Skript k přednášce Úvod od parciálních diferenciálních rovnic — nmma339 — 2023

Petr Kaplický

Obsah

1 Sylabus **z přípravy akreditace 2017** **4**

2 Přednáška **Poslední změna: 12.01.2024 16:03:29** **5**

1 Základní informace o PDR . . . 5

2 Cauchyova úloha pro kvazilineární PDR 1. řádu . . . 11

3 O klasifikaci rovnic 2. řádu . . . 16

4 Vlnová rovnice . . . 17

5 Rovnice vedení tepla . . . 22

6 Eliptické rovnice - Laplaceova a Poissonova rovnice . . . 25

3 Cvičení **Poslední změna: 12.01.2024 16:01:59** **29**

1 První cvičení (6.10.2023) . . . 29

2 Druhé cvičení - homogenní lineární rovnice prvního řádu (13.10.2023) . . . 30

3 Třetí cvičení - lineární a kvazilineární rovnice prvního řádu . . . 30

4 Čtvrté cvičení - kanonický tvar rovnice druhého řádu . . . 31

5 Páté cvičení . . . 32

6 6. cvičení - Vlnová rovnice - zrcadlení . . . 34

7 7. cvičení - Vlnová rovnice - Fourierova metoda . . . 35

8 8. cvičení - Vlnová rovnice - Fourierova metoda - 2D . . . 35

9 9. cvičení - vlnová rovnice 2d a 3d . . . 35

10 10. cvičení - zápočtová písemka . . . 36

11 11-té cvičení . . . 36

12 12-té cvičení . . . 37

13 Zbytky . . . 37
13.1 26.11. . . . 38
13.2 3.12. . . . 38
13.3 Notace . . . 39
13.4 Korektnost podle Hadamarda . . . 39
13.5 Lineární a kvazilineární PDR 1. řádu . . . 40
13.6 Kanonický tvar lineárních PDR 2. řádu ve dvou proměnných . . . 41
13.7 Řešení lineárních rovnic 2. řádu ve dvou proměnných . . . 42
13.8 Klasifikace PDR 2. řádu s konstantními koeficienty v $\mathbb{R}^n$ . . . 43
13.9 Charakteristiky . . . 43
13.10 Vlastní čísla druhé derivace . . . 43
13.11 Vlnová rovnice . . . 44
13.12 Vlnová rovnice s nenulovou pravou stranou . . . 46
13.13 Rovnice vedení tepla . . . 46

4 Písemky **47**
1 1. zápočtová písemka . . . 47
2 Opravné příklady na zápočet . . . 47

5 Domácí úkol **48**
1 Odvození fundamentálního řešení rovnice vedení tepla (RVT) . . . 48

Úvod do parciálních diferenciálních rovnic – typický sylabus

1. Základní informace o PDR (2 přednášky)
Notace. Různé typy PDR. Klasifikace PDR 2. řádu ve 2D a v Rn. Rovnice matematické fyziky. Počáteční a okrajové podmínky. Cauchyova úloha. Klasické řešení. Korektnost úlohy.

2. Cauchyova úloha pro kvazilineární PDR 1. řádu (1 přednáška)
Charakteristiky. Konstrukce a vlastnosti řešení ve speciálních případech.

3. Vlnová rovnice (4 přednášky)
Řešení Cauchyovy úlohy a smíšené úlohy pro rovnici struny metodou charakteristik. Fourierova metoda pro rovnici struny. Integrál energie. Metoda sférických průměrů a metoda sestupu pro vlnovou rovnici v Rn.

4. Parabolické rovnice (2 přednášky)
Princip maxima pro parabolické rovnice na omezené prostorové oblasti, apriorní odhad. Řešení Cauchyovy úlohy pro rovnici vedení tepla pomocí škálování, princip maxima. Řešení smíšené úlohy pro rovnici vedení tepla Fourierovou metodou.

5. Eliptické rovnice (4 přednášek)
Princip maxima pro eliptické úlohy. Okrajové úlohy pro Laplaceovu a Poissonovu rovnici. Věta o třech poteciálech. Greenova funkce. Poissonův vzorec pro řešení Dirichletovy úlohy pro Laplaceovu rovnici na kouli. Harmonické funkce. Existence řešení Dirichletovy úlohy pro Laplaceovu rovnici.

6. Pokud zbyde čas:
Řešení rovnic pomocí Fourierovy transformace v L^1.

Anotace:

Základní informace o PDR - motivace, typy PDR, typy úloh a jejich klasická řešení (2)
Cauchyova úloha pro kvazilineární PDR 1. řádu - existence a vlastnosti řešení(1)
Vlnová rovnice - klasické řešení, jeho vlastnosti (4)
Parabolické rovnice - klasické řešení a jeho vlastnosti, princip maxima (2)
Eliptické rovnice - klasické řešení a jeho vlastnosti, princip maxima (4)

Literatura:

L. C. Evans: Partial Differential Equations, AMS 1999
M. Renardy, R. C. Rogers: An introduction to partial differential equations, Springer 1993

2 Přednáška

Poslední změna: 12.01.2024 16:03:29

Přednáška a skript vznikají hlavně s využitím skriptu M. Rokyty z roku 2011. Velké části jsou doslovně přejaty.

Některé části jsem nestihl zcela odpřednést, ale je dobré je v celém textu pro úplnost mít. Jsou uvedeny šedě jako tento odstavec.

1 Základní informace o PDR

Notace. Rovnice matematické fyziky. Počáteční a okrajové podmínky. Cauchyova úloha. Klasické řešení. Korektnost úlohy.

Úvod Úvodní povídání o parciálních diferenciálních rovnicích (PDR). PDR používáme k popisu jevů, které pozorujeme v reálném světě. Tyto jevy můžou být velice odlišného charakteru, například šíření vln v nějakém prostředí, rozložení teploty v daném tělese, pohyb aut po dálnici, tání ledu. Nedá se čekat, že bude existovat jednotná teorie pro PDR. Je také možné vymyslet spoustu příkladů PDR, které pravděpodobně nic nepopisují. Při výběru rovnic, kterými se budeme zabývat, je potřeba dobře zvážit, zda jejich studium má smysl. Dobré kriterium je, jestli daná rovnice má nějaké využití, například ve fyzice, biologii, přírodovědě, ekonomii...

Ke studiu PDR využijeme většinu znalostí, které jsme dosud získali. Speciálně budeme aplikovat výsledky z Matematické analýzy, Teorie míry, Geometrie, Lineární algebry, Funkcionální analýzy.

Parciální diferenciální rovnice, notace Nejprve se seznámíme se základním značením, které budeme používat v celém učebním textu. Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^m$, $m \in \mathbb{N}$, otevřená množina, $u : \Omega \to \mathbb{R}$ reálná funkce. V bodech $x \in \Omega$, ve kterých existují příslušné derivace vlastní, označíme:[1]

$$\frac{\partial u}{\partial x_j} \equiv u_{x_j} \equiv \partial_{x_j} u \equiv \partial_j u\,, \qquad \text{parciální derivace funkce } u \text{ podle proměnné } x_j\,,$$

$$\nabla u \equiv Du := \left(\frac{\partial u}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial u}{\partial x_d}\right), \qquad \text{gradient } u\,.$$

Formálně lze psát

$$\nabla := \left(\frac{\partial}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_d}\right), \qquad \text{operátor „nabla“},$$

symbol „∇“ je tedy možné chápat jako zobrazení, které diferencovatelné funkci u přiřadí vektorovou funkci ∇u.

Pro vektorovou[2] funkci $\mathbf{f} : G \subset \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^s$, G otevřená množina, $\mathbf{f} := \big(f_1, \dots, f_s\big)^T$, $f_j : G \to \mathbb{R}$, $j = 1, \dots, d$, značíme (opět - a takto tomu bude i ve zbytku tohoto paragrafu – v bodech $x \in G$, ve kterých existují příslušné derivace vlastní):

$$\nabla \mathbf{f} := \big(\nabla f_1, \dots, \nabla f_s\big)^T\,,$$

tedy „gradient vektorové funkce uvažujeme po složkách“.

Pro $\mathbf{f} : G \subset \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^m$, G otevřená množina (ano, dimenze prostorů, ze kterého a do kterého $\mathbf{f}$ zobrazuje, je tatáž), značíme dále:

$$\operatorname{div} \mathbf{f} := \sum_{j=1}^{m} \frac{\partial f_j}{\partial x_j} \equiv \nabla \cdot \mathbf{f}\,, \qquad \text{operátor „divergence“}.$$

[1] Zápisem $A := B$, případně $B =: A$, budeme rozumět, že A je definováno pomocí B. Naprotitomu symbol „$\equiv$“ bude mít význam ztotožnění nebo ekvivalence, případně identické rovnosti, nikoli definice.

[2] Vektorovou funkci budeme někdy též značit polotučně, $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_s)^T$, nebo pomocí symbolu vektoru, $\vec{f} = (f_1, \dots, f_s)^T$, často však budeme symbol vektoru vynechávat, bude-li situace jasná z kontextu. Symbolem $(\dots)^T$ zde jako obvykle označujeme transponovaný (tj. „sloupečkový“) vektor.

Poznámka. Pro $\mathbf{f} : G \subset \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^m$ je tedy potřeba rozlišovat mezi $\nabla \mathbf{f}$ (vektorový gradient) a $\nabla \cdot \mathbf{f}$ (divergence $\mathbf{f}$ chápaná jako formální skalární součin operátoru nabla a vektoru $\mathbf{f}$).[3] Zatímco $\nabla \mathbf{f}$ je (Jacobiho) matice prvních derivací $\mathbf{f}$, rozměru $m \times m$, je $\operatorname{div} \mathbf{f} \equiv \nabla \cdot \mathbf{f}$ její stopa, tedy, v právě zavedeném značení,

$$\nabla \cdot \mathbf{f} = \operatorname{Tr}(\nabla \mathbf{f}) .$$

Pro $u : \Omega \subset \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}$, resp. $\mathbf{f} : G \subset \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^s$ definujeme (se stejnými konvencemi jako výše)

$$\Delta u := \sum_{j=1}^{d} \frac{\partial^2 u}{\partial x_j^2} , \qquad \Delta \mathbf{f} := \big(\Delta f_1, \dots, \Delta f_s\big)^T ,$$

tzv. Laplaceův operátor. Symboly „∇“ a „Δ“ tedy používáme v nezměněné podobě jak pro skalární, tak pro vektorové funkce.

Vektor tvaru $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)$, kde $\alpha_j \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, $j = 1, \dots, m$, nazvu m-dimenzionálním multiindexem *výšky* (někdy též *řádu*) $|\alpha|$, kde

$$|\alpha| := \alpha_1 + \cdots + \alpha_m .$$

Pro multiindex $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ a funkci $u \in \mathcal{C}^{|\alpha|}(\Omega)$, kde $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ je neprázdná otevřená množina, definujeme *derivaci u dle multiindexu α*, v bodě $x \in \Omega$,

$$\mathrm{D}^\alpha u(x) := \frac{\partial^{|\alpha|} u(x)}{\partial x_1^{\alpha_1} \dots \partial x_m^{\alpha_m}} , \qquad x = (x_1, \dots, x_d) \in \Omega .$$

Pro $k \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ zavádíme množinu (často se říká „formální vektor“) všech parciálních derivací řádu k funkce $u \in \mathcal{C}^k(\Omega)$, v bodě $x \in \Omega$,

$$\mathrm{D}^{(k)} u(x) := \{\mathrm{D}^\alpha u(x);\ |\alpha| = k\} ,$$

pro $\mathbf{f} : G \subset \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^s$ píšeme podobně jako výše

$$\mathrm{D}^\alpha \mathbf{f}(x) := \big(\mathrm{D}^\alpha f_1(x), \dots, \mathrm{D}^\alpha f_s(x)\big)^T , \qquad \mathrm{D}^{(k)} \mathbf{f}(x) := \{\mathrm{D}^\alpha \mathbf{f}(x);\ |\alpha| = k\} .$$

Cvičení. Nechť $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ je neprázdná oblast, $x \in \Omega$. Rozmyslete si, že platí:

- Pro funkci $u \in \mathcal{C}^k(\Omega)$ je počet prvků $\mathrm{D}^{(k)} u(x)$ roven d^k.
- Pro funkci $u \in \mathcal{C}(\Omega)$ je $\mathrm{D}^{(0)} u(x) = u(x)$.
- Pro funkci $u \in \mathcal{C}^1(\Omega)$ jsou prvky množiny $\mathrm{D}^{(1)} u(x)$ tytéž jako prvky vektoru $\nabla u(x) \equiv Du(x)$.
- Pro funkci $u \in \mathcal{C}^2(\Omega)$ jsou prvky množiny $\mathrm{D}^{(2)} u(x)$ tytéž jako prvky matice $H(u(x)) := \left(\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_i \partial x_j}\right)_{i,j=1}^{d}$. Matice $H(u(x))$ je tzv. *Hessova matice* druhých derivací funkce u v bodě x. Přesvědčte se dále, že v tomto značení je $\Delta u = \operatorname{Tr}(H(u))$.

Na otázku „co vlastně je parciální diferenciální rovnice“ lze (poněkud nepřesně, ale názorně) odpovědět tak, že je to rovnice pro neznámou funkci u více než jedné proměnné, která obsahuje alespoň jednu její parciální derivaci. Matematická definice může vypadat například takto.

[3] Značení „$\nabla \cdot \mathbf{f}$“ nepatří k nejšťastnějším právě pro jeho snadnou zaměnitelnost s „$\nabla \mathbf{f}$“, skutečností však zůstává, že je, zejména v aplikacích, často používané.

Definice 1.1. *Buďte $d, n \in \mathbb{N}$, $d \geq 2$. Buď dále $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ neprázdná otevřená množina.* Parciální diferenciální rovnicí *(dále PDR) pro neznámou funkci $u : \Omega \to \mathbb{R}$ nazvu výraz tvaru*

$$F\big(x, u(x), Du(x), \cdots, D^{(n-1)}u(x), D^{(n)}u(x)\big) = 0\,, \tag{1.1}$$

kde

$$F : \Omega \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^d \times \cdots \times \mathbb{R}^{d^{n-1}} \times \mathbb{R}^{d^n} \to \mathbb{R}$$

je daná funkce.

Poznámka. *Řádem* rovnice (1.1) rozumíme řád nejvyšší derivace u, která „se vyskytuje“ v (1.1). Bez újmy na obecnosti lze učinit úmluvu, že zápisem (1.1) budeme vyjadřovat skutečnost, že řád rovnice (1.1) je právě n, tedy že funkce F je nekonstantní v alespoň jedné z posledních d^n proměnných.

Více než jednu rovnici pro více než jednu neznámou funkci nazýváme systémem PDR. Onu „více než jednu neznámou funkci“ lze také chápat jako jednu vektorovou funkci a podobně pro „více než jednu rovnici“. Definice systému PDR pak vypadá takto.

Definice 1.2. *Buďte $s, d, n \in \mathbb{N}$, $s, d \geq 2$. Buď dále $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ neprázdná otevřená množina.* Systémem s parciálních diferenciálních rovnic *pro neznámou vektorovou funkci $\mathbf{u} : \Omega \to \mathbb{R}^s$ nazvu výraz tvaru*

$$\mathbf{F}\big(x, \mathbf{u}(x), D\mathbf{u}(x), \cdots, D^{(n-1)}\mathbf{u}(x), D^{(n)}\mathbf{u}(x)\big) = 0\,, \tag{1.2}$$

kde

$$\mathbf{F} : \Omega \times \mathbb{R}^s \times \mathbb{R}^{sd} \times \cdots \times \mathbb{R}^{sd^{n-1}} \times \mathbb{R}^{sd^n} \to \mathbb{R}^s$$

je daná funkce.

Úmluvu z poznámky 1 budeme v dalším vztahovat i na systém PDR, budeme tedy pod *řádem* systému (1.2) rozumět řád nejvyšší derivace $\mathbf{u}$, která se vyskytuje v rovnicích (1.2) a současně předpokládat, že zápisem (1.2) vyjadřujeme skutečnost, že řád tohoto systému právě n.

Nejčastěji se v teorii PDR vyskytují systémy, pro které $m = s$, tedy systémy, u kterých je počet rovnic roven počtu neznámých funkcí. Lze se však setkat i se systémy *přeurčenými* ($m > s$), případně *podurčenými* ($m < s$).

Definice pojmu *řešení* (1.1) resp. (1.2) obecně závisí na tom, v jakém smyslu se chápou derivace a rovnosti, které se v (1.1) resp. (1.2) vyskytují. Z klasického pojetí vlastní derivace a rovnosti ve všech bodech $x \in \Omega$ vychází pojem tzv. *klasického řešení* (1.1) resp. (1.2).

Definice 1.3. Klasickým řešením (1.1) *resp.* (1.2) *v neprázdné otevřené množině $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ nazveme funkci $u : \Omega \to \mathbb{R}$ resp. $\mathbf{u} : \Omega \to \mathbb{R}^s$, mající ve všech bodech $x \in \Omega$ vlastní všechny derivace, vyskytující se v* (1.1) *resp.* (1.2)*, a splňující* (1.1) *resp.* (1.2) *identicky v Ω.*

Poznámka.

1. Místo podmínky „mající ve všech bodech $x \in \Omega$ vlastní všechny derivace, vyskytující se v (1.1) resp. (1.2)“ se často používá jednodušší podmínka, požadující však od u více: v této „klasičtější definici“ klasického řešení, se požaduje, aby $u \in \mathcal{C}^n(\Omega)$, kde n je řád (1.1) resp. (1.2). I zde je však podstatné to, že se vyžaduje splnění (1.1) resp. (1.2) identicky v Ω.

