $(0, T) \times \{0\}$. Takže jsme rozšířili sudě a za cvičení vymysleli znění věty…

Definice 3.3 (Fourierova metoda (separace proměnných))

Řešení hledáme ve tvaru řady

$$u(t, x) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k(t) \cdot X_k(x).$$

Pokud X_0 volíme vhodně, PDR TODO!!!

Věta 3.8

Nechť $u_0 \in C^3([0, l])$, $u_1 \in C^2([0, l])$, $l > 0$ a $u_0(0) = u_0(l) = u_0''(0) = u_0''(l) = u_1(0) = u_1(l) = 0$. Pak řešení nalezené Fourierovou metodou splňuje

$$u \in C^2([0, +\infty) \times [0, l]), \partial_t^2 u - \partial_x^2 u = 0 \ v \ (0, +\infty) \times (0, l),$$

$$u = 0 \ na \ (0, +\infty) \times \{0, l\}, u = u_0, \partial_t u = u_1 \ v \ \{0\} \times [0, l].$$

Důkaz
Dokážeme pouze, že $u \in C^2([0,\infty) \times [0,l])$ a že řadu je možné derivovat člen po členu. Jen pro část

$$R(t,x) := \sum_{k=1}^{\infty} \sin(\frac{k\pi}{e}x)\hat{u}_{0k}\cos(\frac{k\pi}{e}t)$$

Typicka 2. der:

$$\sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{k\pi}{2}\right) gon_1(\frac{k\pi}{2}x)gon_2(\frac{k\pi}{2}t)\hat{u}_{0k}.$$

Pro stejnoměrnou konvergenci 2. derivace počítejme $\sum_{k=1}^{\infty} k^2|\hat{u}_{0k}| < \infty$.

$$\hat{u}_{0k} = \frac{2}{l}\int_0^l u_0(y)\sin\frac{k\pi}{l}ydy = \underbrace{\frac{2}{l}\left[u_0(y)\right]_0^l}_{=0} + \frac{2}{l}\int_0^l u_0'(y)\cos\frac{k\pi y}{l}dy\frac{l}{k\pi} = \dots$$

$$\dots = -\frac{2}{l}\int_0^l u_0'''(y)\cos\frac{k\pi y}{2}dy\left(\frac{l}{k\pi}\right)^3$$

$$|k^2\hat{u}_{0k}| \leqslant \frac{1}{k}p_k := \frac{1}{k}\cdot\frac{2}{l}\left(\frac{l}{\pi}\right)^3 |\int_0^l u_0'''(y)\cos\frac{k\pi y}{l}dy|.$$

($||y||_2^2 = \sum_{k=1}^{\infty}\hat{g}_k^2$ pro orto-normální bázi.) Parsevalova nerovnost: $u_0''' \in L^2(0,l) \implies \sum_{k=1}^{\infty} p_k^2 < \infty$.

$$|k^2\hat{u}_{0k}| \leqslant \frac{1}{2}\left(\frac{1}{k^2} + p_k^2\right) \implies \sum_{k=1}^{\infty} k^2|\hat{u}_{0k}| < \infty.$$

□

Poznámka
V předchozí větě lze předpokládat, že u_0'', $u_1' \in AC([0,l])$, u_1'', $u_0''' \in L^2(0,l)$.

Věta 3.9 (Gauss-Green-Ostrogradsky)

Ať $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ otevřená omezená s C^1 hranicí a vnější normálou ν. Ať $u \in C^1(\overline{\Omega})$, $u : \overline{\Omega} \to \mathbb{R}$. Pak $\forall i \in [n] : \int_\Omega \partial_i u = \int_{\partial\Omega} u \cdot \nu_i ds$. Pokud $U \in C^1(\overline{\Omega})$, $U : \overline{\Omega} \to \mathbb{R}^n : \int_\Omega \operatorname{div} U d\lambda^n = \int_{\partial\Omega} U \cdot \nu dS$.

Věta 3.10 (Greenovy ?)

Ať Ω jako v minulé větě, $u, v \in C^2(\overline{\Omega})$, $w \in C^1(\overline{\Omega})$, $u, v, w : \overline{\Omega} \to \mathbb{R}$. Pak

$$\int_\Omega \Delta u w = \int_{\partial\Omega} w(\nabla u \cdot \nu)dS - \int_\Omega \nabla u \nabla w.$$

$$\int_\Omega (\Delta u)v - u(\Delta v) = \int_{\partial\Omega} v(\nabla u \cdot \nu) - u(\nabla v \cdot \nu)dS.$$

Důkaz

Druhá rovnost plyne z první. První:

$$\operatorname{div}(\nabla u \cdot w) = \ldots = \Delta u w + \nabla u \cdot \nabla w.$$

Nyní už z GGO. □

Lemma 3.11

Buď $x \in \mathbb{R}^n$, $r > 0$, u spojitá na $\partial U(0,r)$. Pak $⨍_{\partial U(x,1)} uds = ⨍_{\partial U(0,1)} u(x+rz)dS(z)$. Kde

$$⨍_M f d\mu = \int_M f d\mu / \int_M 1 d\mu, \text{ pro } \mu(M) \neq 0.$$

Důkaz

Plyne z definice plošného integrálu (ukázali jsme si pouze v $n = 3$). Převedeme na sférické souřadnice, vydělíme objemem daných koulí a vyjde to. □

Lemma 3.12

Buď $x \in \mathbb{R}^n$, $R > 0$, $u \in C(\mathcal{U}(x,R))$. Pak

$$\partial_l \left[\int_{\mathcal{U}(x,r)} dx \right] = \partial_r \left[\int_0^r \int_{\partial \mathcal{U}(x,\varrho)} udSd\varrho \right] = \int_{\partial U(x,\Omega)} udS.$$

Důkaz

Prý byl někdy na cvičení. □

Lemma 3.13

$$n \int_{\mathcal{U}(0,1)} 1 = \int_{\partial \mathcal{U}(0,1)} 1dS.$$

Definice 3.4

$$\alpha_n := \lambda^n(\mathcal{U}(0,1)), n\alpha_n := \int_{\partial \mathcal{U}(0,1)} dS.$$

Lemma 3.14

Buď $x \in \mathbb{R}^n$, $R > 0$, $u \in C^1(\mathcal{U}(x,R))$. Označme $u^x(r) = ⨍_{\partial \mathcal{U}(x,r)} udS$. Pak platí

$$\partial_r u^x(r) = ⨍_{\partial \mathcal{U}(x,r)} \nabla u(y) \cdot \frac{y-x}{r} dS(y), \qquad r \in (0,R).$$