2. Existují i jiná, obecnější pojetí pojmu řešení PDR, při kterých se například některé derivace uvažují pouze ve skoro všech bodech, případně se uvažují takzvané slabé derivace, derivace ve smyslu distribucí, atd. Tento učební text se však bude zabývat pouze klasickou teorií, vycházející z definice 1.3 resp. její modifikace z předchozího bodu, což vždy v textu přesně specifikujeme.

Poznámka 1.4. Často hraje ve vztahu (1.1), resp. vztazích (1.2) jedna z proměnných x_j význačnou roli. Tato význačnost může spočívat například v tom, že nejvyšší parciální derivace u podle této proměnné jsou nižšího řádu než je řád rovnice, nebo v tom se v rovnici vyskytují „s jiným znaménkem“ než derivace podle zbylých proměnných. Většinou je v těchto případech důležitá fyzikální interpretace rovnic (1.1), resp. (1.2), podle které taková významná proměnná často hraje roli „času“. V tomto případě je zvykem buď tuto proměnnou přeznačit symbolem t („čas“), tedy uvažovat buď například $x_1 \equiv t$, tedy

$$u = u(x)\,, \quad \text{kde } \; x = (t, x_2, \ldots, x_d)\,,\; x \in \Omega\,,$$

v tomto případě pak Ω chápeme jako „časoprostorovou oblast“. Druhou možností je rozšířit počet stávajících proměnných funkce u o jednu, tzv. „časovou proměnnou“ t, a psát

$$u = u(t, x)\,, \quad \text{kde } \; (t, x) \in (0, T) \times \Omega\,, \quad T > 0\,.$$

Druhý z právě zmíněných případu je obvyklejší a budeme jej v tomto učebním textu používat. I v tomto případě však někdy (zejména pro jednoduchost zápisu) ztotožníme $t \equiv x_0$ a budeme psát

$$u = u(x)\,, \quad \text{kde } \; x = (x_0, x_1, \ldots, x_d)\,,\; x \in (0, T) \times \Omega\,,\; T > 0\,.$$

Tuto konvenci ve značení použijeme například v teoretické části paragrafu 2.

Poznámka. Rovnicím, které neobsahují časovou proměnnou, říkáme *stacionární*, rovnicím „s časem“ říkáme *nestacionární* nebo *evoluční*. Poznámka 1.4 ukazuje, proč se tyto termíny nesnažíme definovat „matematicky přesně“: sama přítomnost „času“ v rovnici je totiž závislá na interpretaci role některých proměnných.

Odvození základních rovnic matematické fyziky V úvodu jsme zmínili, že je potřeba dobře vybírat rovnice, které chceme studovat. Nyní odvodíme základní rovnice, pro které si v následujícím kursu ukážeme teorii. Na odvození transportní rovnice, rovnice vedení tepla a vlnové rovnice se zatím podíváme do materiálů od Novozhilova. Stručnější a jednodušší odvození vlnové rovnice je v [Evans, 2010, Sekce 2.4] - příslušná stránka je zde.

. . . . konec přednášky 1, 6.10.2023

Nyní zavedeme označení speciálních typů PDR, které budeme studovat. Protože se v tomto učebním textu nebudeme zabývat systémy PDR, budeme násedujíci pojmy definovat pouze pro jednu parciální diferenciální rovnici.

Definice 1.5.

- *Parciální diferenciální rovnici (dále jen „rovnici“)* (1.1) *nazveme* lineární*, lze-li ji psát ve tvaru*

$$\sum_{|\alpha| \le n} a_\alpha(x) \mathrm{D}^\alpha u(x) = f(x)\,, \qquad x \in \Omega\,, \tag{1.3}$$

  pro dané funkce a_α, f. Rovnici (1.3) *nazveme* homogenní*, pokud $f \equiv 0$. V opačném případě jí říkáme* nehomogenní*, případně (nepřesně, ale o to s větší chutí) „s pravou stranou“. Jsou-li všechny funkce a_α konstantní, nazýváme rovnici* (1.3) lineární rovnicí s konstantními koeficienty.

- *Rovnici* (1.1) *nazveme* semilineární*, lze-li ji psát ve tvaru*

$$\sum_{|\alpha| = n} a_\alpha(x) \mathrm{D}^\alpha u = f(x, u, \mathrm{D}u, \ldots, \mathrm{D}^{(n-1)} u)\,, \qquad x \in \Omega\,, \tag{1.4}$$

  pro dané funkce a_α, f.

- *Rovnici* (1.1) *nazveme* kvazilineární*, lze-li ji psát ve tvaru*

$$\sum_{|\alpha| = n} a_\alpha(x, u, \mathrm{D}u, \ldots, \mathrm{D}^{(n-1)} u) \mathrm{D}^\alpha u(x) = f(x, u, \mathrm{D}u, \ldots, \mathrm{D}^{(n-1)} u)\,, \qquad x \in \Omega\,, \tag{1.5}$$

  pro dané funkce a_α, f.

- *Rovnici* (1.1) *nazveme* nelineární*, pokud není lineární ve výše uvedeném slova smyslu. Rovnici* (1.1) *nazveme* ryze nelineární*, je-li funkce F v* (1.1) *nelineární funkcí (alespoň) v některé z proměnných, do kterých dosazujeme některou derivací u nejvyššího řádu.*

Příklad. Jak semilineární, tak kvazilineární rovnice jsou nelineární (ale nikoli ryze nelineární) rovnice, které jsou „lineární vůči nejvyšším derivacím u“. U kvazilineárních rovnic však připouštíme závislost koeficientů a_α pro $|\alpha| = n$ na na derivacích u až do řádu $(n-1)$ včetně.

Příklad. Buď $u = u(t,x)$, $t \in (0,\infty)$, $x \in \mathbb{R}^d$. Potom následující *evoluční* parciální diferenciální rovnice lze charakterizovat takto:

- $\frac{\partial u}{\partial t} + \left(x^2 + \cos\frac{x}{x^2+1}\right)\Delta u = 0$ je lineární (homogenní) rovnice 2. řádu, s nekonstantními koeficienty;
- $\frac{\partial u}{\partial t} + \left(x^2 + \sin\bigl(u^2 + \frac{\partial u}{\partial x}\bigr)^2\right)\Delta u = 0$ je nelineární, a přitom kvazilineární rovnice 2. řádu;
- $\frac{\partial u}{\partial t} + x^2\Delta u + \sin\bigl(u^2 + \frac{\partial u}{\partial x}\bigr)^2 = 0$ je nelineární, a přitom semilineární rovnice 2. řádu;
- $\frac{\partial u}{\partial t} + (\Delta u)^2 = 0$ je ryze nelineární rovnice 2. řádu;
- $\frac{\partial u}{\partial t} + \sum\limits_{j=1}^{d} a_j(x,t,u)\frac{\partial u}{\partial x_j} = f(x,t,u)$ je nelineární, a přitom kvazilineární, 1. řádu.

Co chceme na dané PDR zkoumat? Zajímá nás, jestli

1. má řešení,
2. řešení je jednoznačné,
3. závisí spojitě na zadaných datech.

Pojem řešení vždy obsahuje v jakém prostoru funkcí má hledaná funkce ležet a v jakém smyslu má být PDR splněná.

Jednoznačnost Už příklady nejjednodušších PDR nemají jednoznačné řešení. Je potřeba zadat další podmínky, které má hledaná funkce splňovat. Jednou z možností jsou takzvané *okrajové podmínky.* Jednou z takovýchto okrajových podmínek může být požadavek, aby se u rovnalo předem dané funkci například na neprázdné části hranice $\Gamma \subset \partial\Omega$. Okrajové podmínky mohou mít velké množství různých forem, od právě zmíněné, až po velmi komplikované vztahy, zahrnující nejen hodnoty u, ale i hodnoty derivací u, případně jejich kombinací. Vždy však v principu jde o dodatečné požadavky, které na u klademe na jistých částech (obecně nikoli nutně na částech hranice) množiny Ω. V případě evoluční rovnice, kdy $u = u(t,x)$, a pokud

$$\Gamma \subset \{0\} \times \Omega\,,$$

tedy když „podmínka je zadána pro čas $t = 0$“, hovoříme o tzv. *počáteční podmínce* či *počátečních podmínkách*, je-li jich víc.

Je také možné po řešení vyžadovat splnění dalších podmínek, které umožní vybrat to *správné* řešení s ohledem na to, odkud problém přišel. Například můžeme požadovat splnění energetické nebo entropické nerovnosti.

Za jistých podmínek, například pokud je množina $\Omega = \mathbb{R}^n$, zadáváme pouze počáteční podmínku a hovoříme o Cauchyově úloze. Pokud je potřeba navíc na hranici Ω zadat okrajovou podmínku, pak hovoříme o počátečně-okrajové úloze.

Uvedeme si základní příklady okrajových podmínek.

Definice 1.6. *V situaci, kdy hledáme funkci* $u : [0,T) \times \Omega \to \mathbb{R}$, $T > 0$, $\Omega \subset \mathbb{R}^d$*:*

Podmínky kladené na u *a její derivace v* $\{0\} \times \overline{\Omega}$ *nazýváme počáteční podmínky.*

Podmínky kladené na množině $(0,T) \times \partial\Omega$ *se nazývají okrajové podmínky.*

Okrajová podmínka

$$u = g, \quad na\ (0,T) \times \partial\Omega$$

se nazývá Dirichletova okrajová podmínka. Pokud bychom předepisovali $g \equiv 0$*, nazývali bychom ji homogenní Dirichletova okrajová podmínka. Uvažují se také další typy okrajových podmínek.*

Neumannova okrajová podmínka má tvar

$$\frac{\partial u}{\partial \nu} = g, \quad na\ (0,T) \times \partial\Omega.$$

Pro rovnici vedení tepla předepisuje tok tepla hranicí oblasti Ω*. Vektor* ν *označuje jednotkovou vnější normálu k* Ω *a* g *je zadaná funkce. Zobecnění Neumannovy okrajové podmínky je Robinova akrajová podmínka*

$$\alpha \frac{\partial u}{\partial \nu} + \beta u = g, \quad na\ (0,T) \times \partial\Omega.$$

pro zadané konstanty $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ *a zadanou funkci* g*. Pokud je* g *nulové nazýváme okrajovou podmínku homogenní. Je také možné na různých částech hranice předepsat jiný typ okrajové podmínky.*

Spojitá závislost na datech Data úlohy jsou všechny předem zadaná data, která se v úloze objevují. Tedy například hodnoty, které má hledaná funkce nabývat na hranici oblasti Ω a v počátečním čase. Data úlohy jsou ale také funkce, které se objevují ve formulaci diferenciální rovnice (1.1), tj. funkce F resp. $\mathbf{F}$.

„Spojitou závislost na datech úlohy“ nebudeme v tomto okamžiku přesně specifikovat (příslušné výroky jsou vždy součástí pozdějších vět, týkajících se dané konkrétní úlohy), v podstatě se tím však myslí výrok typu „malá změna dat má za následek jen malou změnu v řešení“. Uvedený výrok se často realizuje důkazem nerovnosti typu

$$\|u_1 - u_2\| \le c \sum_{j=1}^{k} \|\varphi_1^j - \varphi_2^j\| \tag{1.6}$$

s vhodně zvolenými normami na obou stranách této nerovnosti. Zde φ_1^j, φ_2^j, $j = 1, \dots, k$ jsou dvě k-tice dat, s nimiž má daná úloha na dané oblasti řešení po řadě u_1, u_2. I úlohy, které jsou na první pohled rozumné nemusí podmínku spojité závisloti na datech splňovat

Příklad. *Buď* $T > 0$*. Ukažte, že* $u_n(t,x) = e^{-\sqrt{n}} \cos(nx) \sinh nt/n$ *pro* $n \in \mathbb{N}$ *řeší v každém bodě rovnici* $\partial_t^2 u + \partial_x^2 u = 0$ *v* $(0,T) \times (-\pi/2, \pi/2)$ *s okrajovou podmínkou* $u = 0$ *na* $(0,T) \times \{-\pi/2, \pi/2\}$ *a počáteční podmínkou* $u(0,x) = 0$, $\partial_t(0,x) = e^{-\sqrt{n}} \cos(nx)$ *pro* $x \in (-\pi/2, \pi/2)$*. Navíc platí* $\|\partial_t u_n(0,\cdot)\|_{C(-\pi/2,\pi/2)} + \|u_n(0,\cdot)\|_{C(-\pi/2,\pi/2)} \to 0$ *pro* $n \to +\infty$*, ale* $\|u_n\|_{C((0,T)\times(-\pi/2,\pi/2))} \to +\infty$ *pro* $n \to +\infty$*.*

Úloha V kontextu PDR rozumíme *úlohou* následující trojici:

1. Rovnici tvaru (1.1) resp. systém tvaru (1.2) pro neznámou funkci u resp. $\mathbf{u}$.

2. Množinu, na které (uvnitř které) má být splněna rovnice (1.1) resp. splněny rovnice (1.2). Typicky půjde o neprázdnou oblast, tj. neprázdnou otevřenou souvislou množinu v $\mathbb{R}^m$.

3. Pojem řešení, tj. v jakém smyslu má být rovnice splněna. Nařîklad je potřeba určit, do kterého prostoru funkcí X má řešení patřit.

4. Sadu okrajových a/nebo počátečních podmínek, případně dalších podmínek.

Řekneme, že úloha v kontextu PDR je *korektně zadaná* (přesněji je *korektně zadaná v prostoru funkcí X na množině Ω*) pokud:

1. *existuje* řešení $u \in X$ dané úlohy;
2. toto řešení je v prostoru funkcí X *jediné*;
3. toto řešení tzv. *spojitě závisí na datech úlohy.*

Příklad. Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ neprázdná otevřená množina, $T > 0$. Hledejme funkci $u = u(t, x, y) : (0, T) \times \Omega \to \mathbb{R}$, splňující

$$\frac{\partial u}{\partial t}(t, x, y) - \Delta u(t, x, y) = \sin(xyt)\,, \qquad \text{pro } (t, x, y) \in (0, T) \times \Omega\,, \tag{1.7}$$

$$u(0, x, y) = 1\,, \qquad \text{pro } (x, y) \in \Omega\,, \tag{1.8}$$

$$u(t, x, y) = t + 1\,, \qquad \text{pro } (t, x, y) \in (0, T) \times \partial\Omega\,. \tag{1.9}$$

Jde o evoluční parciální diferenciální rovnici druhého řádu. Výjimečnost proměnné t spočívá jak v tom, že derivace u podle t je pouze prvního řádu, tak v tom, že prostorové derivace x_j, obsažené v Laplaceově operátoru, mají opačné znaménko než $\frac{\partial u}{\partial t}$.

Pracujeme v tzv. časoprostorovém válci $(0, T) \times \Omega$ s podstavou Ω. Rovnici (1.7) řešíme uvnitř tohoto válce, podmínka (1.8) je počáteční podmínka, zadaná na jeho podstavě, podmínka (1.9) je podmínka okrajová, zadaná na „boční" části pláště časoprostorového válce.

Tato úloha se nazývá počátečně-okrajová úloha pro rovnici vedení tepla.

Intuitivně je jasné, že při definici řešení u celé tzv. *úlohy* (1.7)–(1.9) je potřeba říci nejen jaké geometrické vlastnosti očekáváme od hranice $\partial((0, T) \times \Omega)$, ale především v jakém smyslu budou splněny podmínky (1.8), (1.9) – funkce u je totiž pro potřeby rovnice (1.7) definována pouze na $(0, T) \times \Omega$, tj. *uvnitř* časoprostorového válce. Přesněji se těmto úvahám budeme věnovat při studiu konkrétních úloh, již teď však můžeme stručně říci, že pro klasické řešení většinou požadujeme, aby příslušné okrajové a počáteční podmínky byly splněny ve smyslu limity, tedy aby (v tomto případě) funkci u bylo možno spojitě rozšířit až na ty části hranice, na kterých jsou předepsány dodatečné podmínky.

Poznámka. Úloha (1.7)–(1.9) má následující fyzikální interpretaci: Pokud pod $u(t, x)$ rozumíme teplotu v bodě $x \in \Omega$ v čase $t \in (0, T)$, představuje (1.7) tzv. *rovnici vedení tepla*, se *zdroji tepla* $\sin(xyt)$. Podmínka (1.8) pak reprezentuje předepsané rozložení teploty v čase $t = 0$, podmínka (1.9) předepsané rozložení teploty „na stěnách místnosti" Ω v čase $t \in (0, T)$. Při přemýšlení o významu této interpretace můžeme dojít k podezření, že by úloha (1.7)–(1.9) mohla být korektně zadaná. Toto podezření samozřejmě musí potvrdit či vyvrátit důkaz příslušné matematické věty, kterou zformulujeme později.

2 Cauchyova úloha pro kvazilineární PDR 1. řádu

Definice 2.1. *Buď $d > 1$, $a_1, \dots, a_d, f : \mathbb{R} \times \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}$. Rovnici*

$$\sum_{j=1}^{d} a_j(u, x)\partial_j u = f(u, x), \tag{2.1}$$

nazveme kvazilineární parciální diferenciální rovnicí prvního řádu pro neznámou funkci $u : \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}$.

Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ otevřená. Řekneme, že $u : \Omega \to \mathbb{R}$ je klasickým řešením *kvazilineární rovnice* (2.1) *na Ω, pokud*

1. $u \in \mathcal{C}^1(\Omega)$,

2. u *splňuje* (2.1) *ve všech bodech* $x \in \Omega$.

Buď navíc $x_d^0 \in \mathbb{R}$, $u^0 : \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}$. *Počáteční podmínku předepisujeme ve tvaru*

$$u(x) = u^0(x) \quad \text{pro } x \in \Omega \text{ s } x_d = x_d^0. \tag{2.2}$$

Řekneme, že $u : \Omega \to \mathbb{R}$ *je* klasickým řešením *Cauchyovy úlohy pro kvazilineární rovnici* (2.1) *na* Ω *s počáteční podmínkou* (2.2)*, pokud*

1. u *je klasickým řešením na* Ω,

2. u *splňuje* (2.2) *ve všech bodech* $x \in \Omega$ *s* $x_1 = x_1^0$.

Poznámka. • V podstatě lze (obecně) říci, že když mluvíme o *klasickém řešení*, máme nejčastěji na mysli tak hladkou funkci, aby všechny její v rovnici vystupující derivace byly spojité. Proto klasické řešení u rovnice (2.1) hledáme v prostoru $\mathcal{C}^1(\Omega)$. Termín „Cauchyova úloha“ se v kontextu evolučních PDR používá, když zadáváme pouze počáteční podmínku.

- Počáteční podmínku není nutné zadávat jen na nadrovině $\{x_1 = x_1^0\}$. Obecně ji můžeme zadat na ploše dimenze $d-1$.

- Pokud chceme zvýraznit roli jedné z proměnné jako času, značíme proměnné $(t, x) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^d$.

Budeme nyní hledat řešení úlohy (2.1)–(2.2) ve dvou krocích. Nejprve vyšetříme případ, kdy f na pravé straně rovnice (2.1) bude identicky nulová funkce a poté se budeme věnovat případu obecné f.

Možnost I, $f \equiv 0$.

V tomto případě přejde rovnice (2.1) v rovnici

$$\sum_{j=1}^{d} a_j(u, x)\partial_j u = 0\,, \qquad x \in \Omega, \tag{2.3}$$

s počáteční podmínkou (2.2). Řešení úlohy (2.3)–(2.2) budeme hledat tzv. *metodou charakteristik.*Vyslovme nejprve následující definici.

Definice 2.2. *Buď* $u \in C^1(\Omega)$, $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ *otevřená. Rovnici* (2.3) *přiřadíme* systém obyčejných diferenciálních rovnic *(zvaný též* charakteristický systém rovnice (2.3)*) pro neznámé funkce* $x_j = x_j(s)$, $j = 0, \dots d$,

$$\frac{d}{ds} x_j(s) = a_j\big(x(s), u(x(s))\big)\,, \quad s \in (\alpha, \beta) \subset \mathbb{R}\,, \tag{2.4}$$

kde a_j *jsou funkce z* (2.3)*. Každé klasické řešení* $x : (\alpha, \beta) \to \mathbb{R}^d$ *systému rovnic* (2.4) *nazvu* charakteristikou (charakteristickou křivkou) rovnice (2.3).

Poznámka.

1. Charakteristika je tedy křivka v $\mathbb{R}^d$, jejíž parametrizace je dána zobrazením $x : (\alpha, \beta) \to \mathbb{R}^d$. Vzhledem k tomu, že systém (2.4) je systém se spojitými pravými stranami a_j, existuje podle teorie ODR (viz [Kurzweil, 1978]) řešení (2.4) alespoň lokálně v okolí každé počáteční (proto index p v (2.5)) podmínky typu

$$x(s_p) = x_p\,, \quad s_p \in (\alpha, \beta)\,, \quad x_p \in \mathbb{R}^d\,. \tag{2.5}$$

Bez újmy na obecnosti lze předpokládat, že $s_p = 0 \in (\alpha, \beta)$. Připomeňme, že pro pouze spojité a_j nemusí být řešení úlohy (2.4)–(2.5) určeno jednoznačně, k tomu je potřeba, aby a_j byly alespoň lokálně lipschitzovské funkce (podrobněji viz např. [Kurzweil, 1978]). Zároveň je také vhodné si uvědomit, že charakteristika může zobrazovat celý interval do jednoho bodu v $\mathbb{R}^d$. Například pro rovnici $x\partial_x u + y\partial_y u = 0$ je charakteristika $s \mapsto (0,0)$ pro $s \in \mathbb{R}$.

2. Přesněji řečeno, charakteristika x je křivka, přiřazená nejen rovnici (2.3) (prostřednictvím funkcí a_j), ale i funkci $u \in \mathcal{C}^1(\Omega)$. Obecně tedy nemusíme na u nahlížet jako na řešení rovnice (2.3), které ostatně teprve hledáme, ale jako na libovolnou dostatečně hladkou funkci u, která spolu se známými koeficienty a_j definuje charakteristiky. Lépe vše osvětlíme za chvíli na příkladech.

Následující identita je pro metodu charakteristik klíčová. Studujme chování libovolné funkce $u \in \mathcal{C}^1(\Omega)$ na charakteristice $x : (\alpha, \beta) \to \Omega$, přiřazené rovnici (2.4) a této funkci u. Derivováním podle s dostaneme:

$$\frac{d}{ds}u(x(s)) = \sum_{j=1}^{d} \frac{\partial u}{\partial x_j}(x(s))\frac{d}{ds}x_j(s) \overset{(2.4)}{=} \sum_{j=0}^{d} a_j\big(x(s), u(x(s))\big)\frac{\partial u}{\partial x_j}(x(s))\,. \tag{2.6}$$

Je-li levá strana identity (2.6) rovna nule, znamená to, že funkce u je konstantní na charakteristice $x(s)$, nulovost pravé strany (2.6) pak znamená, že funkce u je klasickým řešením rovnice (2.3) v bodech, které leží na příslušné charakteristice.

Tato identita dokazuje následující lemma, jehož formulaci věnujte pozornost: zdánlivě jde o dvě implikace, které dohromady vytvoří ekvivalenci; výroky, tvořící implikace (a) a (b), se však poněkud liší.

Lemma 2.3. *Uvažujme funkci $u \in \mathcal{C}^1(\Omega)$, kde $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ je neprázdná otevřená.*

1. *Buď u konstantní na charakteristice $x : (\alpha, \beta) \to \Omega$ přiřazené koeficientům a_j rovnice (2.3) a funkci u. Potom funkce u řeší v klasickém smyslu rovnici (2.3) v bodech charakteristiky x ležících v Ω.*

2. *Nechť naopak u je klasické řešení rovnice (2.3) v oblasti Ω. Potom u je konstantní na libovolné charakteristice x, ležící v Ω.*

Důkaz. Důkaz obou implikací vychází z rovnosti (2.6) a diskuse za ní. □

Příklad (Cauchyova úloha pro lineární transportní rovnici)**.** *Budeme řešit následující úlohu: Najděte funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $u \in C^1(\mathbb{R})$, $u = u(t,x)$ tak, aby*

$$\partial_t u + c\partial_x u = 0 \text{ na } \mathbb{R}^2$$

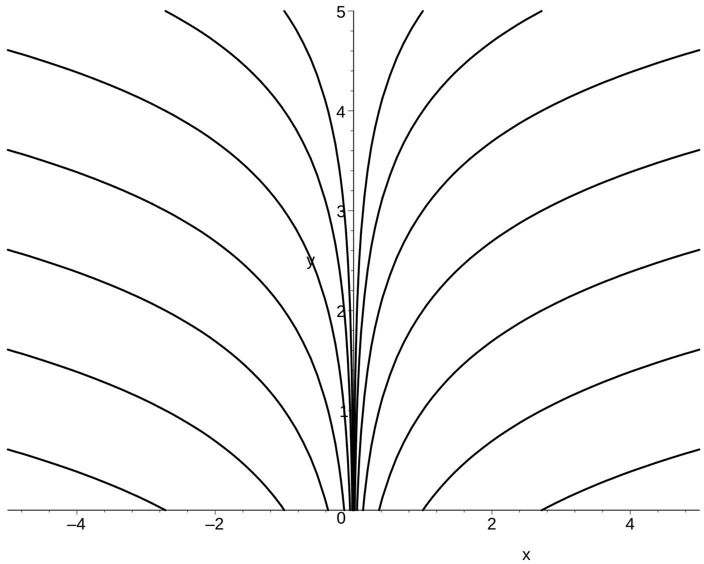
a $u(0,y) = u_0(y)$ pro danou funkci $u_0 \in C^1(\mathbb{R})$ a $c \in \mathbb{R}$.

Řešení je $u(t,x) = u_0(x - ct)$.

Příklad. Rovnice $\partial_t u + x\partial_x u = 0$ s počáteční podmínkou u_0 na množině $t = 0$. Charakteristický systém je $t' = 1$ a $x' = x$. Jeho řešení se dá zapsat ve tvaru $(t(s), x(s)) = (s + K, Le^s)$. Jde tedy o „logaritmický vějíř“, viz Obr. 1. Protože nás zajímají pouze trajektorie, můžeme díky tomu, že je systém autonomní, položit $K = 0$. Pak charakteristika prochází bodem $(0, L)$ pro $s = 0$. V tomto bodě máme předepsanou počáteční podmínku. Zafixujme bod (t,x). Tímto bodem prochází charakteristika s $L = xe^{-t}$. Z Lemmatu 2.3 dostaneme, že $u(t,x) = u(0, xe^{-t}) = u_0(xe^{-t})$. Hledané řešení je tedy $u(t,x) = u_0(xe^{-t})$. Pokud je u_0 určená na $\mathbb{R}$, je řešení na $\mathbb{R}^2$ jednoznačně určené.

Například pro $u_0(x) = e^{-x^2}$, $x \in \mathbb{R}$ dostaneme $u(x,t) = \exp(-x^2 e^{-2t})$, $x \in \mathbb{R}$, $t \geq 0$.

. . . . konec přednášky 2, 13.10.2023



Obrázek 1: Charakteristiky rovnice $u_t + xu_x = 0$.

$\boxed{\text{Možnost II, } f \not\equiv 0.}$

Pro $f \not\equiv 0$ máme vyřešit obecnou rovnici tvaru

$$\sum_{j=1}^{d} a_j(u,x)\partial_j u = f(u,x), \quad x \in \Omega, \tag{2.7}$$

s počáteční podmínkou

$$u(x) = u_0(x) \quad \text{na množině } \{x \in \Omega;\, x_d = x_d^0\}. \tag{2.8}$$

Úlohu (2.7)–(2.8) budeme řešit tak, že nejprve vyřešíme poněkud jinou úlohu s homogenní rovnicí (tedy s nulovou pravou stranou). Problém se tím převede do situace, kterou jsme studovali v možnosti I.

Značení. *Pro $x \in \mathbb{R}^d$ budeme značit $\overline{x} = (x_1, \ldots, x_{d-1})$.*

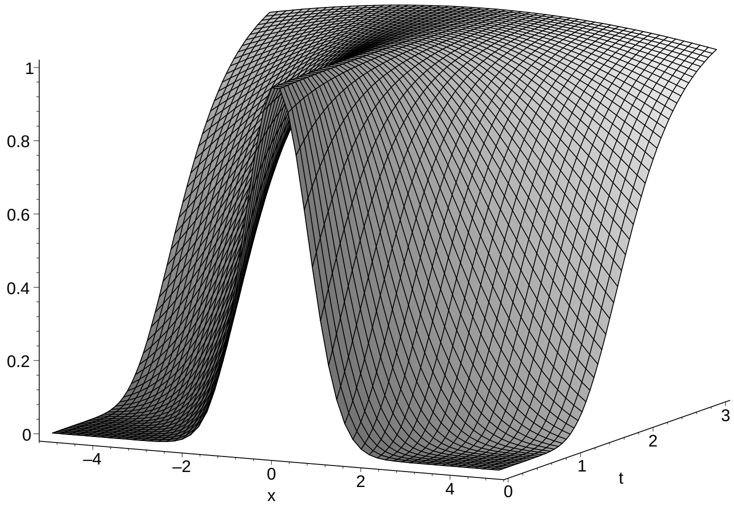
Věta 2.4. *Buď $x^0 \in G \subset \mathbb{R}^d$, G otevřená množina, $G^{x_d^0} := \{\overline{x} \in \mathbb{R}^{d-1}; (\overline{x}, x_d^0) \in G\}$, $u^0 \in \mathcal{C}^1(G^{x_d^0})$), $u^0(\overline{x^0}) \in J \subset \mathbb{R}$, J otevřený interval, $f, a_j \in \mathcal{C}(J \times G)$. Buď dále $w \in \mathcal{C}^1(J \times G)$ klasické řešení úlohy*

$$\sum_{j=1}^{d} a_j(z,x)\frac{\partial w}{\partial x_j} + f(z,x)\frac{\partial w}{\partial z} = 0\,, \qquad (z,x) \in J \times G, \tag{2.9}$$

$$w(z,x) = z - u^0(\overline{x}) \qquad \text{na množině } \{(z,x) \in J \times G;\, x_d = x_d^0\}\,, \tag{2.10}$$

takové, že $\partial_z w(u^0(\overline{x^0})), x^0) \neq 0$. Potom existují okolí $\mathcal{U}(x^0) \subset G$, $U(u^0(\overline{x^0})) \subset J$ a funkce $u \in \mathcal{C}^1(\mathcal{U}(x^0))$, $u : U(x^0) \to U(u^0(\overline{x^0}))$ taková, že

1. *$w(u^0(\overline{x^0}), x^0) = 0$, $\partial_z w(z,x) \neq 0$ pro všechna $(z,x) \in \mathcal{U}(u^0(\overline{x^0})) \times \mathcal{U}(x^0)$,*



Obrázek 2: Funkce $u(x,t) = \exp(-x^2 e^{-2t})$ pro $x \in \langle -5, 5\rangle$, $t \in \langle 0, 3\rangle$.

2. $w(u(x),x) = 0$ pro všechna $x \in \mathcal{U}(x^0)$,

3. u je klasickým (lokálním) řešením úlohy (2.7)–(2.8) *na* $\mathcal{U}(x^0)$.

Důkaz. Z (2.10) víme, že $w(u^0(\overline{x^0}), x^0) = u^0(\overline{x^0}) - u^0(\overline{x^0}) = 0$ a vlastně také, že $\partial_z w(u^0(\overline{x^0}), x^0) = 1$. Jelikož je $(u^0(\overline{x^0}), x^0) \in J \times G$ a $w \in C^1(J \times G)$, lze předpokládat, že $\partial_z w \neq 0$ na $J \times G$. Jinak bychom J a G vhodně zmenšili. Tedy tvrzení 1 bude platit pokud okolí zvolíme v J a G.

Tvrzení 2 spolu s volbou okolí jsou důsledkem věty o implicitních funkcích. Tvrzení 1 a 2 dokonce nijak nesouvisí s tím, že w řeší nějakou diferenciální rovnici.

Pro důkaz tvrzení 3 si stačí uvědomit, že funkce $w(u(x), x)$ je spojitě diferencovatelná jako složená funkce a identicky nulová pro $x \in \mathcal{U}(x^0)$, jsou tedy pro $x \in \mathcal{U}(x^0)$ nulové i její derivace podle všech x_j, $j = 0, \ldots, d$:

$$\frac{\partial w}{\partial x_j}(u(x), x) + \frac{\partial w}{\partial z}(u(x), x)\frac{\partial u}{\partial x_j}(x) = 0\,, \qquad j = 0, \ldots, d\,.$$

Vyjádříme z těchto rovností $\frac{\partial w}{\partial x_j}(u(x), x)$, dosadíme do (2.9) a dostaneme:

$$\frac{\partial w}{\partial z}(u(x), x) \cdot \left(-\sum_{j=0}^{d} a_j(u(x), x)\frac{\partial u}{\partial x_j}(x) + f(u(x), x) \right) = 0\,, \qquad x \in \mathcal{U}(x^0)\,.$$

Protože $\partial_z w(u(x), x) \neq 0$ pro $x \in \mathcal{U}(x^0)$ (viz tvrzení 1), musí být nulový výraz v kulaté závorce, což dává (2.7) pro $x \in \mathcal{U}(x^0)$.

Dále je pro $x \in \mathcal{U}(x^0)$, $x_d = x_d^0$, podle tvrzení 1 a (2.10),

$$0 = w(u(x), x) = u(x) - u_0(\overline{x})\,,$$

což není nic jiného než (2.8) na $\{x \in \mathcal{U}(x^0), x_d = x_d^0\}$. $\square$

Příklad (Cauchyova úloha pro lineární transportní rovnici s nenulovou pravou stranou). *Budeme řešit následující úlohu: Pro dané funkce $f : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $f \in C^1(\mathbb{R}^2)$, $u_0 \in C^1(\mathbb{R})$ a $c \in \mathbb{R}$ najděte funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $u \in C^1(\mathbb{R}^2)$ tak, aby*

$$\partial_1 u + c\partial_2 u = f \ \textit{ na } \mathbb{R}^2$$

a $u(0, x) = u_0(x)$ pro $x \in \mathbb{R}$.

Řešení je $u(t, x) = u_0(x - ct) + \int_0^t f(s, x - c(t - s))\, \mathrm{d}s$.

3 O klasifikaci rovnic 2. řádu

Mějme lineární rovnici 2. řádu v $\mathbb{R}^d$

$$\sum_{i,j=1}^{d} a_{ij}(x)\, \frac{\partial^2 u}{\partial x_i\, \partial x_j} + \sum_{j=1}^{d} b_j(x)\, \frac{\partial u}{\partial x_j} + c(x)\, u = f(x) \tag{3.1}$$

Jde-li nám o klasické řešení, předpokládáme dostatečnou hladkost u a tedy můžeme zaměnit smíšené parciální derivace. Tudíž bez újmy na obecnosti je $a_{ij}(x) = a_{ji}(x)$ pro každé x a matice $A := (a_{ij}(x))_{i,j=1}^d$ je reálná, symetrická a proto diagonalizovatelná. Pro pevné x tedy existuje regulární matice P a diagonální matice D, která na diagonále obsahuje pouze prvky z $\{0, 1, -1\}$ tak, že $P^{\mathrm{T}}AP = D$. Připomeňme si, že signatura kvadratické formy určené maticí D je trojice (n, p, q), kde n je počet nulových, p počet kladných a q počet záporných prvků na diagonále D. Dle zákona setrvačnosti kvadratické formy je počet nulových, záporných a kladných prvků na diagonále matice D pevně dán a tedy je signatura dobře definovaná.