Je-li navíc $u \in C^2(\mathcal{U}(x,R))$, je

$$\partial_r u^x(r) = \frac{r}{n} \fint_{\mathcal{U}(x,r)} \Delta u(y) d\lambda(y).$$

$$\partial_r^2 u^x(r) = \left(\frac{1}{n} - 1\right) \fint_{\mathcal{U}(x,r)} \Delta u(y) d\lambda(y) + \fint_{\partial\mathcal{U}(x,r)} \Delta u(y) dS(y), \qquad r \in (0,R).$$

Důkaz

Podle lemmatu výše, derivace integrálů podle parametru a znovu tohoto lemmatu:

$$\partial_r u^x(r) = \partial_r \left(\fint_{\partial\mathcal{U}(0,1)} u(x+rz) dS(z)\right) = \int_{\partial\mathcal{U}(0,1)} (\nabla u)(x+rz) \cdot z ds(z) =$$

$$= \fint_{\partial\mathcal{U}(x,1)} \nabla u(y) \cdot \frac{y-x}{r} dS(y) \overset{u \in C^2}{=} \frac{1}{n\alpha_n r^{n-1}} \int_{\mathcal{U}(x,r)} \Delta u(y) d\lambda^n(y) = \frac{r}{n} \fint_{\mathcal{U}(x,1)} \Delta u(y) d\lambda^n(y).$$

□

Lemma 3.15

Buď $x \in \mathbb{R}^n$, $m \in \mathbb{N}$, $m \geqslant 2$, $u \in C^m([0,+\infty) \times \mathbb{R}^n)$ a u splňuje bodově $\partial_t^2 u - \nabla u = 0$ v $(0,\infty) \times \mathbb{R}^n$, $u = u_0$ a $\partial_t = u_1$ v $\{0\} \times \mathbb{R}^n$.

Označme

$$u^x(r,t) = \fint_{\partial U(x,r)} u(t,y) dS(y), \quad u_0^x(r,t) = \fint_{\partial U(x,r)} u_0(y) dS(y), \quad u_1^x(r,t) = \fint_{\partial U(x,r)} u_1(y) dS(y),$$

pro $t \geqslant 0$, $x \in \mathbb{R}^n$.

Pak $u^x \in C^m([0,+\infty)^2)$ a $\partial_t^2 u^x - \partial_r^2 u^x - \frac{n-1}{r} \partial_r u^x = 0$ v $(0,+\infty)^2$, $u^x = u_0^x$, $\partial_t u^x = u_1^x$ v $[0,+\infty) \times \{0\}$.

Důkaz
„$u^x \in C^m([0,+\infty)^2)$“ spojitost derivací podle t je zřejmá. Derivace dle r:

$$\partial_r u^x(r,t) = \frac{r}{n} \fint_{U(x,r)} \Delta u(y) d\lambda(y),$$

podle lemmatu výše. Navíc je spojitá. $\partial_t \partial_r u^x(r,t)$ je jasná.

$\partial_r^2 u^x(r,t)$ podobně:

$$\fint_{U(x,r)} (\Delta u)(t,y) d\lambda(y) = \fint_{0,1} (\Delta u)(t, x + rz) d\lambda(z)$$

spojitá dle teorie míry.

„Rovnosti“:

$$\partial_r u^x(r,t) = \frac{r}{n} \fint_{U(x,r)} \Delta u(t,y) d\lambda(y) = \frac{r}{n} \int_{U(x,r)} \partial_t^2 u(t,y) d\lambda(y) = \frac{r^{1-n}}{n\alpha_n} \partial_t^2 \int_{U(x,r)} u(t,y) d\lambda(y)$$

$$r^{n-1} \partial_r u^x(r,t) = \frac{1}{n\alpha_n} \partial_t^2 \int_{U(x,r)} u(t,y) d\lambda(y).$$

$$RHS = r^{1-n} \partial_r (r^{n-1} \partial_r u^x(r,t)) = \frac{1}{n\alpha_n r^{n-1}} \partial_t^2 \int_{\partial U(x,r)} u dS = \partial_t^2 u^x(r,t) =$$

$$= r^{1-n}(r^{n-1} \partial_r^2 u^x(r,t) + (n-1) r^{n-2} \partial_r u^x(r,t)) = \partial_r^2 u^x(r,t) + \frac{n-1}{r} \partial_r u^x(r,t) \text{ v } (0,+\infty)^2.$$

$u^x = u_0^x$, $\partial_t u^x = u_1^x$ v $[0,+\infty) \times \{0\}$ plyne z definice u_i^x. □

Lemma 3.16 (Doplnění pro $n = 3$)

Označme $t, r \geqslant 0$ $\tilde{u}^x(r,t) = r u^x(r,t)$ a $\tilde{u}_0^x(r) = r u_0^x(r)$, $\tilde{u}_1^x(r) = r u_1^x(r)$. Pak

$$\partial_t^2 \tilde{u}^x = \partial_r^2 u \text{ v } (0,+\infty)^2,$$

$$\tilde{u}^x = 0 \text{ v } \{0\} \times [0,+\infty),$$

$$\tilde{u}^x = \tilde{u}_0^x, \partial \tilde{u}^x = \tilde{u}_1^x \text{ v } [0,+\infty) \times \{0\}.$$

Důkaz
„První“: $\partial_t^2 \tilde{u}^x = r \partial_t^2 u^x = r \partial_2^2 u^x + 2 \partial_r u^x = \partial_r^2 (r u^x) = \partial_r^2 \tilde{u}^x$.

„Druhá“: $\tilde{u}^x = 0$ z definice pro $r = 0$ a podobně „třetí“. □

Poznámka (K lemmatům výše)

Řešení $0 < x \leqslant t < T$:

$$u(t,x) = \frac{1}{2}\left(u_0(x+t) - u_0(t-x)\right) + \frac{1}{2}\int_{t-x}^{x+t} u_1(\xi)d\xi$$

$$\tilde{u}^x(r,t) \overset{r\leq t}{=} \frac{1}{2}\left(\tilde{u}_0^x(r+t) - \tilde{u}_0^x(t-r)\right) + \frac{1}{2}\int_{t-r}^{t+r} \tilde{u}_1^x(\xi)d\xi$$

$$u(t,x) = \lim_{r\to 0_+} U^x(r,t) = \lim_{r\to 0_+} \frac{1}{r}\tilde{u}^x(r,t) =$$

$$\lim_{r\to 0_+} \frac{1}{2r}\left((t+r)u_0^x(t+r) - (t-r)u_0^x(t-r)\right) + \frac{1}{2r}\int_{t-r}^{t+r} \xi u_1^x(\xi)d\xi =$$

$$= \partial_t(t\cdot u_0^x(t)) + tu_1^x(t) = u_0^x(t) + t\fint_{\partial U(x,t)} \nabla u_0(y)\frac{y-x}{t}dS(y) + t\fint_{\partial U(x,t)} u_1(y)dS(y).$$