Předpokládejme, že jsou koeficienty u členů druhých řádů rovnice (3.1) konstantní, tedy $a_{ij}(x) = a_{ij}$. Definujme funkci v předpisem $u(x) = v(P^T x)$, tj. $v = u \circ (P^{\mathrm{T}})^{-1}$ a položme $y = P^{\mathrm{T}}x$, pak máme

$$\frac{\partial u}{\partial x_i}(x) = \sum_{k=1}^{d} \frac{\partial v}{\partial y_k}(y)\, p_{ik} \quad \text{a} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j}(x) = \sum_{k,h=1}^{d} \frac{\partial^2 v}{\partial y_k \partial y_h}(y)\, p_{ik} p_{jh}$$

Odtud je vidět, že $u(x)$ splňuje rovnici (3.1) právě, když $v(y)$ řeší rovnici

$$\sum_{j=1}^{d} d_{jj}(y)\, \frac{\partial^2 v}{\partial y_i\, \partial y_j} + \sum_{j=1}^{d} e_j(y)\, \frac{\partial u}{\partial y_j} + g(y)\, u = h(y), \tag{3.2}$$

neboť

$$\begin{aligned}
\sum_{i,j=1}^{d} a_{ij} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i\, \partial x_j}(x) &= \sum_{i,j=1}^{d} a_{ij} \sum_{k,h=1}^{d} \frac{\partial^2 v}{\partial y_k \partial y_h}(y)\, p_{ik} p_{jh} = \\
&= \sum_{h,k=1}^{d} \frac{\partial^2 v}{\partial y_k \partial y_h}(y)\, \underbrace{\sum_{i,j=1}^{d} a_{ij} p_{ik} p_{jh}}_{d_{kh}}
\end{aligned}$$

Definice 3.1. (Typ diferenciální rovnice druhého řádu) *Buď $x \in \mathbb{R}^d$ a matice $D = (d_{ij})_{i,j=1}^d$ jako výše a (n, p, q) její signatura. Řekneme, že rovnice (3.1) je v bodě x:*

i. eliptická, *jestliže $p = d$ nebo $q = d$, tj. jsou znaménka všech diagonálních prvků matice D stejná. Typickým zástupcem je Poissonova rovnice: $-\Delta u = f$.*

ii. hyperbolická, *jestliže je $n = 0 \wedge (p = d - 1 \vee q = d - 1)$, tj. D je regulární a všechna znaménka diagonálních prvků D jsou stejná až na jedno. Typickým zástupcem je vlnová rovnice: $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \Delta u = f$ (Laplaceův operátor je brán jen vzhledem k prostorovým proměnným).*

iii. parabolická, *jestliže je $n = 1 \wedge (p = d - 1 \vee q = d - 1)$ BÚNO $d_{dd} = 0$, a koeficient transformované rovnice (3.2) u $\frac{\partial v}{\partial y_d}$ je nenulový v bodě $\mathsf{P}^{\mathrm{T}} x$. Typickým zástupcem je rovnice vedení tepla: $\partial_t u - \Delta u = f$ (stejně jako v předchozím případě je $\Delta = \sum_{i=1}^{d-1} \partial_i^2$).*

iv. parabolická v širším slova smyslu, *jestliže $n > 0$.*

v. ultrahyperbolická, *jestliže $n = 0 \wedge p > 1 \wedge q > 1$, tj. matice D je regulární a alespoň dvě znaménka prvků D jsou kladná a alespoň dvě záporná.*

. . . . konec přednášky 3, 20.10.2023

Příklad. *1) Tricomiho rovnice*

$$x_2 \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2} = 0$$

$x_2 > 0 \dots$ eliptická, $x_2 < 0 \dots$ hyperbolická, tedy mění typ při přechodu x_1 osy.

2) Převeďte rovnici $\partial_1 \partial_2 u = f$ pro danou funkci $f : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ a neznámou funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ do diagonálního tvaru a rozhodněte jakého je typu.

4 Vlnová rovnice

Cauchyova úloha Pro dané $u_0, u_1 : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$, $T > 0$, $c > 0$ a $f : [0,T) \times \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ najděte funkci $u : [0,T) \times \mathbb{R} \to \mathbb{R}$, která splňuje 1) $\partial_t^2 u - c^2 \partial_x^2 u = f$ in $(0,T) \times \mathbb{R}$, 2) $u = u_0$, $\partial_t u = u_1$ v $\{0\} \times \mathbb{R}$.

Podmínka 2) se nazývá počáteční podmínka. Je potřeba dát rozumný smysl výrazu $\partial_t u(0,x)$ pro $x \in \mathbb{R}$.

Definice 4.1. *Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ otevřená, $k \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, $0 < T \leq +\infty$. Definujeme*

$$C^k(\overline{\Omega}) = \{f : \Omega \to \mathbb{R}; \forall \alpha \in (\mathbb{N}_0)^d, |\alpha| \leq k : D^\alpha f \text{ je možné spojitě rozšířit na } \overline{\Omega}\},$$
$$C^k([0,T) \times \mathbb{R}^d) = \{f : (0,T) \times \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}; \forall \alpha \in (\mathbb{N}_0)^d, |\alpha| \leq k : D^\alpha f \text{ je možné spojitě rozšířit na } [0,T) \times \mathbb{R}^d\}.$$

Poznámka.

- *Dále nebudeme pro funkce z prostorů $C^k(\overline{\Omega})$ a $C^k([0,T) \times \mathbb{R}^d)$ rozlišovat funkci samotnou a její rozšíření. To je určené jednoznačně.*
- *Význam protorů $C^k(\overline{\Omega})$ a $C^k([0,T) \times \mathbb{R}^d)$ se mírně liší od prostorů zavedených v [Kufner et al., 1977] a [Evans, 2010].*

Odvození řešení vlnové rovnice v 1d.

. . . . konec přednášky 4, 27.10.2023

Věta 4.2. *Buď $0 < T \leq +\infty$, $u_0 \in C^2(\mathbb{R})$, $u_1 \in C^1(\mathbb{R})$, $f, \partial_x f \in C([0,T) \times \mathbb{R})$. Definujme pro $t \in (0,T)$, $x \in \mathbb{R}$*

$$u(t,x) := \frac{1}{2}(u_0(x+ct) + u_0(x-ct)) + \frac{1}{2c} \int_{x-ct}^{x+ct} u_1(\xi) d\xi + \frac{1}{2c} \int_0^t \int_{x-c(t-\tau)}^{x+c(t-\tau)} f(\tau, \xi) d\xi d\tau.$$

(pokud je $f = 0$ nazývá se d'Alembertova formule)

Pak platí: 1) $u \in C^2([0,T) \times \mathbb{R})$, 2) $\partial_t^2 u - c^2 \partial_x^2 u = f$ in $(0,T) \times \mathbb{R}$, 3) $u = u_0$, $\partial_t u = u_1$ v $\{0\} \times \mathbb{R}$.

Cvičení. *Vyjádřete řešení z předchozí věty pro případ $u_0 = 0$ a $f = 0$ pomocí pevné primitivní funkce k u_1.*

K důkazu Věty 4.2.

Počátečně okrajová úloha v $(0, T) \times (0, +\infty)$.

Lemma 4.3 (O lichém rozšíření)**.** *Buď $u_1 \in C^1([0, +\infty))$, $u_1(0) = 0$ a $\tilde{u}_1$ liché prodloužení u_1 na $\mathbb{R}$. Pak je $\tilde{u}_1 \in C^1(\mathbb{R})$.*

Věta 4.4. *Nechť $0 < T \leq +\infty$, $f, \partial_x f \in C([0, T) \times [0, +\infty])$, $f(t, 0) = 0$ pro $t \in [0, T)$, $u_0 \in C^2([0, +\infty))$, $u_0(0) = u_0''(0) = 0$, $u_1 \in C^1([0, +\infty))$, $u_1(0) = 0$. Funkce u definovaná pro $x > ct \geq 0$ předpisem*

$$u(t, x) := \frac{1}{2}(u_0(x + ct) + u_0(x - ct)) + \frac{1}{2c} \int_{x-ct}^{x+ct} u_1(\xi) d\xi + \frac{1}{2c} \int_0^t \int_{x-c(t-\tau)}^{x+c(t-\tau)} f(\tau, \xi) d\xi d\tau,$$

a pro $0 \leq x \leq ct < cT$ předpisem

$$\begin{aligned} u(t, x) = &\frac{1}{2}(u_0(x + ct) - u_0(ct - x)) + \frac{1}{2c} \int_{ct-x}^{x+ct} u_1(\xi) d\xi \\ &+ \frac{1}{2c} \int_0^{t-\frac{x}{c}} \int_{c(t-\tau)-x}^{x+c(t-\tau)} f(\tau, \xi) d\xi d\tau + \frac{1}{2c} \int_{t-\frac{x}{c}}^t \int_{x-c(t-\tau)}^{x+c(t-\tau)} f(\tau, \xi) d\xi d\tau \end{aligned}$$

splňuje 1) $u \in C^2([0, T) \times [0, +\infty))$, 2) $\partial_t^2 u - c^2 \partial_x^2 u = f$ v $(0, T) \times (0, +\infty)$, 3) $u = u_0$, $\partial_t u = u_1$ v $\{0\} \times [0, +\infty)$, 4) $u = 0$ v $[0, T) \times \{0\}$.

Poznámka o nutnosti podmínky kompatibility pro funkci f ve Větě 4.4. Myslím, že podmínka kompatibility uvedená pro f ve Větě 4.4 je příliš silná. Mělo by stačit pouze $f(0, 0) = 0$, viz tyto výpočty.

. . . . konec přednášky 5, 3. 11. 2023

Počátečně okrajová úloha v $(0, T) \times (0, l)$. Pro dané $l > 0$, $T > 0$, $c > 0$, $u_0, u_1 : (0, l) \to \mathbb{R}$ a $f : (0, T) \times (0, l) \to \mathbb{R}$ najděte funkci $u : [0, T) \times [0, l] \to \mathbb{R}$, která splňuje 1. $\partial_t^2 u - c^2 \partial_x^2 u = f$ v $(0, T) \times (0, l)$, 2. $u = u_0$, $\partial_t u = u_1$ v $\{0\} \times [0, l]$, 3. $u = 0$ v $[0, T) \times \{0, l\}$.

Podmínka 2. se nazývá počáteční podmínka. Podmínka 3. se nazývá okrajová podmínka. Tato konkrétní okrajová podmínka se jmenuje homogenní Dirichletova okrajová podmínka.

Fourierova metoda pro počátečně okrajovou úlohu. Nyní odvodíme tvar řešení pomocí Fourierovy metody separace proměnných. Řešení budeme hledat ve tvaru řady

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

Funkce T_k a X_k pro $k \in \mathbb{N}$ jsou zatím neznámé. Je potřeba je určit. Nejdříve si položíme otázku: „Jaké z požadavků 1-3 může splnit funkce $T(t)X(x)$?“. Pokud jsou T, X nenulové dostaneme po dosazení do 1.

$$\frac{T''(t)}{c^2 T(t)} = \frac{X''(x)}{X(x)}.$$

Jelikož levá strana závisí pouze na t a pravá pouze na x, musí se obě rovnat společné konstantní hodnotě. Tuto hodnotu označíme $\lambda \in \mathbb{R}$. Rovnice 1 se nám tedy rozpadla na dvě obyčejné diferenciální rovnice

$$T'' - c^2 \lambda T = 0, \quad X'' - \lambda X = 0.$$

Pro druhou z těchto rovnic máme v 3 okrajovou podmínku $X(0) = X(l) = 0$. Dohromady tedy máme najít funkce $X : [0,l] \to \mathbb{R}$ a $\lambda \in \mathbb{R}$, které splňují $X'' - \lambda X = 0$ v $(0,l)$ a $X(0) = X(l) = 0$. Přidáme ještě podmínku hladkosti $X \in C^2([0,l])$. Pro dané λ jsou funkce X jednoznačně určeny určeny až na násobek. Řešení jsou všechny dvojice $\{X_k, \lambda_k\}_{k\in\mathbb{N}}$, $X_k(x) = \sin(\pi kx/l)$, $\lambda_k = -(\pi k)^2/l^2$.

Poznámky trigonometrickému systému a Parsevalově rovnosti.

Lemma 4.5. *Buď $l > 0$, $\varphi \in C^{k-1}(\mathbb{R})$, $k \in \mathbb{N}$, $\varphi^{(k-1)} \in AC(0,l)$, φ $2l$-periodická,*

$$\alpha_n = \frac{1}{l}\int_0^{2l} \varphi(y)\sin(\frac{n\pi y}{l})dy, \quad \beta_n = \frac{1}{l}\int_0^{2l} \varphi(y)\cos(\frac{n\pi y}{l})dy.$$

Pak $n^k(|\alpha_n| + |\beta_n|) \to 0$ pro $n \to +\infty$. Je-li navíc $\varphi^{(k)} \in L^2(0,2l)$, platí $\sum_{n=1}^{+\infty} n^{k-1}(|\alpha_n| + |\beta_n|) < +\infty$.

Věta 4.6. *Nechť $u_0 \in C^2([0,l])$, $u_1 \in C^1([0,l])$, $u_0'', u_1' \in AC(0,l)$, $u_0''', u_1'' \in L^2(0,l)$ a platí*

$$u_0(0) = u_0(l) = u_1(0) = u_1(l) = u_0''(0) = u_0''(l) = 0.$$

Definujeme

$$\alpha_n = \frac{2}{l}\int_0^l u_0(y)\sin(\frac{n\pi y}{l})dy, \quad \beta_n = \frac{2}{l}\int_0^l u_1(y)\sin(\frac{n\pi y}{l})dy$$
$$u(t,x) = \sum_{n=1}^{+\infty}\left[\alpha_n\cos(\frac{n\pi c}{l}t) + \frac{\beta_n l}{n\pi c}\sin(\frac{n\pi c}{l}t)\right]\sin(\frac{n\pi x}{l}).$$

Pak funkce u splňuje 1) $u \in C^2([0,+\infty) \times [0,l])$, 2) $\partial_t^2 u - c^2\partial_x^2 u = 0$ v $(0,+\infty) \times (0,l)$, 3) $u = u_0$, $\partial_t u = u_1$ v $\{0\} \times [0,l]$.

Poznámka. *Nechť $l, T > 0$, $f, \partial_x f \in C([0,T) \times [0,l])$, $\partial_x f(t,\cdot) \in AC(0,l)$ pro $t \in [0,T)$, $\partial_x^2 f \in C([0,T), L^2(0,l))$, $f(t,0) = f(t,l) = 0$. Definujme pro $\tau \in (0,T)$*

$$f_n(\tau) = \frac{2}{l}\int_0^l f(\tau,y)\sin(\frac{n\pi y}{l})dy, \quad u(t,x) := \sum_{n=1}^{+\infty}\int_0^t \frac{l}{cn\pi}f_n(\tau)\sin(\frac{cn\pi}{l}(t-\tau))d\tau\sin(\frac{n\pi x}{l})$$

Funkce u splňuje 1) $u \in C^2([0,T) \times [0,l])$, 2) $\partial_t^2 u - c^2\partial_x^2 u = f$ v $(0,T) \times (0,l)$, 3) $u(0,\cdot) = \partial_t u(0,\cdot) = 0$, 4) $u(\cdot,0) = u(\cdot,l) = 0$ na $[0,T)$.

Poznámky k poznámce.

Poznámka. *Fourierova metoda dává horší výsledky než metoda zrcadlení prezentovaná ve Větě 4.4. Metoda vyžaduje splnění podmínek pro konergenci Fourierových řad a to vede k silnějším předpokladům na data úlohy.*

. . . . konec přednášky 6, 10. 11. 2023

Metoda sférických průměrů.

Věta 4.7 (Gauß-Green-Ostrogradskii, [Evans, 2010])**.** *Ať je $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ otevřená a omezená množina s C^1 hranicí. Pro $x \in \partial\Omega$ označíme $\nu(x)$ vnější jednotkovou normálu k Ω. Ať $u \in C^1(\overline{\Omega})$, $u : \overline{\Omega} \to \mathbb{R}$. Pak*

$$\forall i \in \{1,\ldots,d\} : \int_\Omega \partial_i u \, d\lambda = \int_{\partial\Omega} u\nu_i \, dS.$$

Věta 4.8 (Greenovy formule)**.** *Ať je $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ otevřená a omezená množina s C^1 hranicí a vnější jednotkovou normálou ν. Ať $u, v \in C^2(\overline{\Omega})$, $w \in C^1(\overline{\Omega})$, $u, v, w : \overline{\Omega} \to \mathbb{R}$. Pak*

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

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

Lemma 4.9. *Buď $x \in \mathbb{R}^d$, $r > 0$, u spojitá na $\partial U(x,r)$. Pak*

$$\fint_{\partial U(x,r)} u \, dS = \fint_{\partial U(0,1)} u(x + rz) \, dS(z).$$

Lemma 4.10. *Buď $x \in \mathbb{R}^d$, $R > 0$, u spojitá na $U(x,R)$. Pak*

$$\partial_r (\int_{U(x,r)} u \, d\lambda) = \partial_r \int_0^r \int_{\partial U(x,\rho)} u \, dS \, d\rho = \int_{\partial U(x,r)} u \, dS.$$

Lemma 4.11.

$$d \int_{U(0,1)} 1 \, d\lambda = \int_{\partial U(0,1)} 1 \, dS$$

Definice.

$$\alpha_d := \lambda^d(U(0,1)), \quad d\alpha_d := \int_{\partial U(0,1)} 1 \, dS.$$

Důsledek.

$$\lambda^d(U(0,r)) = \alpha_d r^d, \quad \int_{\partial U(0,r)} \mathrm{d}S = d\alpha_d r^{d-1}.$$

Lemma 4.12. *Buď $x \in \mathbb{R}^d$, $R > 0$, $u \in C^1(U(x,R))$. Označme*

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

Pak platí

$$\partial_r U^x(r) = \fint_{\partial U(x,r)} \nabla u(y) \cdot \frac{y-x}{r} \, dS(y), \quad \text{pro } r \in (0,R).$$

Je-li navíc $u \in C^2(U(x,R))$, je

$$\partial_r U^x(r) = \frac{r}{d} \fint_{U(x,r)} \Delta u(y) \, d\lambda(y), \quad \partial_r^2 U^x(r) = (\frac{1}{d} - 1) \fint_{U(x,r)} \Delta u(y) \, d\lambda(y) + \fint_{\partial U(x,r)} \Delta u(y) \, dS(y), \quad \text{pro } r \in (0,R).$$

Lemma 4.13. *Buď $x \in \mathbb{R}^d$, $m \in \mathbb{N}$, $m \geq 2$, $u \in C^m([0,+\infty) \times \mathbb{R}^d)$, u splňuje bodově*

$$\partial_t^2 u - \Delta u = 0 \quad v \ (0,T) \times \mathbb{R}^d,$$
$$u = u_0, \quad \partial_t u = u_1 \quad v \ \{0\} \times \mathbb{R}^d.$$

Označíme

$$U^x(r,t) = \fint_{\partial U(x,r)} u(t,y) \, dS(y), \quad U_0^x(r) = \fint_{\partial U(x,r)} u_0(y) \, dS(y), \quad U_1^x(r) = \fint_{\partial U(x,r)} u_1(y) \, dS(y).$$

Pak $U^x \in C^m([0,+\infty)^2)$ a

$$\partial_t^2 U^x - \partial_r^2 U^x - \frac{d-1}{r} \partial_r U^x = 0 \quad v \ (0,+\infty)^2,$$
$$U^x = U_0^x, \quad \partial_t U^x = \mathcal{U}_1^x \quad v \ [0,+\infty) \times \{0\}.$$

. . . . konec přednášky 7, 24.11.2023

Lemma 4.14. *Za předpokladů Lemmatu 4.13 buď $d = 3$ a $m = 2$. Označme pro $t, r \geq 0$ funkce $\tilde{U}^x(r,t) := rU^x(r,t)$, $\tilde{U}_0^x(r) := rU_0^x(r)$, $\tilde{U}_1^x(r) := rU_1^x(r)$. Pak platí $\partial_t^2 \tilde{U}^x = \partial_r^2 \tilde{U}^x$ v $(0,+\infty)^2$, $\tilde{U}^x = 0$ v $[0,+\infty) \times \{0\}$, $\tilde{U}^x = \tilde{U}_0^x$ and $\partial_t \tilde{U}^x = \tilde{U}_1^x$ v $\{0\} \times [0,+\infty)$.*

Navíc jsou splněny podmínky kompatibility $\tilde{U}_0^x(0) = 0$, $(\tilde{U}_0^x)''(0) = 0$ a $\tilde{U}_1^x(0) = 0$.

Věta 4.15. *Buď $d \in \{2,3\}$, $u_0 \in C^3(\mathbb{R}^d)$, $u_1 \in C^2(\mathbb{R}^d)$. Definujme u předpisem*

$$u(t,x) = \fint_{\partial U(x,t)} u_0(y) + tu_1(y) + \nabla u_0(y) \cdot (y-x)\, dS(y) \quad \text{pro } x \in \mathbb{R}^3 \text{ a } t \geq 0, \text{ je-li } d = 3,$$

(Kirchhoffův vzorec)

$$u(t,x) = \frac{1}{2} \fint_{U(x,t)} \frac{1}{\sqrt{t^2 - |x-y|^2}} (tu_0(y) + t^2 u_1(y) + t\nabla u_0(y) \cdot (y-x)\, \mathrm{d}\lambda(y) \quad \text{pro } x \in \mathbb{R}^2 \text{ a } t \geq 0, \text{ je-li } d = 2.$$

(Poissonův vzorec)

Pak

1. *$u \in C^2([0,+\infty) \times \mathbb{R}^d)$,*
2. *$\partial_t^2 - \Delta u = 0$ v $(0,+\infty) \times \mathbb{R}^d$,*
3. *$u = u_0$, $\partial_t u = u_1$ v $\{0\} \times \mathbb{R}^d$.*

. . . . konec přednášky 8, 1.12.2023

Přečtení fundamentálního řešení.

Definice 4.16. *Funkce $W_d : \mathbb{R} \times \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}$, $d = 1,2$ nazveme fundamentální řešení vlnové rovnice. Funkci $W_3 : \mathbb{R} \to \mathcal{M}(\mathbb{R}^3)$ nazveme fundamentální řešení vlnové rovnice v $\mathbb{R}^3$.*

$$W_1(t,x) := \frac{1}{2}\chi_{(0,+\infty)}(t)\chi_{(-t,t)}(x),$$
$$W_2(t,x) := \frac{1}{2\pi}\chi_{(0,+\infty)}(t)\chi_{U(0,t)}(x)\frac{1}{\sqrt{t^2 - |y|^2}},$$
$$W_3(t) := \frac{1}{4\pi t}\chi_{(0,+\infty)}(t)\mu_{\partial U(0,t)}.$$

Symbol $\mu_{\partial U(0,t)}$ označuje míru na sféře $\partial U(0,t)$.

Věta 4.17. *Buď $x_0 \in \mathbb{R}^d$, $t_0 > 0$, $K = \{(t,x) \in [0,+\infty) \times \mathbb{R}^d; |x - x_0| \leq t_0 - t, t \in [0,t_0]\}$. Buď $u \in C^2(K)$ a platí $\partial_t^2 u - \Delta u = 0$ v K, $u = 0$, $\partial_t u = 0$ v $\{0\} \times U(x_0, t_0)$. Pak $u = 0$ v K.*

Důsledek. *1) Klasické řešení Cauchyovy úlohy pro vlnovou rovnici je určené jednoznačně. 2) Informace se pomocí vlnové rovnice šíří pouze konečnou rychlostí.*

Důsledek. *Buďte $T > 0$, $d \in \{2,3\}$, u a $\tilde{u}$ řešení vlnové rovnice odpovídající datům (u_0, u_1) a $(\tilde{u}_0, \tilde{u}_1)$ na $[0,T) \times \mathbb{R}^d$. Na data klademe předpoklady z Věty 4.15. Označme*

$$\|u_0 - \tilde{u}_0\|_{L^\infty((0,T)\times\mathbb{R}^d)} + T\|\nabla u_0 - \nabla \tilde{u}_0\|_{L^\infty((0,T)\times\mathbb{R}^d)} + T\|u_1 - \tilde{u}_1\|_{L^\infty((0,T)\times\mathbb{R}^d)} =: \epsilon.$$

Pak existuje $C > 0$, že

$$\|u - \tilde{u}\|_{L^\infty((0,T)\times\mathbb{R}^d)} \leq C\epsilon.$$

Podobně se dá postupovat i pro $d = 1$ a pro nenulovou pravou stranu pro $d \in \{1,2,3\}$.

Cauchyova úloha pro vlnovou rovnici je dobře zadaná.

5 Rovnice vedení tepla

Rovnici

$$\partial_t u - \Delta u = f \tag{5.1}$$

nazýváme *rovnice vedení tepla*. Rovnici budeme studovat v $(0,+\infty)\times\Omega$, kde $\Omega\subset\mathbb{R}^d$ je omezená otevřená množina s C^1 hranicí nebo $\Omega=\mathbb{R}^d$. Neznámá funkce u může reprezentovat například teplotu, pak zadaná funkce f udává hustotu zdrojů tepla.

Příklad. *Speciální řešení rovnice vedení tepla s $f=0$*

- *$u(t,x)=c$, $c\in\mathbb{R}$ řeší RVT v $\mathbb{R}\times\mathbb{R}^d$*
- *Je-li $x_0\in\mathbb{R}^d$, $t_0\in\mathbb{R}$, řeší $u(t,x)=t-t_0+|x-x_0|^2/(2d)$ RVT v $\mathbb{R}\times\mathbb{R}^d$*
- *Je-li $u\in C^2((0,+\infty)\times\mathbb{R}^d)$ řešení RVT na $(0,+\infty)\times\mathbb{R}^d$, je funkce u_λ definovaná pro $t>0$, $x\in\mathbb{R}^d$ předpisem $u_\lambda(t,x)=u(\lambda^2 t,\lambda x)$ také řešením RVT na $(0,+\infty)\times\mathbb{R}^d$.*

Cvičení. *Najděte sféricky symetrické samopodobné řešení RVT na $(0,+\infty)\times\mathbb{R}^d$, tj. řešení RVT, pro které platí pro všechny $\lambda>0$, že $u=u_\lambda$ na $(0,+\infty)\times\mathbb{R}^d$ a navíc závisí na x pouze přes jeho normu. Toto řešení musí mít tvar $u(t,x)=v(|x|^2/t)$ pro vhodnou funkci v.*

Příklad. *Další řešení rovnice vedení tepla s $f=0$*

- *Je-li $u\in C^\infty((0,+\infty)\times\mathbb{R}^d)$ řešení RVT na $(0,+\infty)\times\mathbb{R}^d$ tvaru $u(t,x)=v(|x|^2/t)$, jsou funkce $\partial_t u$ a $\partial_i u$ také řešením RVT na $(0,+\infty)\times\mathbb{R}^d$. Platí $\partial_t u(t,x)=-v'(|x|^2/t)|x|^2/t^2$, $\partial_i u(t,x)=v'(|x|^2/t)2x_i/t$.*

Motivováni posledním příkladem hledejme řešení RVT ve tvaru $u(t,x)=t^{-\beta}v(|x|^2/t)$ pro vhodné $\beta\in\mathbb{R}$. Dosazením do RVT zjitíme, že v musí splňovat obyčejnou diferenciální rovnici

$$4v''(\tau)\tau+(2d+\tau)v'(\tau)+\beta v(\tau)=0.$$

Pomocí metody integračního faktoru tuto rovnici můžeme napsat, pokud je $\beta=d/2$, jako

$$\left(\left[4v'(\tau)+v(\tau)\right]\tau^{\frac{d}{2}}\right)'=0.$$

Integrací této rovnice dostaneme

$$v(\tau)=e^{-\frac{\tau}{4}}\left(C\int_0^\tau s^{-\frac{d}{2}}e^{\frac{s}{4}}\,ds+D\right)$$

pro jisté $C,D\in\mathbb{R}$ a $\tau\in(0,+\infty)$. Pro jednoduchost položíme $C=0$ a D dopočteme tak, aby $\int_{\mathbb{R}^d}u(t,x)\,dx=1$ pro $t>0$, tj. $D=(4\pi)^{d/2}$.

Definice (Fundamentální řešení RVT)**.** *Funkci*

$$G(t,x):=\begin{cases}\dfrac{1}{(4\pi t)^{\frac{d}{2}}}e^{-\frac{|x|^2}{4t}}, & \text{pro } t>0\\ 0, & \text{pro } t\le 0\end{cases}$$

nazveme fundamentální řešení rovnice vedení tepla.

. . . . konec přednášky 9, 8.12.2023

Definice (Prostor testovacích funkcí). *Je-li* $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ *neprázdná otevřená množina, definujeme* prostor testovacích funkcí *jako množinu*

$$\mathcal{D}(\Omega) = \{\varphi \in C^\infty(\Omega); \exists K \subset \Omega, K \text{ kompaktní} : \operatorname{spt} \varphi \subset K\},$$

viz např. [M. Renardy, 1993], Section 5.1.2.

Věta 5.1 (Vlastnosti fundamentálního řešení RVT). *1)* $G \in C^\infty(\mathbb{R} \times \mathbb{R}^d \setminus \{(0,0)\})$*, 2)* $\partial_t G - \Delta G = 0$ *v* $\mathbb{R} \times \mathbb{R}^d \setminus \{(0,0)\}$*, 3) pro všechna* $t > 0$ *platí* $\int_{\mathbb{R}^d} G(t,x)\,dx = 1$, $G \in L^1_{\mathrm{loc}}(\mathbb{R}^{d+1})$*, 4) pro všechna* $\varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^{d+1})$ *platí*

$$\int_{\mathbb{R}^{d+1}} G(-\partial_t \varphi - \Delta\varphi)\,d\lambda = \varphi(0,0).$$

Poznámka. *Pro* $\psi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^{d+1})$, $t \in \mathbb{R}$ *a* $x \in \mathbb{R}^d$ *definujeme pro* $\tau \in \mathbb{R}$ *a* $\xi \in \mathbb{R}^d$ *funkci* $\varphi(\tau,\xi) = \psi(t-\tau, x-\xi)$*. Zřejmě je* $\varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^{d+1})$*. Dosazením do Věty 5.1 získáme*

$$\begin{aligned}
&\psi(t,x) = \varphi(0,0) = \int_{\mathbb{R}^{d+1}} G(-\partial_\tau\varphi - \Delta_\xi\varphi)\,d\lambda = \int_{\mathbb{R}^{d+1}} G(\tau,\xi)(\partial_t\psi(t-\tau,x-\xi) - \Delta_x\varphi(t-\tau,x-\xi))\,d\lambda \\
&= \partial_t u(t,x) - \Delta u(t,x), \quad \textit{pro} \\
&u(t,x) = \int_{\mathbb{R}^{d+1}} G(\tau,\xi)\psi(t-\tau,x-\xi)d(\tau,\xi).
\end{aligned}$$

Věta 5.2 (Klasické řešení Cauchyovy úlohy pro RVT). *Buď* $T > 0$, $Q_T = (0,T) \times \mathbb{R}^d$, $f, \partial_t f, \nabla f, \nabla^2 f \in L^\infty(Q_T) \cap C(Q_T)$*. Definujme pro* $t \in [0,T)$, $x \in \mathbb{R}^d$

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

Pak platí: 1) $u_1 \in C([0,T) \times \mathbb{R}^d)$, $\partial_t u_1, \nabla u_1, \nabla^2 u_1 \in L^\infty(Q_T) \cap C(Q_T)$*, 2)* $\partial_t u_1 - \Delta u_1 = f$ *pro* $t > 0$, $x \in \mathbb{R}^d$*, 3)* $u_1 = 0$ *v* $\{0\} \times \mathbb{R}^d$*, 4)* $\|u_1\|_{L^\infty(Q_T)} \le T\|f\|_{L^\infty(Q_T)}$.

Důkaz je možné nalézt v [John and Nečas, 1982, Sekce 6.3, Věta 3].

Věta 5.3. *Buď* $u_0 \in C(\mathbb{R}^d) \cap L^\infty(\mathbb{R}^d)$*. Definujme*

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

Pak platí: 1) $u_2 \in C([0,+\infty) \times \mathbb{R}^d) \cap C^\infty((0,+\infty) \times \mathbb{R}^d)$*, 2)* $\partial_t u_2 - \Delta u_2 = 0$ *v* $(0,+\infty) \times \mathbb{R}^d$*, 3)* $u_2 = u_0$ *v* $\{0\} \times \mathbb{R}^d$*, 4)* $\|u_2\|_{L^\infty(0,+\infty) \times \mathbb{R}^d} \le \|u_0\|_{L^\infty(\mathbb{R}^d)}$.

. . . . konec přednášky 10, 15.12.2023

Důkaz. Přepíšeme u_2 pomocí substituce $x - \xi = y$ následovně

$$u_2(t,x) = \int_{\mathbb{R}^d} (\frac{1}{\sqrt{4\pi t}})^d e^{-\frac{|x-y|^2}{4t}} u_0(y) dy, \quad \text{pro } t > 0. \tag{5.2}$$

Z tohoto vyjádření je zřejmé, že je možné u_2 v $t > 0$ libovolně derivovat podle t a x a výsledné funkce jsou spojité. Pro majoranty využijeme fakt, že $t > 0$, čímž se podaří zvládnout t ve jmenovateli. Ukažme například, že u_2 je spojitá v $(0,+\infty) \times \mathbb{R}^d$. Integrand je jistě spojitý v $(t,x) \in (0,+\infty) \times \mathbb{R}^d$, integrovaná funkce je spojitá v y. Stačí tedy pro pevné $(t_0,x_0) \in (0,+\infty) \times \mathbb{R}^d$ najít na dostatečně malém okolí $U((t_0,x_0),\epsilon)$ s $\epsilon \in (0, t_0/2)$ integrovatelnou majorantu. Připravme si nejdříve odhad pomocí Youngovy nerovnosti $2x \cdot y \le 2|x|^2 + |y|^2/2$, pak $-|x-y|^2 = -|x|^2 + 2x \cdot y - |y|^2 \le |x|^2 - |y|^2/2$. Odhadujme pro $(t,x) \in U((t_0,x_0),\epsilon)$

$$|(\frac{1}{\sqrt{4\pi t}})^d e^{-\frac{|x-y|^2}{4t}} u_0(y)| \le C t^{-\frac{d}{2}} e^{\frac{|x|^2}{4t}} e^{\frac{-|y|^2}{8t}} \le C(t_0-\epsilon)^{-\frac{d}{2}} e^{\frac{(|x_0|+\epsilon)^2}{4(t_0-\epsilon)}} e^{-\frac{|y|^2}{8t}}.$$

Našli jsme tedy majorantu, která dokazuje $u_2 \in C((0,+\infty)\times\mathbb{R}^d)$. Podobně se ukáže také $u_2 \in C^\infty((0,+\infty)\times\mathbb{R}^d)$. Máme tedy, že ve vyjádření (5.2) je možné prohazovat derivace a integrál, a vzhledem k tomu, že G řeší RVT v $(0,+\infty)\times\mathbb{R}^d$ dostáváme platnost 3).