Důkaz (Kirchhoffův vzorec)
Kandidát na řešení vlnové rovnice pro $n = 3$:

$$u(t,x) = \fint_{\partial U(x,t)} u_0(y) + \nabla u_0(y)(y-x) + tu_1(y)dS(y), \qquad x\in\mathbb{R}^3, t\geqslant 0.$$

□

Definice 3.5 (Poissonnův vzorec v $n = 2$)

Kandidát na řešení vlnové rovnice v $n = 2$:

$$u(t,x) = \frac{1}{2}\fint_{U(x,t)} tu_0(y) + t\nabla u(y)(y-x) + t^2u_1(y)\frac{1}{\sqrt{t^2 - |x-y|^2}}dy, \qquad x\in\mathbb{R}^2, t\geqslant 0.$$

Věta 3.17

Buď $n \in \{2,3\}$, $u_0 \in C^3(\mathbb{R}^n)$, $u_1 \in C^2(\mathbb{R}^n)$ a u je definováno buď Kirchhoffovým nebo Poissonovým vzorcem. Pak

$$u \in C^2([0,+\infty)\times\mathbb{R}^n);$$
$$\partial_t^2 u - \Delta u = 0 \text{ v } (0,+\infty)\times\mathbb{R}^n;$$
$$u = u_0 \wedge \partial_t u = u_1 \text{ v } \{0\}\times\mathbb{R}^n.$$

Důkaz
Bez důkazu. □

Věta 3.18

Buď $T > 0$, $f \in C^2([0,T]\times\mathbb{R}^n)$, $n\in\{2,3\}$. Ať pro $\tau\in(0,T)$ splňuje funkce $u_\tau : [\tau,+\infty)\times\mathbb{R}^n$ následující:

$$u_\tau \in C^2([0,+\infty]\times\mathbb{R}^n);$$
$$\partial_t^2 u_\tau - \Delta u_\tau = 0 \text{ v } (\tau,+\infty)\times\mathbb{R}^n;$$

$$u_\tau = 0 \wedge \partial_t u_\tau = f(\tau, \cdot) \ v \ \{\tau\} \times \mathbb{R}^n.$$

Pak pro funkci $u(t,x) := \int_0^t u_\tau(t,x) d\tau$, *pro* $t \in (0,T)$, $x \in \mathbb{R}^n$, *platí*

$$u \in C^2([0,T] \times \mathbb{R}^n);$$

$$\partial_t^2 u - \Delta u = f \ v \ (0,T) \times \mathbb{R}^n$$

$$u = 0 \wedge \partial_t u = 0 \ v \ \{0\} \times \mathbb{R}^n.$$

Důkaz

Bez důkazu. □

Věta 3.19

Buď $x_0 \in \mathbb{R}^n$, $t_0 > 0$, $K = \{(t,x) \in [0,+\infty) \times \mathbb{R}^n | \ |x - x_0| \leqslant t_0 - t, t \in [0,t_0]\}$. *A buď* $u \in C^2(K)$ *a platí* $\partial_t^2 u - \Delta u = 0$ *v* K, $u = 0$ *a* $\partial_t u = 0$ *v* $\{0\} \times U(x_0)$. *Pak* $u = 0$ *na* K.

Důkaz

Energetická metoda:

$$e(t) = \int_{U(x_0, t_0 - t)} |\delta_t u|^2 + |\nabla u|^2.$$

$$e(0) = 0, \quad e \geqslant 0,$$

$$\frac{de}{dt} = -\int_{\partial U(x_0,t_0-t)} |\partial_t u|^2 + |\nabla u|^2 ds + \int_{U(x_0,t_0-t)} 2\partial_t u \partial_t^2 u + 2\nabla u \cdot \partial_t \nabla u ds =$$

$$= -\int_{\partial U(x_0,t_0-t)} |\partial_t u|^2 + |\nabla u|^2 ds + \int_{U(x_0,t_0-t)} 2\partial_t u \partial_t^2 u + 2 \underbrace{\operatorname{div}(\nabla}_{=\Delta} u) \cdot \partial_t u ds +$$

$$+ \int_{\partial U(x_0,t-t_0)} 2\nabla u \cdot \nu \partial_t u ds = -\int_{\partial U(x_0,t_0-t)} |\partial_t u|^2 - 2\nabla u \cdot \nu \partial_t u + |\nabla u|^2 ds =$$

$$= -\int_{\partial U(x_0,t_0-t)} |\partial_t u \nu - \nabla u|^2 ds \leqslant 0.$$

Tedy e je nerostoucí a $e \geqslant 0$, tedy $e = 0$. □

Důsledek

Klasické řešení Cauchyovy úlohy pro vlnovou rovnici je určené jednoznačně.

4 Rovnice vedení tepla

Definice 4.1 (Rovnice vedení tepla (RVT))

Rovnici $\partial_t u - \Delta u = f$ v $(0,T) \times \Omega$, $T \in (0,\infty]$, nazýváme rovnice vedení tepla, $\Omega \subset \mathbb{R}^n$. Zadáváme f a další podmínky (počáteční, okrajová). Hledáme $u : (0,T) \times \Omega \to \mathbb{R}$.

Definice 4.2 (Fundamentální řešení RVT)

Funkci $G(t,x) := \begin{cases} \frac{1}{(4\pi t)^{n/2}} \cdot e^{-\frac{|x|^2}{4t}}, & t > 0, \\ 0, & t < 0, \end{cases}$ nazveme fundamentální řešení RVT.

Definice 4.3 (Prostor testovacích funkcí)

Je-li $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ neprázdná, otevřená, definujeme prostor testovacích funkcí jako množinu $\mathcal{D}(\Omega) = \{\varphi \in C^\infty(\Omega) | \exists K \subset \Omega, K \text{ kompaktní}, \operatorname{supp} \varphi \subset K\}$.

Věta 4.1 (Vlastnosti fundamentálního řešení RVT)

1. *$G \in C^\infty(\mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \setminus \{(0,0)\})$;*
2. *$\partial_t G - \Delta G = 0$ v $(\mathbb{R} \times \mathbb{R}^n) \setminus \{(0,0)\}$;*
3. *$\forall t > 0 : \int_{\mathbb{R}^n} G(t,x)dx = 1$, $G \in L^1_{loc}(\mathbb{R} \times \mathbb{R}^n)$;*
4. *$\forall \varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^{n+1})$:*
$$\int_{\mathbb{R}^{n+1}} G \cdot (-\partial_t \varphi - \Delta \varphi) = \varphi(0,0).$$

Důkaz
Ad 1: $G \in C(\mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \setminus \{(0,0)\})$, $\mathbb{C}^\infty$ obdobně. Zafixujeme si $x_0 \in \mathbb{R}^n$.

$$0 \leqslant \frac{1}{(r\pi t)^{n/2}} e^{\frac{-|x|^2}{4t}} \overset{x \in U(x_0, |x_0|/2)}{\leqslant} \frac{1}{(4\pi t)^{n/2}} e^{-\frac{|x_0|^2/4}{4t}} \to 0.$$

$$\lim_{t \to 0_+, x \to x_0} G(t,x) = 0.$$

Ad 2: cvičení.

Ad 3:

$$\int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{(4\pi t)^{n/2}} e^{-\frac{|x|^2}{4t}} dx = \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{1}{\pi}\right)^{n/2} e^{-|y|^2} dy =$$

$$= \left(\frac{1}{\pi}\right)^{n/2} \int_{\mathbb{R}^n} e^{-(y_1^2 + \ldots + y_n^2)} dy = \left(\frac{1}{\pi}\right)^{n/2} \underbrace{\left(\int_{\mathbb{R}} e^{-z^2} dz\right)^n}_{=\sqrt{\pi}} = 1.$$

Ať $K \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$ kompaktní. Pak existuje $C > 0$, $K \subset (-C, C) \times \mathbb{R}^n$. $G \geqslant 0 \implies \int_k G \leqslant \int_{-C}^{C} \int_{\mathbb{R}^n} G = C < +\infty$. Tedy $G \in L^1_{loc}(\mathbb{R} \times \mathbb{R}^n)$.

Ad 4: Zafixujeme $\varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^{n+1})$:

$$\int_{\mathbb{R}^{n+1}} G \cdot (-\partial_t \varphi - \Delta\varphi) = \lim_{h \to 0_+} \int_h^{+\infty} \int_{\mathbb{R}^n} G \cdot (-\partial_t \varphi - \Delta\varphi) =$$

$$= \lim_{h \to 0_+} \int_h^{+\infty} \int_{\mathbb{R}} \partial_t G\varphi + \int_{\mathbb{R}^n} G(h,x)\varphi(h,x)dx - \int_h^{+\infty} \int_{\mathbb{R}^n} \Delta G\varphi =$$

$$= \lim_{h \to 0_+} \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{\sqrt{4\pi h}}^n e^{-\frac{|x|^2}{4h}} \varphi(h,t) dx =$$

$$= \lim_{h \to 0_+} \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{1}{\pi}\right)^{n/2} e^{-|y|^2} \varphi(h, 2\sqrt{h}y) dy \overset{\text{Lebesgue}}{=}$$

$$= \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{1}{\pi}\right)^{n/2} e^{-|y|^2} \varphi(0,0) dy = \varphi(0,0).$$

□

Důsledek
Zafixujeme $f \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^{n+1})$, definujeme $\varphi(\sigma, \xi) := f(t - \sigma, x - \xi)$ pro pevné $x \in \mathbb{R}^n$, $t \in \mathbb{R}$.

Dostáváme:

$$\varphi(0,0) = f(t,x) = \int_{\mathbb{R}^{n+1}} G \cdot (-\partial_t \varphi - \Delta_t \varphi) d(\sigma, \xi) =$$

$$= \int_{\mathbb{R}^{n+1}} G \cdot (\partial_t f - \Delta_x f) d(\sigma, \xi) = (\partial_t u - \Delta u),$$

kde

$$u(t,x) = \int_{\mathbb{R}^{n+1}} G(\sigma,\xi)\cdot f(t-\sigma, x-\xi)d(\sigma,\xi) = \int_{\mathbb{R}^{n+1}} G(t-\sigma,x-\xi)g(\sigma,\xi)d(\sigma,\xi).$$

Věta 4.2 (Klasické řešení Cauchyovy úlohy pro RVT v1)

Buď $T > 0$. $Q_T = (0,T)\times\mathbb{R}^n$, $f, \nabla f, \nabla^2 f \in L^\infty(Q_T)\cap C(Q_T)$. Definujme pro $t\in[0,T)$ a $x\in\mathbb{R}^n$

$$u_1(t,x) = \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} G(\tau,\xi)f(t-\tau,x-\xi)d(\tau,\xi).$$

Pak platí

1. $u_1 \in C([0,T)\times\mathbb{R}^n)$, $\partial_t u_1, \nabla u_1, \nabla^2 u_1 \in C(Q_T)\cap L^\infty(Q_T)$;
2. $\partial_t u_1 - \Delta u_1 = f$ *v* Q_T;
3. $u_1 = 0$ *v* $\{0\}\times\mathbb{R}^n$;
4. $\|u_1\|_{L^\infty(Q_T)} \leqslant T\cdot\|f\|_{L^\infty(Q_T)}$.

Důkaz

$$u_1(t,x) = \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{(4\pi\tau)^{\frac{n}{2}}} e^{-\frac{\|\xi\|^2}{4\tau}} f(t-\tau,x-\xi)d\xi d\tau = *$$

1.) Tedy $u_1 \in C([0,T)\times\mathbb{R}^n)$, $\nabla u_1, \nabla^2 u_1 \in C(Q_T)\cap L^\infty(Q_T)$ podle Lebesgueovy věty, majoranta pro $t\in[0,T)$, $x\in\mathbb{R}^n$ je $C\cdot\frac{1}{(4\pi T)^{n/2}}e^{-\frac{\|x\|^2}{4T}}$, kde $C = \|f\|_{L^\infty} + \|\nabla f\|_\infty + \|\nabla^2 f\|_\infty$.

$$4.)\quad |*| \leqslant \|f\|_\infty \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{(4\pi\tau)^{n/2}} e^{-\frac{|\xi|^2}{4\tau}} d\xi d\tau$$

3.) Jasné, neboť integrál od 0 do 0 je roven 0. □

Důkaz
Zbývá 2.) a z 1.) chybí $\partial_t u$:

$$u_1(t,x) = \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{\pi^{n/2}} e^{\|\eta\|^2} f(t-\tau, x-\eta\sqrt{4\tau}) d\eta d\tau =$$

$$= \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{\pi^{n/2}} e^{-\|\eta\|^2} f(\sigma, x+\eta\sqrt{4(t-\sigma)}) d\eta d\sigma$$

$$\frac{1}{h}(u_1(t+h,x) - u_1(t,x)) = \int_0^{t+h} \int_{\mathbb{R}^n} \ldots t+h \ldots d(\eta,\sigma) - \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \ldots t \ldots d(\eta,\sigma) =$$

$$= \fint_t^{t+h} \left(\int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{\pi^{n/2}} e^{-\|\eta\|^2} f(\sigma, x+\eta\sqrt{4(t+h-\sigma)}) d\eta \right) d\sigma +$$

$$+\frac{1}{h} \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{\pi^{n/2}} l^{-\|\eta\|^2} \left(f(\sigma, x+\eta\sqrt{4(t+h-\sigma)}) - f(\sigma, x+\eta\sqrt{4t-\sigma}) \right) d\eta d\sigma = I_1 + I_2.$$