Ukažme nyní $u_2 \in C([0,+\infty)\times\mathbb{R}^d)$. Zafixujeme $x_0 \in \mathbb{R}^d$, $\epsilon > 0$. Chceme ukázat, že existují $\delta > 0$ a $\gamma > 0$ takové, že pro $(t,x) \in (0,\gamma)\times U(x_0,\delta)$ platí $|u(t,x) - u_0(x)| \leq \epsilon$. Konstanty γ, δ nastavíme později. Najdeme $\beta > 0$ tak, aby pro $y \in U(x_0, 2\beta)$ platilo $|u_0(y) - u_0(x_0)| \leq \epsilon$ a odhadujme

$$
\begin{aligned}
|u(t,x) - u_0(x_0)| &\leq \int_{\mathbb{R}^d} (\frac{1}{\sqrt{4\pi t}})^d e^{-\frac{|\xi|^2}{4t}} |u_0(x-\xi) - u_0(x_0)| d\xi \\
= \int_{U(0,\beta)} (\frac{1}{\sqrt{4\pi t}})^d e^{-\frac{|\xi|^2}{4t}} |u_0(x-\xi) - u_0(x_0)| d\xi &+ \int_{U(0,\beta)^c} (\frac{1}{\sqrt{4\pi t}})^d e^{-\frac{|\xi|^2}{4t}} |u_0(x-\xi) - u_0(x_0)| d\xi = I + II.
\end{aligned}
$$

Zvolíme $\delta = \beta$, pak pro $x \in U(x_0,\delta)$ a $\xi \in U(0,\beta)$ platí $|x - \xi - x_0| < 2\beta$ a tedy $|u_0(x-\xi) - u_0(x_0)| < \epsilon$. Dostáváme

$$
I \leq \epsilon \int_{\mathbb{R}^d} (\frac{1}{\sqrt{4\pi t}})^d e^{-\frac{|\xi|^2}{4t}} d\xi = \epsilon.
$$

K odhadu integrálu II použijeme omezenost u_0, substituci $\xi = 2\sqrt{t}y$ a Leviho větu.

$$
II \leq 2\|u_0\|_\infty \int_{U(0,\frac{\beta}{2\sqrt{t}})^c} (\frac{1}{\sqrt{\pi}})^d e^{-|y|^2} dy \to 0, \quad \text{pro } t \to 0+.
$$

Je tedy možné zvolit $\gamma > 0$ tak, aby pro $t \in (0,\gamma)$ platilo $II < \epsilon$. S přihlédnutím ke spojitosti u_0 dostáváme spojitost u_2 v $(0,x_0)$ vzhledem k $[0,+\infty)\times\mathbb{R}^d$. Dokončili jsme důkaz 1) a 3). Odhad 4) plyne hned z definice u_2 a vlastnosti fundamentálního řešení, viz Věta 5.1, 3). □

Poznámka. *Funkce u_2 splňuje $u_2 \in C^\infty((0,+\infty)\times\mathbb{R}^d)$ i za slabších předpokladů na u_0. Z důkazu je vidět, že například stačí $u_0 \in L^\infty(\mathbb{R}^d) \cup L^1(\mathbb{R}^d)$.*

Hladkost u_2 v jistém smyslu nezávisí na počáteční podmínce. Je-li pro jisté $T > 0$, $x_0 \in \mathbb{R}^d$, $R \in (0,\sqrt{T})$, $Q_R = (T - R^2, T)\times U(x_0,R)$ a $u_2 \in C^2(Q)$ řeší v Q rovnici $\partial_t u_2 - \Delta u_2 = 0$, je $u \in C^\infty(Q_{\frac{R}{2}})$.

Věta 5.4 (Slabý princip maxima na omezené množině)**.** *Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ omezená, otevřená, $T > 0$, $Q_T = (0,T)\times\Omega$, $u \in C(\overline{Q}_T)$, $\Gamma = (\{0\}\times\Omega)\cup([0,T]\times\partial\Omega)$, $\partial_t u, \nabla u, \nabla^2 u \in C(\overline{Q}_T \setminus \Gamma)$ a platí $\partial_t u - \Delta u \leq 0$ na $\overline{Q}_T \setminus \Gamma$. Pak platí*

$$
\max_{\overline{Q}_T} u = \max_{\Gamma} u.
$$

Poznámka. *Γ se nazývá parabolická hranice Q_T.*

Důkaz. Důkaz povedeme sporem. Ať existuje $(t_0,x_0) \in \overline{Q}_T \setminus \Gamma$ takové, že $u(t_0,x_0) = \max_{\overline{Q}_T} u > \max_\Gamma u$.

1) Pokud platí $\partial_t u(t_0,x_0) - \Delta u(t_0,x_0) < 0$ dostaneme snadno spor. V (t_0,x_0) nabývá u maxima, tedy zde musí platit nutné podmínky maxima, tj. $\partial_t u(t_0,x_0) \geq 0$ a $\partial_t u(t_0,x_0) = 0$, $\partial_i^2 u(t_0,x_0) \leq 0$ pro každé $i \in \{1,\ldots,d\}$. Dohromady dostaneme $\partial_t u(t_0,x_0) - \Delta u(t_0,x_0) \geq 0$ a to je spor s předpokladem tohoto odstavce.

2) V obecném případě definujeme funkci $v(t,x) = u(t,x) + \epsilon|x|^2$ a ukážeme, že pro vhodně zvolené malé $\epsilon > 0$ na ni můžeme použít odstavec 1). Pro každé $\epsilon > 0$ platí pro funkci v nerovnost $\partial_t v - \Delta v < 0$ v $\overline{Q}_T \setminus \Gamma$. Množina Ω je omezená, existuje tedy $R > 0$ takové, že $\Omega \subset U(0,R)$. Platí tedy $\|u - v\|_{L^\infty(Q_T)} \leq \epsilon R^2$. Definujme $m = \max_{\overline{Q}_T} u - \max_\Gamma u > 0$ a volme $\epsilon > 0$ tak, aby $\epsilon R^2 < m/2$. Pak platí $v(t_0,x_0) \geq u(t_0,x_0) - \epsilon R^2 > u(t_0,x_0) - m/2 = \max_\Gamma u + m - m/2 \geq \max_\Gamma(v + u - v) + m/2 \geq \max_\Gamma v - \|u - v\|_{L^\infty(\Gamma)} + m/2 \geq \max_\Gamma v$. Funkce v tedy nabývá svého maxima na $\overline{Q}_T$ v nějakém bodě z $\overline{Q}_T \setminus \Gamma$ a to vede ke sporu podle ostavce 1. □

Věta 5.5 (Slabý princip maxima pro Cauchyovu úlohu pro rovnici vedení tepla)**.** *Buď $T > 0$, $u \in C([0,T]\times\mathbb{R}^d) \cap L^\infty((0,T)\times\mathbb{R}^d)$, $\partial_t u, \nabla u, \nabla^2 u \in C((0,T]\times\mathbb{R}^d)$ a platí $\partial_t u - \Delta u \leq 0$ na $(0,T]\times\mathbb{R}^d$. Pak platí*

$$
\sup_{[0,T]\times\mathbb{R}^d} u = \sup_{\{0\}\times\mathbb{R}^d} u.
$$

Důsledek. *Řešení Cauchyovy úlohy pro rovnici vedení tepla je určeno jednoznačně ve třídě funkcí, které jsou omezené a splňují předpoklady na regularitu z Věty 5.5.*

Důsledek. *Řešení Cauchyovy úlohy pro rovnici vedení tepla závisí spojitě na datech ve třídě funkcí, které jsou omezené a splňují předpoklady na regularitu z Věty 5.5. Ať $T > 0$ a funkce u a v jsou omezené a splňují předpoklady na regularitu z Věty 5.5. Ať $\partial_t u - \Delta u = f$, $\partial_t v - \Delta v = g$ v $(0,T] \times \Omega$, $u = u_0$, $v = v_0$ v $\{0\} \times \mathbb{R}^d$. Pak*

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

Poznámka. *Pozor, existují netriviální hladká řešení úlohy $\partial_t u - \Delta u = 0$ v $(0,T] \times \mathbb{R}^d$, $u = 0$ v $\{0\} \times \mathbb{R}^d$, viz [Tichonov, 1935]. Tato řešení nemohou být omezená.*

. . . . konec přednášky 11, 5.1.2024

6 Eliptické rovnice - Laplaceova a Poissonova rovnice

Definice. *Funkci $\Gamma : \{z \in \mathbb{C}; \mathcal{R}e(z) > 0\} \to \mathbb{C}$ definujeme předpisem*

$$\Gamma(z) = \int_0^{+\infty} s^{z-1} e^{-s} ds.$$

Poznámka. *Pro $z \in \mathbb{C}$ s $\mathcal{R}e(z) > 0$ platí $\Gamma(z+1) = z\Gamma(z)$.*

Lemma (Objem jednotkové koule)**.** *Pro $d \in \mathbb{N}$ platí*

$$\alpha_d := \lambda^d(U(0,1)) = \frac{\pi^{\frac{d}{2}}}{\Gamma(\frac{d}{2} + 1)}.$$

Důkaz. Plyne z integrálu

$$\int_{\mathbb{R}^d} \exp(-|x|^2)\, dx.$$

Počítá se dvěma různými způsoby. Jednou pomocí polárních souřadnic a podruhé pomocí sférické Fubiniho věty. □

Lemma. *Buď $R > 0$, $\alpha \in \mathbb{R}$. Pak $\int_{U(0,R)} |x|^\alpha d\lambda^d(x) < +\infty$, právě když $\alpha > -d$.*

Definice. *Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$, $f : \Omega \to \mathbb{R}$. Rovnici $-\Delta u = 0$ pro neznámou funkci $u : \Omega \to \mathbb{R}$ nazveme Laplaceovou rovnicí. Rovnici $-\Delta u = f$ pro neznámou funkci $u : \Omega \to \mathbb{R}$ nazveme Poissonovou rovnicí.*

Fundamentální řešení Laplaceovy rovnice získáme pro $d > 2$ integrací fundamentálního řešení rovnice vedení tepla podle času t. Platí

$$\int_0^{+\infty} G(t,x) dt = \left(\frac{1}{4\pi}\right)^{\frac{d}{2}} \int_0^{+\infty} t^{-\frac{d}{2}} e^{-\frac{|x|^2}{4t}} dt = \frac{|x|^{2-d}}{d(d-2)\alpha_d}.$$

Definice. *Funkci definovanou pro $x \in \mathbb{R}^d \setminus \{0\}$ předpisem*

$$\Phi(x) = \begin{cases} -\dfrac{1}{2\pi} \lg(|x|), & \text{pro } d = 2, \\ \dfrac{|x|^{2-d}}{d(d-2)\alpha_d}, & \text{pro } d \in \mathbb{N},\ d > 2, \end{cases}$$

nazveme fundamentání řešení Laplaceovy rovnice. Pro $x \in \mathbb{R}^d$ definujeme funkci $\Phi_x : \mathbb{R}^d \setminus \{x\} \to \mathbb{R}$ předpisem $\Phi_x(y) = \Phi(y - x)$ pro $y \in \mathbb{R}^d \setminus \{x\}$.

Věta 6.1 (Vlastnosti fundamentálního řešení Laplaceovy rovnice)**.** *Fundamentální řešení Laplaceovy rovnice splňuje 1)* $\Phi, \nabla\Phi \in C^\infty(\mathbb{R}^d \setminus \{0\}) \cap L^1_{loc}(\mathbb{R}^d)$*, 2)* $-\Delta\Phi = 0$ *v* $\mathbb{R}^d \setminus \{0\}$*, 3) pro všechny* $\varphi \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^d)$ *platí* $-\int_{\mathbb{R}^d} \Phi\Delta\varphi = \varphi(0)$*.*

Důkaz. 1) Hladkost Φ je jasná. Integrovatelnost Φ a $\nabla\Phi$ plyne z předchozího lemmatu.

2) Tato rovnost je cvičení na parciální derivace.

3) Tato identita plyne z následující věty. □

Věta 6.2 (Věta o třech potenciálech)**.** *Buď* $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ *otevřená, omezená s* C^1 *hranicí,* $u \in C^2(\overline{\Omega})$*. Pro pevné* $x \in \Omega$ *a* $y \in \mathbb{R}^d \setminus \{x\}$ *definujme* $\Phi_x(y) = \Phi(y - x)$*. Pak pro každé* $x \in \Omega$ *platí*

$$u(x) = \int_\Omega -\Delta u \Phi_x \, d\lambda + \int_{\partial\Omega} \frac{\partial u}{\partial \nu} \Phi_x \, dS - \int_{\partial\Omega} u \frac{\partial \Phi_x}{\partial \nu} \, dS. \tag{6.1}$$

Důkaz. Důkaz provedeme pro $d > 2$. Pro $d = 2$ se postupuje obdobně. Chceme použít druhou Greenovu identitu 4.8 na u a Φ_x. Přímo to není možné, kvůli singularitě Φ_x v x. Proto z Ω vyřízneme malou kouli. Buď tedy $\rho \in (0, \operatorname{dist}(x, \partial\Omega))$. Definujeme $\Omega_\rho := \Omega \setminus \overline{U}(x, \rho)$. Na této množině už je možné Greenovu identitu na u a Φ_x použít. Dostaneme

$$I_\rho + II_\rho := \int_{\Omega_\rho} \Delta u \Phi_x - u \Delta \Phi_x \, d\lambda = \int_{\partial\Omega_\rho} \frac{\partial u}{\partial \nu} \Phi_x - u \frac{\partial \Phi_x}{\partial \nu} \, dS =: III_\rho + IV_\rho. \tag{6.2}$$

Z Věty 6.1, 2) dostaneme hned $II_\rho = 0$. V ostatních členech přejdeme k limitě $\rho \to 0+$. Začneme s výrazem I_ρ. Chceme použít Lebesgueovu větu. Zřejmě platí $\Delta u \Phi_x \chi_{\Omega \setminus U(0,\rho)} \to \Delta u \Phi_x$ s.v. na Ω. Integrovatelná majoranta nezávislá na $\rho > 0$ je funkce $\|\Delta u\|_{L^\infty(\Omega)} \Phi_x$, viz opět Věta 6.1. Podle Lebesgueovy věty tedy platí $I_\rho \to \int_\Omega \Delta u \Phi_x$ pro $\rho \to 0+$. Dále si uvědomíme, že $\partial\Omega_\rho = \partial\Omega \cup \partial U^c(x, \rho)$ a pro $y \in \partial U^c(x, \rho)$ platí $\Phi_x(y) = \rho^{2-d}/(d(d-2)\alpha_d)$. Odhadneme

$$\left| \int_{\partial U^c(x,\rho)} \frac{\partial u}{\partial \nu} \Phi_x dS \right| \leq \frac{\rho}{d-2} \|\nabla u\|_\infty \to 0, \quad \text{pro } \rho \to 0+.$$

Platí tedy

$$III_\rho \to \int_{\partial\Omega} \frac{\partial u}{\partial \nu} \Phi_x \, dS \quad \text{pro } \rho \to 0+.$$

Konečně pro $y \in \partial U^c(x, \rho)$ spočítáme

$$\nu(y) = \frac{x - y}{|x - y|}, \quad \nabla\Phi_x(y) = -\frac{1}{d\alpha_d} \frac{y - x}{|y - x|^d}, \quad \frac{\partial \Phi_x}{\partial \nu}(y) = \frac{1}{d\alpha_d} \frac{1}{|y - x|^{d-1}} = \left(\int_{\partial U^c(x,\rho)} 1 \, dS\right)^{-1}. \tag{6.3}$$

Z předešlého a ze spojitosti u v bodě x dostáváme

$$IV_\rho = -\int_{\partial\Omega} u \frac{\partial \Phi_x}{\partial \nu} \, dS - \fint_{\partial U^c(x,\rho)} u \, dS \to -\int_{\partial\Omega} u \frac{\partial \Phi_x}{\partial \nu} \, dS - u(x) \quad \text{pro } \rho \to 0+.$$

Limitní přechod k $\rho \to 0+$ v (6.2) a přeuspořádání členů v získané rovnosti dává (6.1). □

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

Věta 6.3 ([Evans, 2010], Sekce 2.2, Theorem 1)**.** *Buď* $f \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^d)$*. Pak funkce* $u : \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}$ *definovaná pro* $x \in \mathbb{R}^d$ *předpisem*

$$u(x) = \int_{\mathbb{R}^d} f(y)\Phi(x - y) \, d\lambda(y) = \int_{\mathbb{R}^d} f(x - y)\Phi(y) \, d\lambda(y)$$

je klasické řešení Poissonovy rovnice s pravou stranou f *na* $\mathbb{R}^d$*. Toto řešení splňuje*

$$\lim_{|x| \to +\infty} u(x) = 0.$$

Důkaz. Regularita plyne z Věty o derivování Lebesgueova integrálu podle parametru. Splnění rovnice je důsledkem Věty 6.2. □

Definice (Harmonické funkce)**.** *Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ neprázdná otevřená množina. Řekneme, že $u : \Omega \to \mathbb{R}$ je* harmonická v Ω *(píšeme $u \in \mathcal{H}(\Omega)$), pokud $u \in C^2(\Omega)$ a $\Delta u(x) = 0$ pro všechna $x \in \Omega$ (tj. u bodově řeší Laplaceovu rovnici v Ω).*

Příklad. *Buď $a \in \mathbb{R}^d$, $b \in \mathbb{R}$. Funkce $u(x) = a \cdot x + b$ pro $x \in \mathbb{R}^d$ jsou harmonické na $\mathbb{R}^d$.*

Funkce definovaná $u(x) = x_1 x_2$ pro $x = (x_1, \ldots, x_d) \in \mathbb{R}^d$ je harmonická na $\mathbb{R}^d$.