Použijeme Lagrangeovu větu o střední hodnotě, $\exists \overline{\sigma} \in [t, t+h]$, ... Na limitu pro $h \to 0_+$ použijeme Lebesgueovu větu.

$$I_1 = g(\overline{\sigma}) \to f(t,x),$$

$$g(\overline{\sigma}) := \frac{1}{\pi^{n/2}} \int_{\mathbb{R}^n} e^{-\|\eta\|^2} f(\sigma, x+\eta\sqrt{4(t+h-\sigma)} d\eta)$$

je spojitá na $[t, t+h]$ podle Lebesgueovy věty.

Stejně jako v předchozím, $\overline{h} \in (0,h)$:

$$I_2 = \frac{1}{\overline{h}} \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{\pi^{n/2}} e^{-\|\eta\|^2} \overline{h} \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i}(\sigma, x+\eta\sqrt{4(t+\overline{h}-\sigma)}) \frac{\eta_i}{\sqrt{t+\overline{h}}} d\eta, d\sigma \to$$

$$\to \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{\pi^{n/2}} e^{-\|\eta\|^2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i}(\sigma, x+\eta \cdot 2 \cdot \sqrt{t-\sigma}) \frac{\eta_i}{\sqrt{t-\sigma}} d\eta d\sigma.$$

□

Důkaz
Časová derivace zleva se spočte podobně a vyjde stejně:

$$\partial_t u(t,x) = f(t,x) + \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{\pi^{n/2}} e^{-\|\eta\|^2} \dots d\eta d\sigma.$$

Víme:

$$\begin{aligned}\Delta u(t,x) &= \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{\pi^{n/2}} e^{-\|\eta\|^2} (\Delta f)(\sigma, x + 2\eta\sqrt{t-\sigma}) d\eta d\sigma = \\ &= \lim_{R\to+\infty} \int_0^t \int_{U(0,R)} \frac{1}{\pi^{n/2}} \operatorname{div}_\eta (\nabla_x f)(\dots) \frac{1}{2\sqrt{t-\sigma}} d\eta d\sigma = \\ &= \lim_{R\to+\infty} \left[\int_0^t \int_{\partial U(0,R)} \frac{1}{\pi^{n/2}} e^{-\|\eta\|^2} \frac{\nabla_x f(\dots)}{2\sqrt{t-\sigma}} \frac{\eta}{\|\eta\|} dS(\eta) d\sigma - \right. \\ &\left. - \int_0^t \int_{U(0,R)} \frac{1}{\pi^{n/2}} \nabla_x (e^{-\|\eta\|^2}) \nabla_x f(\dots) \frac{1}{2\sqrt{t-\sigma}} d\eta d\sigma \right] = \\ &= \int_0^t \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{\pi^{n/2}} e^{-\|\eta\|^2} 2\eta \cdot \frac{\nabla_x f(\dots)}{2\sqrt{t-\sigma}} d\eta d\sigma.\end{aligned}$$

□

Věta 4.3 (Klasické řešení Cauchyovy úlohy pro RVT v2)

Buď $u_0 \in C(\mathbb{R}^n) \cap L^\infty(\mathbb{R}^n)$. Definujeme

$$u_2(t,x) := \begin{cases} \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{(4\pi t)^{n/2}} e^{-\frac{\|\xi\|^2}{4t}} u_0(x-\xi) d\xi, & t > 0 \\ u_0(x), & t = 0. \end{cases}$$

Pak

1. $u_2 \in C([0,+\infty) \times \mathbb{R}^n) \cap C^\infty((0,+\infty) \times \mathbb{R}^n)$;
2. $\partial_t u_2 - \Delta u_2 = 0$ *v* $t > 0$, $x \in \mathbb{R}^n$,;
3. $u_2 = u_0$ *pro* $t = 0$;
4. $\|u_2\|_{L^\infty((0,+\infty)\times\mathbb{R}^n)} \leqslant \|u_0\|_{L^\infty(\mathbb{R}^n)}$.

Důkaz
Ukážeme pouze spojitost u_2 v $t = 0$ a 4.), ostatní podobně jako v předchozí větě.

$$x, y \in \mathbb{R}^n, t > 0 : |u_2(t, y) - u_0(x)| \leqslant \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{(4\pi t)^{n/2}} [u_0(y - \xi) - u_0(x)] d\xi.$$

$$\int_{U(0,R)} \frac{1}{(4\pi t)^{n/2}} e^{-\frac{\|\xi\|^2}{4t}} |\dots| d\xi + \int_{U(0,R)^C} \dots |\dots| d\xi = I_1 + I_2.$$

Fixujeme $\varepsilon > 0$. Najdu $R > 0$ tak, aby $\forall \xi \in U(x, 2R) : |u_0(\xi) - u_0(x)| < \varepsilon$. Pro $y \in U(0, R)$ platí v $I_1 : |y - \xi - x| \leqslant |y - x| + |\xi| < 2R \implies |u_0(y - \xi) - u_0(x)| < \varepsilon$ pro $\xi \in U(0, R)$.

$$I_1 \leqslant \varepsilon \int_{U(0,R)} \dots d\xi \leqslant \varepsilon \int_{\mathbb{R}^n} \dots d\xi = \varepsilon \to 0.$$

$$I_2 \leqslant 2\|u_0\|_\infty \int_{U(0,R)^C} \frac{1}{(4\pi t)^{n/2}} e^{-\frac{\|\xi\|^2}{4t}} d\xi = 2\|a_0\|_\infty \int_{U(0,R/\sqrt{4t})^C} \frac{1}{\pi^{n/2}} e^{-\|\xi\|^2} d\xi$$

$$\implies \exists t_0 > 0 \ \forall t \in (0, t_0) : I_2 \leqslant \varepsilon \implies |u_2(t, y) - u_0(x)| < 2\varepsilon,$$

tedy $u_2 \in C([0, +\infty) \times \mathbb{R}^n)$.