Funkce Φ je harmonická na $\mathbb{R}^d \setminus \{0\}$.

Buď $x \in \mathbb{R}^d$. Funkce Φ_x je harmonická na $\mathbb{R}^d \setminus \{x\}$.

Funkce $u(x, y) = e^x \cos(y)$ je harmonická na $\mathbb{R}^2$ a není omezená.

Věta 6.4 (Věta o průměru)**.** *Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ neprázdná otevřená množina, $u \in \mathcal{H}(\Omega)$. Pro každou kouli $U := U(x, r)$ takovou, že $\overline{U} \subset \Omega$, platí*

$$u(x) = \fint_{\partial U} u \, dS = \fint_U u \, d\lambda. \tag{6.4}$$

Důkaz. Důkaz provedeme pro $d > 2$, případ $d = 2$ lze dokázat analogicky. Jelikož je funkce u harmonická, dostáváme z Věty 6.2 (při zachování značení z této věty)

$$u(x) = \int_{\partial U} \frac{\partial u}{\partial \nu} \Phi_x \, dS - \int_{\partial U} u \frac{\partial \Phi_x}{\partial \nu} \, dS =: I + II. \tag{6.5}$$

Funkce Φ_x je na ∂U konstantní. Označíme tuto hodnotu Φ_0 a spočítáme I pomocí Věty 4.7

$$I = \Phi_0 \int_{\partial U} \frac{\partial u}{\partial \nu} \, dS = \int_U \Delta u \, d\lambda = 0.$$

Podobně jako v důkazu Věty 6.2, viz (6.3), spočítáme, že na ∂U je

$$\frac{\partial \Phi_x}{\partial \nu} = -\Big(\int_{\partial U} 1 \, dS\Big)^{-1}.$$

Dosazením tohoto vztahu do (6.5) dostaneme tvrzení o sférickém průměru.

Dále počítáme pomocí Lemmatu 4.10 a pomocí již dokázané rovnosti pro $r > 0$ taková, že $\overline{U}(x, r) \subset \Omega$

$$\partial_r\Big(\int_{U(x,r)} u \, d\lambda - \alpha_d r^d u(x)\Big) = \int_{\partial U(x,r)} u \, dS - d\alpha_d r^{d-1} u(x) = 0.$$

Jelikož je $\lim_{r \to 0+} \int_{U(x,r)} u \, d\lambda - \alpha_d r^d u(x) = 0$, musí platit $\int_{U(x,r)} u \, d\lambda - \alpha_d r^d u(x) = 0$, pokud $\overline{U}(x, r) \subset \Omega$. □

Věta 6.5 (Liouvilleova věta)**.** *Buď $u \in \mathcal{H}(\mathbb{R}^d)$ zdola (nebo shora) omezená funkce. Pak je u na $\mathbb{R}^d$ konstantní.*

Důsledek.

- *Klasické řešení Poissonovy rovnice je jednoznačně určeno ve třídě*

$$\{v \in C^2(\mathbb{R}^d); \lim_{|x| \to +\infty} v(x) = 0\}.$$

- *Spojitá závislost řešení Poissonovy rovnice na datech. Buď $f \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^d)$ a u příslušné jednoznačně určené řešení Poissonovy rovnice splňující $u \in C^2(\mathbb{R}^d)$ a $\lim_{|x| \to +\infty} u(x) = 0$, pak*

$$\|u\|_{L^\infty(\mathbb{R}^d)} \leq C(\|f\|_{L^1(\mathbb{R}^d)} + \|f\|_{L^\infty(\mathbb{R}^d)}).$$

  Konstanta C nazávisí na f ani u.

Věta 6.6 (Silný princip maxima)**.** *Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ neprázdná, otevřená a souvislá množina, $u \in \mathcal{H}(\Omega)$ a existuje $x_0 \in \Omega$ takové, že u nabývá v bodě x_0 svého (i neostrého) globálního extrému. Pak je u na Ω konstantní a v Ω platí $u = u(x_0)$.*

Důkaz. Označme $U = \{x \in \Omega; u(x) = u(x_0)\}$. Množina U je zjevně uzavřená v Ω. Ukážeme, že tato množina je i otevřená. Ze souvislosti množiny Ω pak hned dostaneme $U = \Omega$. Volme tedy bod $x \in U$. Bod x je bodem maxima funkce u. Existuje tedy $r > 0$ takové, že $u \leq u(x)$ na $U(x, r)$. Z Věty o průměru 6.4 dostáváme

$$0 = u(x) - \fint_{U(x,r)} u \, d\lambda = \fint_{U(x,r)} (u(x) - u(y)) \, d\lambda(y).$$

Protože pro $y \in U(x, r)$ platí $u(x) - u(y) \geq 0$ musí pro tato y platit $u(x) = u(y)$ a tedy $U(x, r) \subset U$. Množina U je tedy otevřená. $\square$

. . . . konec přednášky 12, 12.1.2024

Důsledek 6.7 (Slabý princip maxima)**.** *Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ neprázdná, omezená, otevřená a souvislá množina, $u \in \mathcal{H}(\Omega) \cap C(\overline{\Omega})$. Pak platí*

$$\inf_{\partial\Omega} u \leq \inf_{\Omega} u \leq \sup_{\Omega} u \leq \sup_{\partial\Omega} u.$$

Poznámka. *Věta 6.7 neplatí pro neomezené množiny. Uvažte funkci $u(x, y) = e^x \cos(y)$ na $\mathbb{R} \times (-\pi/2, \pi/2)$.*

Definice (Dirichletova úloha pro Laplace-Poissonovu rovnici)**.** *Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ neprázdná, otevřená množina. Buďte dále $g : \partial\Omega \to \mathbb{R}$ a $f : \Omega \to \mathbb{R}$. Řekneme, že u je klasickým řešením Dirichletovy úlohy pro Laplace-Poissonovu rovnici (s daty g, f) v Ω, pokud 1) $u \in C^2(\Omega) \cup C(\overline{\Omega})$, 2) $-\Delta u = f$ v Ω, 3) $u = g$ na $\partial\Omega$.*

Věta 6.8. *Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ neprázdná, otevřená a omezená množina. Buďte dále $\varphi : \partial\Omega \to \mathbb{R}$ a $f : \Omega \to \mathbb{R}$. Klasické řešení Dirichletovy úlohy pro Laplace-Poissonovu rovnici s daty g, f v Ω je určené jednoznačně.*

Důkaz. Ať jsou u, v dvě klasická řešení Dirichletovy úlohy pro Laplace-Poissonovu rovnici s daty φ, f v Ω. Předpokládáme, že Ω je souvislá. Jinak provedeme následující úvahu pro všechny její komponenty. Funkce $w := u - v$ splňuje $w \in C(\overline{\Omega})$. Nabývá tedy v $\overline{\Omega}$ svého maxima i minima. Pokud nabývá svého maxima i minima na $\partial\Omega$, je $w = 0$ na Ω a tedy $u = v$ na Ω. Dále víme, že $w \in \mathcal{H}(\Omega)$. Pokud w nabývá svého maxima v Ω, plyne z Věty 6.6, že je w konstantní na Ω. Protože je $w \in C(\overline{\Omega})$ a $w = 0$ na $\partial\Omega$, musí být opět $w = 0$ na Ω. Podobně se postupuje také v případě, že w nabývá svého minima v Ω. $\square$

Definice (Greenova funkce)**.** *Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ otevřená, omezená s C^1 hranicí. Předpokládejme, že pro každé $x \in \Omega$ existuje funkce Ψ_x, řešení problému 1) $\Psi_x \in C(\overline{\Omega}) \cap \mathcal{H}(\Omega)$, 2) $\Psi_x = \Phi_x$ na $\partial\Omega$. Funkci $G : \Omega^2 \to \mathbb{R}$ definovanou předpisem $G(x, y) = \Phi_x(y) - \Psi_x(y)$ pro $x, y \in \Omega$ nazveme Greenovou funkcí Laplaceovy-Poissonovy úlohy na Ω.*

Věta 6.9 (Reprezentace řešení Laplaceovy-Poissonovy rovnice pomocí Greenovy funkce)**.** *Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ otevřená, omezená s C^1 hranicí. Předpokládejme, že existuje Greenova funkce Laplaceovy-Poissonovy úlohy na Ω. Buď $f \in C^2(\Omega)$, $g \in C(\partial\Omega)$, $u \in C^2(\overline{\Omega})$ klasické řešení Dirichletovy úlohy pro Laplace-Poissonovu rovnici (s daty φ, f) v Ω. Pak pro $x \in \Omega$ platí*

$$u(x) = \int_{\Omega} f(y) G(x, y) \, d\lambda(y) - \int_{\partial\Omega} g(y) \nabla_y G(x, y) \cdot \nu(y) \, dS(y).$$

Důsledek. *Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ otevřená, omezená s C^1 hranicí. Předpokládejme, že existuje Greenova funkce Laplaceovy-Poissonovy úlohy na Ω. Pak pro $x \in \Omega$ platí*

$$1 = -\int_{\partial\Omega} \nabla_y G(x, y) \cdot \nu(y) \, dS(y).$$

Věta 6.10. *Buď $R > 0$, $\Omega = U(0,R)$. Greenova funkce Laplaceovy-Poissonovy úlohy na Ω je definována předpisem*

$$G(x,y) = \frac{1}{(d-2)d\alpha_d}\left[|y-x|^{2-d} - \left(\frac{|x|}{R}\right)^{2-d}|y - \frac{R^2}{|x|}x|^{2-d}\right] \quad \text{pro } x,y \in \Omega.$$

Navíc platí

$$-\nabla_y G(x,y)\cdot\nu(y) = \frac{1}{R}\frac{R^2-|x|^2}{|x-y|^d}.$$

Věta 6.11. *Buď $R > 0$, $g \in C(\partial U(0,R))$. Definujme*

$$u(x) = \begin{cases} g(x), & \text{pro } x \in \partial U(0,R), \\ \frac{1}{d\alpha_d}\frac{1}{R}\int_{\partial U(0,R)} g(y)\frac{R^2-|x|^2}{|x-y|^d}\, dS(y), & \text{pro } x \in U(0,R). \end{cases}$$

Pak je u klasické řešení Dirichletovy úlohy pro Laplaceovu Poissonovu rovnici s daty g a $f = 0$ v $U(0,R)$.

3 Cvičení

Poslední změna: 12.01.2024 16:01:59

1 První cvičení (6.10.2023)

Řešení jednoduchých PDR Najděte obecná hladká řešení následujících rovnic. Hledáme $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$. 1) $\partial_1 u = 0$, 2) $\partial_1\partial_2 u = 0$, 3) $\partial_1^2 u = 0$, 4) $\partial_1^2 u + u = 0$.

Hádání řešení Ověřte, že dané funkce řeší zadanou PDR. Určete, na které oblasti. 1) $x \in \mathbb{R}^d$, $u(x) = |x|^{2-d}$ řeší $\Delta u = 0$, 2) $x \in \mathbb{R}^d$, $t \in \mathbb{R}$, $u(t,x) = t^{-d/2}\exp(-|x|^2/4t)$ řeší $\partial_t u - \Delta_x u = 0$, 3) $(x,y) \in \mathbb{R}^2$, $t \in \mathbb{R}$, $u(t,x,y) = (t^2 - x^2 - y^2)^{-1/2}$ řeší $\partial_t^2 u - \Delta_x u = 0$.

Hledání řešení ve tvaru Taylorovy řady Buď $a \in \mathbb{R}$, $u_0 : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$. Hledejte $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ řešení $\partial_t u + a\partial_x u = 0$ s počáteční podmínkou $u(0,x) = u_0(x)$ ve tvaru

$$u(t,x) = \sum_{k=0}^{+\infty}\sum_{j=0}^{+\infty} a_{kj} t^k x^j,$$

kde $a_{kj} \in \mathbb{R}$ pro $j,k \in \mathbb{N}_0$. Řešení.

Hledání řešení ve tvaru Fourierovy řady Buď $a \in \mathbb{R}$, $u_0 : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ 2π periodická funkce. Hledejte $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ řešení $\partial_t u + a\partial_x u = 0$ s počáteční podmínkou $u(0,x) = u_0(x)$ ve tvaru

$$u(t,x) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} c_k(t)\cos(kx) + d_k(t)\sin(kx),$$

kde $c_k, d_k, c_0 \in \mathbb{R}$ pro $k \in \mathbb{N}$. Řešení.

2 Druhé cvičení - homogenní lineární rovnice prvního řádu (13.10.2023)

Lineární homogenní rovnice Pro následující rovnice najděte obecná řešení a řešení zadaného Cauchyova problému.

1. Najděte $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ řešící $\partial_x u - 6x^2 \partial_y u = 0$ s počáteční podmínkou $u(x,0) = u_0(x)$ pro danou funkci u_0. Řešení.
2. Najděte $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ řešící $\partial_x u + y\partial_y u = 0$, $u(0,y) = \frac{1}{y}$.
3. Najděte $u : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}$, $u = u(x,y,z)$ řešící $(z+y-x)\partial_x u + (z+x-y)\partial_y u + z\partial_z u = 0$ s počáteční okrajovou podmínkou $u(x,y,1) = u_0(x,y)$ pro danou funkci u_0. Řešení.
4. Buď $u_0 \in C^\infty(\mathbb{R})$. Uvažme úlohu $x\partial_x u + (x+y)\partial_y u = 0$ pro neznámou funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ s počáteční podmínkou $u(x,0) = u_0(x)$ pro $x \in \mathbb{R}$. a) Najděte řešení zadané úlohy na jistém okolí bodu $(1,0)$. b) Pro která u_0 existují C^1 řešení úlohy s počáteční podmínkou $u(x,0) = u_0(x)$ na jistém okolí bodu $(0,0)$?
5. Buď $u_0 \in C^\infty(\mathbb{R})$. Uvažme úlohu $x^2\partial_x u + xy\partial_y u = 0$ pro neznámou funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$. a) Najděte řešení zadané úlohy s počáteční podmínkou $u(x,1) = u_0(x)$ pro $x \in \mathbb{R}$ na jistém okolí bodu $(1,1)$. b) Pro která u_0 existují C^1 řešení úlohy s počáteční podmínkou $u(x,0) = u_0(x)$ na jistém okolí bodu $(1,0)$?
6. Buď $u_0 \in C^\infty(\mathbb{R})$. Uvažme úlohu $(3x+4y)\partial_x u + (4x-3y)\partial_y u = 0$ pro neznámou funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$. Najděte řešení zadané úlohy s počáteční podmínkou $u(x,0) = u_0(x)$ pro $x \in \mathbb{R}$ na jistém okolí bodu $(1,0)$.
7. Buď $u_0 \in C^\infty(\mathbb{R})$. Uvažme úlohu $y\partial_x u - x\partial_y u = 0$ pro neznámou funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$. Najděte řešení zadané úlohy s počáteční podmínkou $u(x,0) = u_0(x)$ pro $x \in \mathbb{R}$ na jistém okolí bodu $(1,0)$. Pro jaké hladké funkce u_0 existuje řešení na jistém okolí bodu $(0,0)$?
8. Buď $u_0 \in C^\infty(\mathbb{R})$. Uvažme úlohu $x\partial_x u + \lg(x)\partial_y u = 0$ pro neznámou funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$. Najděte řešení zadané úlohy s počáteční podmínkou $u(x,0) = u_0(x)$ pro $x \in \mathbb{R}$ na jistém okolí bodu $(2,0)$.

3 Třetí cvičení - lineární a kvazilineární rovnice prvního řádu

Lineární rovnice s nenulovou pravou stranou-Cauchyova úloha

1. Najděte $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $u = u(t,x)$ řešící $\partial_t u + x\partial_x u + tu = 0$, $u(x,0) = \sin x$. Řešení.
2. Pro danou funkci $f \in C^1(\mathbb{R}^2)$ a $c \in \mathbb{R}$ najděte funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $u = u(t,x)$, řešení úlohy $\partial_t u + c\partial_x u = f$, $u(0,x) = 0$ na okolí bodu $(0,0)$.
3. Najděte $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $u = u(x,y)$ řešící $x\partial_x u + \partial_y u = y$, $u(x,0) = x^2$. Řešení.
4. Najděte $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $u = u(x,y)$ řešící $2\partial_x u + 5\partial_y u + 6u = 0$, $u(x,0) = x\cos(x)$. Řešení.
5. Najděte $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $u = u(x,y)$ řešící $\partial_x u - \partial_x u = u^2$, $u(x, 2x-1) = 4$.
6. Dokažte, že neexistuje žádné klasické řešení Cauhyovy úlohy: Najděte funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $u = u(x,y)$ řešící $2\partial_x u + 3\partial_y u + 8u = 0$, $u(x, (3x-1)/2) = e^x$. Řešení.
7. Najděte obecné řešení $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $u = u(x,y)$ diferenciální rovnice $2\partial_x u + 3\partial_y u + 8u = 0$. Řešení.
8. Najděte obecné řešení $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $u = u(x,y)$ diferenciální rovnice $x\partial_x u - y\partial_y u = u$. Řešení.

Kvazilineární rovnice 1) Najděte $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $u = u(t,x)$ řešící $\partial_t u + u\partial_x u = 0$, $u(x,0) = u_0(x)$ pro danou funkci u_0. Řešení.