K 4.)

$$|u_2(t, x)| \leqslant \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{(4\pi t)^{n/2}} e^{-\frac{\|\xi\|^2}{4t}} |u_0(x - \xi)| d\xi \leqslant \|u_0\|_\infty \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{(4\pi t)^{n/2}} e^{-\frac{\|\xi\|^2}{4t}} d\xi = \|u_0\|_\infty.$$

□

Pozor
Z vlastností z předchozích dvou vět neplyne jednoznačnost řešení. (Plynula by, kdyby všechna řešení tyto vlastnosti splňovala.)

Věta 4.4 (Slabý princip maxima na omezené množině)

Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ omezená otevřená, $T > 0$, $Q_T = (0, T) \times \Omega$, $u \in C(\overline{Q_T})$, $\Gamma = (\{0\} \times \overline{\Omega}) \cup ((0, T) \times \partial\Omega)$, $\partial_t u, \nabla u, \nabla^2 u \in C(\overline{Q_T} \backslash \Gamma)$ a platí $\partial_t u - \Delta \leqslant 0$ na $\overline{Q_T} \backslash \Gamma$.

Pak $\max_{\overline{Q_T}} u = \max_\Gamma u$. (Tj. funkce nabývá maxima na hranici.)

Poznámka
Pro $\partial_t u - \Delta \geqslant 0$ platí totéž pro min.

Důkaz

Sporem. Ať $\max_{\overline{Q_t}} u = u(t_0, x_0) > \max_\Gamma u$. $u(t_0, x_0) - \max_\Gamma u =: \delta > 0$.

Definujme $v(t,x) := u(t,x) + \varepsilon|x - x_0|^2$, kde $\varepsilon \cdot (\operatorname{diam}\Omega)^2 < \delta/2$, $\varepsilon > 0$.

$$\partial_t v - \Delta v = \partial_t u - \Delta u - 2u\varepsilon < 0$$

$$(t,x) \in \Gamma : v(t_0, x_0) - v(t,x) = u(t_0,x_0) - u(t,x) - \varepsilon(|x - x_0|^2) \geqslant \delta - \varepsilon(\operatorname{diam}\Omega)^2 > \frac{\delta}{2}$$

$$v(t_1, x_1) := \max_{Q_T} v \geqslant v(t_0, x_0) > \max_\Gamma v.$$

Krok 2: v má v (t_1, x_1) maximum $\implies \nabla v(t_1, x_1) = 0$, $\partial_t v(t_1, x_1) \geqslant 0$.

$$0 > (\partial_t v - \nabla v)(t_1, x_1) \geqslant 0. \lightning.$$

□

Věta 4.5 (Slabý princip maxima pro Cauchyovu úlohu)

Buď $T > 0$, $u \in C([0,T] \times \mathbb{R}^n) \cap L^\infty((0,T) \times \mathbb{R}^n)$, $\partial_t u, \nabla u, \nabla^2 u \in C([0,T] \times \mathbb{R}^n)$ a platí $\partial_t u - \Delta u \leqslant 0$ na $(0,T] \times \mathbb{R}^n$ (resp. $\geqslant$). Pak platí $\sup_{[0,T]\times\mathbb{R}^n} u \leqslant \sup_{\{0\}\times\mathbb{R}^n} u$ (resp. $\inf \geqslant \inf$).

Důkaz

Sporem: Ať existuje $(t_0, x_0) \in (0,T] \times \mathbb{R}^n$, $u(t_0, x_0) > \sup_{\{0\}\times\mathbb{R}^n} u$. Definujme

$$v(t,x) := u(t,x) - \varepsilon\left(t - t_0 + \frac{|x - x_0|^2}{Ln}\right), \qquad \varepsilon > 0.$$

v řeší RVT, $v(t_0, x_0) = u(t_0, x_0)$. $\sup_{\{0\}\times\mathbb{R}^n} v \leqslant \sup_{\{0\}\times\mathbb{R}^n} u + \varepsilon T < u(t_0, x_0) = v(t_0, x_0)$ pro vhodně malé ε.

Odhad v v $(0,T) \times \partial U(x_0, R)$ pro j, $R > 0$:

$$\sup_{(0,T]\times\partial U(x_0,R)} \leqslant \sup_{(0,T]\times\mathbb{R}^n} u + \varepsilon T - \varepsilon\frac{R^2}{2n} < v(t_0, x_0)$$

pro R ? velké. □

Definice 4.4

Funkci definovanou pro $x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ předpisem

$$\varphi(x) = \begin{cases} -\frac{1}{2\pi}\ln|x|, & n = 2 \\ \frac{|x|^{2-n}}{n\cdot(n-2)\alpha_n}, & n \in \mathbb{N} \wedge n > 2, \end{cases}$$

nazveme fundamentálním řešením Laplaceovy rovnice.

Věta 4.6

Platí $\varphi, \nabla\varphi \in C^\infty(\mathbb{R}^n \setminus \{0\}) \cap L^1_{loc}(\mathbb{R}^n)$, $-\Delta\varphi = 0$ *v* $\mathbb{R}^n\setminus\{0\}$, $\forall\psi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^n) : -\int_{\mathbb{R}^n} \varphi\Delta\psi = \psi(0)$.

Důkaz

První dvě tvrzení cvičení, třetí plyne z následující věty. □

Věta 4.7 (O 3 potenciálech)

Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ *otevřená, omezená s* C^1 *hranicí.* $u \in C^2(\overline{\Omega})$. *Pro pevné* $x \in \Omega$, $y \in \mathbb{R}^2\setminus\{x\}$ *definujeme* $\varphi_x(y) = \varphi(x-y)$. *Pak pro* $x \in \Omega$ *platí:*

$$u(x) = \int_\Omega (-\Delta u)\varphi_x d\lambda^n + \int_{\partial\Omega} \frac{\partial u}{\partial\nu}\varphi_x dS - \int_{\partial\Omega} u\frac{\partial\varphi_x}{\partial\nu} ds,$$

kde ν *je jednotková vnější normála.*

Poznámka

$-\Delta u = f$ v Ω a $u = u_0$ na $\partial\Omega$.

Důkaz
Z Greenovy identity (pro $u, v \in C^2(\overline{\Omega})$):

$$\int_{\Omega_\varrho} \Delta u \cdot v - u \cdot \Delta v d\hat{\lambda} = \int_{\partial\Omega_\varrho} \frac{\partial u}{\partial \nu} v - u \frac{\partial v}{\partial \nu} dS,$$

kde $\Omega_\varrho = \Omega \backslash \overline{U(x,\varrho)}$, $v := \varphi_x$.

Zafixujeme $x \in \Omega$, $\varrho > 0$, $\varrho < \operatorname{dist}(x, \partial\Omega)$: $\Omega_\varrho = \Omega \backslash \overline{U(x,\varrho)}$. Na $\Omega_r ho$ lze použít větu 2.6I? na funkce $u = \varphi_x$.

$$(*) I_\varrho - II_\varrho := \int_{\Omega_\varrho} \Delta u \varphi_x - \int_{\Omega_\varrho} u \Delta \varphi_x = \int_{\partial\Omega_\varrho} \frac{\partial u}{\partial \nu} \varphi_x dS - \int_{\partial\Omega_\varrho} u \frac{\partial \varphi_x}{\partial \nu} dS =: III_\varrho - IV_\varrho.$$

$II_\varrho = 0$ neboť $\Delta\varphi_x = 0$ v Ω_ϱ.

$I_\varrho \xrightarrow{\varrho \to 0_+} \int_\Omega \Delta u \varphi_x d\lambda^2$ podle Lebesgueovy věty pro $|\Delta u \varphi_x \chi_{\Omega_\varrho}| \leqslant |\Delta u| \cdot |\varphi_x| \in L^1(\Omega)$.

$$III_\varrho = \int_{\partial\Omega} \frac{\partial u}{\partial \nu} \varphi_x dS + \int_{\partial[U(x,\varrho)^C]} \frac{\partial u}{\partial \nu} \varphi_x dS = ?$$

$$-\underbrace{(\ldots)}_{\to 0} \leqslant III_\varrho \leqslant \underbrace{⨍_{\partial U(x,\varrho)^C} dS}_{=1} \cdot \|\frac{\partial u}{\partial \nu}\|_{L^\infty(\partial U(x,\varrho))} \cdot \frac{\varrho}{n-2} \to 0.$$

$$IV_\varrho = \int_{\partial\Omega} u \frac{\partial \varphi_x}{\partial \nu} dS + \underbrace{\int_{\partial U(x,\varrho)^C} u \frac{\partial \varphi_x}{\partial \nu} dS}_{IV_\varrho}.$$

$$IV_{\varrho n} : \nabla\varphi_x(y) \overset{n \geq 2}{=} \frac{1}{n(n-2)\alpha_n} (2-n)|x-y|^{1-n} \frac{-(x-y)}{|x-y|} = + \frac{1}{n \cdot \alpha_n} \frac{x-y}{|x-y|^n},$$

$$\nu(y) = \frac{x-y}{|x-y|}, \qquad \frac{\partial \varphi_x(y)}{\partial \nu} = \frac{1}{n\alpha_n} \frac{1}{|x-y|^{n-1}} = \frac{1}{n\alpha_n \varrho^{n-1}}.$$

$$IV_{\varrho n} = ⨍_{\partial U(x,0)} u dS \to u(x).$$

Limitním přechodem $\varrho \to 0_+$ z $*$ dostáváme znění věty. □

Důsledek
Řešení Cauchyovy úlohy pro RVT je určeno jednoznačně na třídě formulí, které jsou omezené a splňují regulace z předchozí věty.

Důkaz
Tedy v tomto případě je řešení dáno větami výše. □

Důsledek
Řešení Cauchyovy úlohy pro RVT (na třídě funkcí z minulé větě) závisí spojitě na datech úlohy.

Důkaz
Ať $T > 0$, u a v omezené, splňující regulace z předchozí věty a řešící $\partial_t u - \Delta u = f$, $\partial_t v - \Delta v = g$ v $(0,T] \times \mathbb{R}^n$ a $u = u_0$ a $v = v_0$ v $\mathbb{R}^n$. Pak

$$\|u - v\|_{L^\infty((0,T)\times\mathbb{R}^n)} \leqslant \|u_0 - v_0\|_{L^\infty(\mathbb{R}^n)} + T \cdot \|f - g\|_{L^\infty((0,T)\times\mathbb{R}^n)}.$$

Pro rozdíl $w = u - v$ předchozí věta říká, že w je def. ve větách výše, což nám dává právě tento odhad. □

Pozor
Klasické řešení RVT není jednoznačně určeno.

Důkaz
Existuje řešení $\partial_t u - \Delta u = 0$ v $(0,T) \times \mathbb{R}^n$, $u = 0$ na $\{0\} \times \mathbb{R}^n$, které je netriviální. □

5 Eliptické rovnice: Laplaceova a Poissonova

Definice 5.1

Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, $f : \Omega \to \mathbb{R}$. Rovnicí $-\Delta u = 0$ neznámou $\Omega \to \mathbb{R}$ nazveme Laplaceovou rovnicí. Rovnici $-\Delta u = f$ v Ω pro neznámou $u : \Omega \to \mathbb{R}$ nazveme Poissonovou rovnicí.

Definice 5.2 (A opakování Gamma funkce)

$$\Gamma(z) := \int_0^{+\infty} s^{z-1} e^{-s} ds, \qquad \Re z > 0.$$

$$\Re(z) > 0 : \Gamma(z+1) = z\Gamma(z), \qquad \alpha_n := \lambda^n(U(0,1)) = \frac{\pi^{n/2}}{\Gamma\left(\frac{n}{2} + 1\right)}.$$

Důkaz (Věty před 3 potenciály)
Fixujme $\varphi \in D(\mathbb{R}^n)$, $R > 0$, $\operatorname{supp} \varphi \subset U(0, R) =: \Omega$, $u := \varphi$ a $x := 0$ a použijeme větu o 3 potenciálech, $u(0) = \varphi(0) = -\int_\Omega \Delta\varphi\Phi$. $\square$

Důsledek
Fixujme $f \in D(\mathbb{R}^n)$, $\varphi(y) := f(x - y)$ a dosadíme do věty (před 3 potenciály) bod c): $f(x) = \varphi(0) =$

$$= -\int_{\mathbb{R}^n} \Phi(y)\Delta_y f(x-y)dy = -\int_{\mathbb{R}^n} \Phi(y)\Delta_x f(x-y)dy = -\Delta_x \left(\int_{\mathbb{R}^n} \Phi(y) f(x-y)dy \right).$$

Definice 5.3 (Klasické řešení Poissonovy rovnice)

Buď $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$. Řekněme, že $u : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ je klasické řešení Poissonovy rovnice s pravou stranou f na $\mathbb{R}^n$, pokud $u \in C^2(\mathbb{R}^n)$ a platí $-\Delta u = f$ na $\mathbb{R}^n$.

Věta 5.1

Buď $f \in D(\mathbb{R}^n)$. Pak pro $u : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ definovaná pro $x \in \mathbb{R}^n$ jako

$$u(x) = \int_{\mathbb{R}^n} \Phi(y) f(x-y)dy$$

je klasické řešení Poissonovy rovnice s pravou stranou f na $\mathbb{R}^n$.

Důkaz
Podobně jako v předcházejícím důsledku. Jediné, co je potřeba je $u \in C^2$. To se dělá přes derivaci integrálu podle parametru, což vyžaduje majorantu: $|\Phi(y)(\nabla^2 f)(x-y)| \leqslant \max_{\mathbb{R}^n} |\nabla^2 f|\Phi(y)$. $\square$

Definice 5.4 (Harmonické funkce)

Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ neprázdná otevřená. Řekneme, že $u : \Omega \to \mathbb{R}$ je harmonická v Ω funkce ($u \in \mathcal{H}(\Omega)$), pokud $u \in C^2(\Omega)$ a $\Delta u = 0$ v Ω.

Například

- $a \in \mathbb{R}^n$, $b \in \mathbb{R}$, $u(x) := a \cdot x + b$ je harmonická na $\mathbb{R}^n$;
- $u(x) = x_1, x_2$ pro $x \in (x_1, \ldots, x_n) \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathcal{H}(\mathbb{R}^n)$;
- $\Phi_x \in \mathcal{H}(\mathbb{R}^n \setminus \{x\})$ pro $x \in \mathbb{R}^n$;
- w holomorfní na $\Omega \subset \mathbb{C}$, pak $\Re w$ a $\Im w$ jsou $\mathcal{H}(\Omega)$ (z Cauchy-Riemannovy podmínky).

Věta 5.2 (O průměru)

Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ neprázdná otevřená, $u \in \mathcal{H}(\Omega)$. Pro každou kouli $U(x,r)$, takovou, že $\overline{U(x,r)} \subset \Omega$ platí

$$u(x) = \fint_{U(x,r)} u d\lambda^n = \fint_{\partial U(x,r)} u dS.$$

Důkaz

Důsledek věty o 3 potenciálech. Dosadíme u, $\Omega = U(x,r)$, x:

$$u(x) = \int_{\partial U(x,r)} \frac{\partial u}{\partial \nu} \Phi_x ds - \int_{\partial U(x,1)} u \frac{\partial \Phi_x}{\partial \nu} dS = I + II.$$

$$I : \Phi_x(y) = g(r)\ \forall y \in \partial U(x,r). I = g(r) \int \frac{\partial u}{\partial \nu} dS = g(r) \int_{U(x,r)} \operatorname{div} \nabla u = 0.$$

II : Ve větě o 3 potenciálech bylo ukázáno, že $\frac{\partial \Phi_x}{\partial \nu} = -\left(\int_{\partial u(x,r)} 1 dS\right)^{-1}$. Tedy $u(x) = \fint_{\partial U(x,r)} y dS$.

$$g(r) = \int_{U(x,r)} u d\lambda - \varkappa_n r^n u(x), \qquad g(0) = 0, \qquad g'(r) = \int_{\partial U(x,r)} u dS - \varkappa_n n r^{n-1} n u(x) = 0$$

$$\implies g \equiv 0.$$

$\square$

Věta 5.3 (Liouvilleova)

Buď $u \in \mathcal{H}(\mathbb{R}^n)$ a buď u omezená na $\mathbb{R}^n$. Pak je u konstantní na $\mathbb{R}^n$.

Důkaz
Zafixujme si $x, y \in \mathbb{R}^n$ a $R > 0$, $u(x) - u(y) = \fint_{U(x,R)} u - \fint_{U(y,R)} u =$

$$= \frac{1}{\varkappa_n R^n} \left(\int_{U(x,R) \setminus U(y,R)} u - \int_{U(y,R) \setminus U(x,R)} u \right) \leqslant$$

$$\leqslant \frac{2}{\varkappa_n R^n} \sup_{\mathbb{R}^n} |u| \lambda^n \left(U(x,R) \setminus U(y,R) \right).$$

Pozorování $U(x,R) \setminus U(yR) \subset U(y, R + (x-y)) \setminus U(y,R)$, tedy $u(x) - u(y) \leqslant$

$$\leqslant \frac{2}{\varkappa_n R^n} \sup_{\mathbb{R}^n} |u| \varkappa_n ((R + |x-y|)^n - R^n) \leqslant \frac{2}{R^n} \sup_{\mathbb{R}^n} |u| |x-y| \left(n \cdot (R + |x-y|) \right)^n \leqslant$$

$$\leqslant \frac{2}{R^n} \sup_{\mathbb{R}^n} |u| |x-y| \cdot n \cdot (2R)^{n-1} \leqslant \frac{C}{R}.$$

(Pro dostatečně velká R.) □

Věta 5.4

Buď $f \in C(\mathbb{R}^n)$, u a v klasická řešení rovnice $-\Delta u = f$ na $\mathbb{R}^n$ a $\lim_{|x| \to +\infty} (u - v)(x) = 0$. Potom $u = v$ na $\mathbb{R}^n$.

Důkaz
$u - v \in \mathcal{H}(\mathbb{R}^n)$, $u - v$ je omezená na $\mathbb{R}^n$ (na kompaktní množině – kouli – je spojitá funkce omezená a mimo ni je menší než ε). Tedy z předchozí věty je konstantní. Ale protože $\lim = 0$, tak je „konstanta“ nula. □

Věta 5.5 (Silný princip maxima)

Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ neprázdná, otevřená, souvislá, $u \in \mathcal{H}(\Omega)$ a $\exists x_0 \in \Omega$ takové, že u nabývá v x_0 svého extrému (i neostrého). Pak je u konstantní.

Důkaz
Předpokládejme, že x_0 je maximum. Pak definujeme $M = \{x \in \Omega | u(x) = u(x_0)\}$. M je uzavřená v Ω (vzor uzavřené – jednobodové – množiny při spojitém zobrazení). M je otevřená, protože z $\fint_{U(x,R)} u(x) = \fint_{U(x,R)} u(y) \leqslant \fint_{U(x,R)} u(x_0)$ vyplývá, že kolem každého bodu $x \in M$ existuje koule v M, kde skoro všude (tj. ze spojitosti všude) je $u(y) = u(x_0)$. A jediná neprázdná ($\ni x_0$) obojetná množina v $\mathbb{R}^n$ je $\mathbb{R}^n$. □

Důsledek (Slabý princip maxima)
Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ neprázdná, otevřená, souvislá, omezená. $u \in \mathcal{H}(\Omega) \cap C(\overline{\Omega})$. Pak

$$\min_{\partial\Omega} u \leqslant \min_{\overline{\Omega}} u \leqslant \max_{\overline{\Omega}} u \leqslant \max_{\partial\Omega} u.$$

Důsledek
Jednoznačnost na omezených množinách.