4 Čtvrté cvičení - kanonický tvar rovnice druhého řádu

Cvičení. 1. Uvažujte lineární PDR druhého řádu v kanonickém tvaru (vzhledem k nejvyšším derivacím), tedy rovnici pro $u = u(y)$,

$$\sum_{k=1}^{d} \alpha_k(y) \frac{\partial^2 u}{\partial y_k^2} + \sum_{k=1}^{d} \beta_k(y) \frac{\partial u}{\partial y_k} + c(y)\, u = f(y)\,, \qquad \text{kde } \alpha_k(y) \in \{-1, 1, 0\}\,. \tag{4.1}$$

Ukažte, že v každém bodě y lze provést tyto úvahy:

(a) Pokud existuje takový index j, že $\alpha_j \neq 0$, $\beta_j \neq 0$, potom zavedení nové funkce $v = v(y)$ substitucí $u = v\, e^{-\frac{\beta_j y_j}{2\alpha_j}}$ (přes stejné indexy nesčítáme, jde o ono konkrétní j) způsobí, že:

- v rovnici pro v nebude člen, odpovídající β_j (odpovídající koeficient bude nulový)
- všechny koeficienty u členů druhého řádu zůstanou beze změny a všechny zbylé koeficienty u členů prvého řádu (s výjimkou výše zmíněného) zůstanou rovněž beze změny

Ta dvojka ve jmenovateli zlomku v exponenciele není překlep. Sledujte její roli při výpočtu.

(b) Pokud existuje takový index j, že $\alpha_j = 0$, $\beta_j \neq 0$, potom zavedení nové funkce $v = v(y)$ substitucí $u = v\, e^{-\frac{c y_j}{\beta_j}}$ (přes stejné indexy nesčítáme, jde o ono konkrétní j) způsobí, že:

- v rovnici pro v nebude absolutní člen, tj. člen odpovídající nulté derivaci (koeficientu c)
- všechny koeficienty u členů druhého i prvního řádu zůstanou beze změny

2. Pomocí výše uvedených dvou substitucí ukažte, že každou lineární PDR 2. řádu s konstantními koeficienty lze vhodnými substitucemi převést na jeden z následujících typů:

- Eliptickou rovnici na $-\Delta u + ku = f$. Pro $k = 0$ jde o tzv. Laplace-Poissonovu rovnici, pro $k \neq 0$ o rovnici Helmholtzova typu. Koeficient k, je-li nenulový, obecně nelze „vynulovat".
- Parabolickou rovnici na $\frac{\partial u}{\partial t} - a^2 \Delta u = f$, tj. na rovnici vedení tepla. Všechny parabolické lineární PDR 2. řádu s konstantními koeficienty jsou tedy nějakou rovnicí vedení tepla.
- Hyperbolickou rovnici na $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - a^2 \Delta u + ku = f$, tj. na vlnovou rovnici. Koeficient k, je-li nenulový, obecně nelze „vynulovat".

3. Určete typ rovnice, převeďte na kanonický tvar, případně převeďte na jednu z rovnic z předchozího bodu, případně se pokuste vyřešit, pokud se po převedení dostanete na „řešitelný typ" rovnice.

(a) $u_{xx} + 2u_{xy} + 2u_{yy} + 4u_{yz} + 5u_{zz} + u_x + u_y = 0$

(b) $u_{xx} + 4u_{xy} + 8u_{yy} + u_x + u_y = 0$

(c) $u_{xx} + 4u_{xy} + 4u_{yy} - u_x - 2u_y = 0$

(d) $u_{xx} - 2u_{xy} - 3u_{yy} + u_y = 0$

(e) $4u_{xy} - 3u_{yy} + 4u_x - 8u_y - 5u = 0$, řešte obecně a poté s podmínkami $u(x, 0) = e^{\frac{x}{2}}$, $u_y(x, 0) = 0$. Řešení.

Řešení těchto příkladů je dole (4).

Kanonický tvar rovnic 2. řádu s konstantními koeficienty Určete typ rovnice. Převeďte rovnici na tvar, který neobsahuje smíšené druhé parciální derivace. Je-li to možné odstraňte z rovnice první derivace. 1) $\partial_1^2 u - 2\partial_1\partial_2 u + \partial_2 u = 0$ 2) $\partial_1^2 u + 4\partial_1\partial_2 u + 8\partial_2^2 u + \partial_1 u + 2\partial_2 u = 0$ 3) $\partial_1^2 u + 2\partial_1\partial_2 u + 2\partial_2^2 u + 4\partial_2\partial_3 u + 5\partial_3^2 u + \partial_1 u + \partial_2 u = 0$

Cvičení. *Uvažujte lineární PDR druhého řádu s konstantními koeficienty, v $\mathbb{R}^2$, tedy rovnici typu*

$$a\partial_x^2 u + b\partial_x\partial_y u + c\partial_y^2 u = f\,, \qquad |a| + |b| + |c| > 0. \tag{4.2}$$

Ukažte, že platí:

- (4.2) *je eliptická* $\iff$ $b^2 - 4ac < 0$;
- (4.2) *je parabolická v širším slova smyslu* $\iff$ $b^2 - 4ac = 0$;
- (4.2) *je hyperbolická* $\iff$ $b^2 - 4ac > 0$.

Řešení.

Řešení příkladů Řešení příkladu 3a. Po provedení substituce $\xi = x$, $\eta = y - x$, $\chi = 2x - 2y + z$ s následným zavedením nové funkce předpisem $u = ve^{-\xi/2}$ dostaneme rovnici $\Delta v = \frac{1}{4}v$. Jde o eliptickou rovnici (Helmholtzova typu). Řešení příkladu 3b. Po provedení substituce $\xi = x$, $\eta = \frac{y}{2} - x$ s následným zavedením nové funkce předpisem $u = ve^{-\xi/2+\eta/4}$ dostaneme eliptickou rovnici (Helmholtzova typu) $v_{\xi\xi} + v_{\eta\eta} = \frac{5}{16}v$. Řešení příkladu 3c. Po provedení substituce $\xi = x$, $\eta = y - 2x$ dostaneme parabolickou rovnici $u_\eta - u_{\xi\xi} = 0$. Řešení příkladu 3d. Po provedení substituce $\xi = x$, $\eta = \frac{x}{2} + \frac{y}{2}$ s následným zavedením nové funkce předpisem $u = ve^{\eta/4}$ dostaneme hyperbolickou rovnici $v_{\xi\xi} - v_{\eta\eta} = \frac{3}{16}v$. Řešení příkladu 3e. Po provedení substituce $\xi = x + y$, $\eta = x + 2y$ s následným zavedením nové funkce předpisem $u = ve^{2\xi - \frac{3}{2}\eta}$ dostaneme hyperbolickou rovnici $v_{\xi\xi} - 4v_{\eta\eta} = 0$. Její obecné řešení je $v(\xi, \eta) = f(\eta - 2\xi) + g(\eta + 2\xi)$, tedy $u(x, y) = e^{\frac{x}{2} - y}\big(f(x) + g(3x + 4y)\big)$. Okrajové podmínky dají $u(x, y) = e^{\frac{x}{2} - y}(1 + y)$.

5 Páté cvičení

Kanonický tvar rovnic 2. řádu s nekonstantními koeficienty na okolí bodu Výše jsme definovali typ diferenciální rovnice druhého řádu v pevném bodě. Je jistě zajímavé vědět, jestli lze rovnici na kanonický tvar převést na okolí daného bodu. To je jistě pravda, pokud se jedná o rovnici s konstantními koeficienty. Pokud jsou však koeficienty nekonstantní, obecně to není možné. Ukážeme si nyní, že odpověď je pozitivní pro diferenciální rovnici v $\mathbb{R}^2$.

Uvažme proto rovnici tvaru

$$a_{11}\partial_x^2 u + 2a_{12}\partial_x\partial_y u + a_{22}\partial_y^2 u + b(\partial_x u, \partial_y u, u, x, y) = 0, \tag{5.1}$$

pro neznámou funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$. Funkce a_{11}, a_{12}, a_{22} jsou zadané a závisí na x, y. Budeme předpokládat, že na okolí jistého bodu (x_0, y_0) platí $a_{11} \neq 0$. .

Uvažujme transformaci proměnných $\xi = \varphi(x, y)$, $\eta = \psi(x, y)$, která je prostá a dvakrát spojitě diferencovatelná. Navíc předpokládáme, že determinant Jacobiho matice této transformace je nenulový. Nechť $U = U(\xi, \eta)$ je funkce $u = u(x, y)$ vyjádřená v nových proměnných, tj. platí vztah

$$u(x, y) = U(\varphi(x, y), \psi(x, y)) .$$

Tedy

$$\begin{aligned}
u_x &= U_\xi\, \varphi_x + U_\eta\, \psi_x\,, \\
u_y &= U_\xi\, \varphi_y + U_\eta\, \psi_y\,, \\
u_{xx} &= U_{\xi\xi}\, \varphi_x^2 + 2\, U_{\xi\eta}\, \varphi_x\, \psi_x + U_{\eta\eta}\, \psi_x^2 + U_\xi\, \varphi_{xx} + U_\eta\, \psi_{xx}\,, \\
u_{xy} &= U_{\xi\xi}\, \varphi_x\, \varphi_y + U_{\xi\eta}\, (\varphi_x\, \psi_y + \varphi_y\, \psi_x) + U_{\eta\eta}\, \psi_x\, \psi_y + U_\xi\, \varphi_{xy} + U_\eta\, \psi_{xy}\,, \\
u_{yy} &= U_{\xi\xi}\, \varphi_y^2 + 2\, U_{\xi\eta}\, \varphi_y\, \psi_y + U_{\eta\eta}\, \psi_y^2 + U_\xi\, \varphi_{yy} + U_\eta\, \psi_{yy}\,,
\end{aligned}$$

z čehož plyne

$$\bar{a}_{11}\, U_{\xi\xi} + 2\, \bar{a}_{12}\, U_{\xi\eta} + \bar{a}_{22}\, U_{\eta\eta} + \bar{b} = 0\,,$$

kde

$$\begin{aligned}
\bar{a}_{11} &= a_{11}\,\varphi_x^2 + 2\,a_{12}\,\varphi_x\,\varphi_y + a_{22}\,\varphi_y^2\,,\\
\bar{a}_{12} &= a_{11}\,\varphi_x\,\psi_x + a_{12}\,(\varphi_x\,\psi_y + \varphi_y\,\psi_x) + a_{22}\,\varphi_y\,\psi_y\,,\\
\bar{a}_{22} &= a_{11}\,\psi_x^2 + 2\,a_{12}\,\psi_x\,\psi_y + a_{22}\,\psi_y^2\,,\\
\bar{b} &= \bar{b}(\xi,\eta,U,U_\xi,U_\eta)\,.
\end{aligned} \tag{5.2}$$

Pokud byla výchozí rovnice lineární, pak transformovaná rovnice je též lineární.

Cílem provedené transformace je původní rovnici zjednodušit, a tudíž nás zajímá, za jakých podmínek je některý z koeficientů $\bar{a}_{11},\ \bar{a}_{12},\ \bar{a}_{22}$ nulový.

Hyperbolický případ V tomto odstavci budeme předpokládat, že rovnice (5.1) je hyperbolická na okolí bodu (x_0, y_0) a tedy zde platí $0 < a_{12}^2 - a_{22}a_{11}$. Chceme volit φ, ψ tak, aby se nulovaly koeficienty $\bar{a}_{11}$, $\bar{a}_{22}$. Proto chceme přepsat $\bar{a}_{11}$ do tvaru

$$\bar{a}_{11} = a_{11}(\partial_x\varphi + \beta\partial_y\varphi)(\partial_x\varphi + \delta\partial_y\varphi).$$

Požadujeme tedy, aby $\beta\delta = a_{22}/a_{11}$ a $\beta + \delta = 2a_{12}/a_{11}$. Tato soustava má reálná řešení, pokud $0 < a_{12}^2 - a_{22}a_{11}$. Tato podmínka je splněna díky předpokladu. Dostáváme, že β, δ jsou určeny jednoznačně až na jejich záměnu a

$$\beta = \frac{1}{a_{11}}(a_{12} + \sqrt{a_{12}^2 - a_{22}a_{11}}), \quad \delta = \frac{1}{a_{11}}(a_{12} - \sqrt{a_{12}^2 - a_{22}a_{11}}).$$

Najdeme φ jako C^1 řešení lineární diferenciální rovnice 1. řádu $\partial_x\varphi + \beta\partial_y\varphi = 0$ a ψ jako C^1 řešení $\partial_x\psi + \beta\partial_y\psi = 0$ na jistém okolí U bodu (x_0, y_0)pomocí Lemmatu 2.3. V U platí $\nabla\varphi \perp (1,\beta)$ a $\nabla\psi \perp (1,\delta)$. Platí tedy, že hodnost matice $\nabla(\varphi,\psi)$ je rovna 2 a zobrazení $(\varphi,\psi) : U \to \mathbb{R}^2$ je regulární. Podle [Pick et al., 2019, Věta 11.6.2] můžeme předpokládat, případně po zmenšení U, že $V := (\varphi,\psi)(U)$ je otevřená a (φ,ψ) je na U difeomorfismus. Po použití transformace (φ,ψ) na (5.1) na U, dostaneme na V rovnici

$$2\bar{a}_{12}\partial_\xi\partial_\eta U + \bar{b} = 0.$$

Funkce $\bar{a}_{12}$ a $\bar{b}$ jsou definovány v (5.2).

Parabolický případ Je potřeba dodělat. Zatím je ho možné najít v knize [Pinchover and Rubinstein, 2005, Section 3.4].

Elliptický případ Vyžaduje funkce komplexní proměnné a holomorfní funkce a nebudeme ho zde studovat. Je zpracován například v knize [Pinchover and Rubinstein, 2005, Section 3.5].

V následujícím seznamu je $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $u = u(x, y)$.

1. Najděte kanonický tvar Tricomiho rovnice $\partial_x^2 u + x\partial_y^2 u = 0$ na oblasti, kde je hyperbolická, tj. $x < 0$. Řešení.
2. Na oblasti $\{(x,y) \in \mathbb{R}^2; x > 0 \wedge y > 0\}$ najděte kanonický tvar rovnice $y^2\partial_x^2 u - x^2\partial_y^2 u = 0$. Řešení.
3. Uvažte rovnici $y^5\partial_x^2 u - y\partial_y^2 u + 2\partial_y u = 0$ na oblasti $\{(x,y) \in \mathbb{R}^2; y > 0\}$.
    (a) Najděte kanonický tvar rovnice.
    (b) Najděte obecné řešení rovnice.
    (c) Najděte řešení splňující počáteční podmínky $u(0,y) = 8y^3$ a $\partial_x u(0,y) = 6$ pro $y > 0$.

    Řešení.

4. Uvažte rovnici $4y^2\partial_x^2 u + 2(1-y^2)\partial_x\partial_y u - \partial_y^2 u - \frac{2y}{1+y^2}(2\partial_x u - \partial_y u) = 0$ na $\mathbb{R}^2$.

   (a) Najděte kanonický tvar rovnice.

   (b) Najděte obecné řešení rovnice.

   (c) Najděte řešení splňující počáteční podmínky $u(x,0) = g(x)$ a $\partial_y u(x,0) = f(x)$ pro dané funkce $f, g \in C^2(\mathbb{R})$.

   Řešení.

Příklady 3 a 4 jsou z [Pinchover and Rubinstein, 2005, Section 3.6]

A další sada příkladů pro vaše samostatné počítání: v každé oblasti, kde je rovnice hyperbolická nebo parabolická, najděte její kanonický tvar. (Tyto příklady jsem nepřepočítal. Nevím, jestli to je dopočítatelné.)

1. $u_{xx} - 2\sin x\, u_{xy} + (2-\cos^2 x)\, u_{yy} = 0$
2. $x^2 u_{xx} - 2x u_{xy} + u_{yy} = 0$
3. $y u_{xx} - x u_{xy} = 0$

6 6. cvičení - Vlnová rovnice - zrcadlení

Příklady řešení 1d vlnové rovnice v programu Mathematica.

Věta (Věta 4.2). *Buď $0 < T \le +\infty$, $u_0 \in C^2(\mathbb{R})$, $u_1 \in C^1(\mathbb{R})$, $f, \partial_x f \in C([0,T)\times\mathbb{R})$. Definujme pro $t \in (0,T)$, $x \in \mathbb{R}$*

$$u(t,x) := \frac{1}{2}(u_0(x+ct) + u_0(x-ct)) + \frac{1}{2c}\int_{x-ct}^{x+ct} u_1(\xi)d\xi + \frac{1}{2c}\int_0^t \int_{x-c(t-\tau)}^{x+c(t-\tau)} f(\tau,\xi)d\xi d\tau.$$

(pokud je $f = 0$ nazývá se d'Alembertova formule)

Pak platí: 1) $u \in C^2([0,T)\times\mathbb{R})$, 2) $\partial_t^2 u - c^2\partial_x^2 u = f$ in $(0,T)\times\mathbb{R}$, 3) $u = u_0$, $\partial_t u = u_1$ v $\{0\}\times\mathbb{R}$.

Cvičení. *Vyjádřete řešení z předchozí věty pro případ $u_0 = 0$ a $f = 0$ pomocí pevné primitivní funkce k u_1.*

Cvičení. *Buď $c > 0$, $u_0, u_1 : (0,+\infty) \to \mathbb{R}$, $f : (0,+\infty)^2 \to \mathbb{R}$. Najděte řešení následující úlohy. Hledáme $u : (0,+\infty)^2 \to \mathbb{R}$, které splňuje 1) $u \in C^2([0,+\infty)^2)$, 2) $\partial_t^2 u - c^2\partial_x^2 u = f$ in $(0,+\infty)^2$, 3) $u = u_0$, $\partial_t u = u_1$ v $\{0\}\times[0,+\infty)$, 4) $\partial_x u = 0$ v $[0,+\infty)\times\{0\}$. Součástí řešení je volba prostorů funkcí pro data úlohy i vyjádření explicitní formule pro řešení.*

Cvičení. *Dokažte následující větu.*

Věta Cv0.1. *Nechť $0 < T \le +\infty$, $l > 0$, $f, \partial_x f \in C([0,T)\times[0,l])$, $u_0 \in C^2([0,l])$, $u_1 \in C^1([0,l])$ a platí pro $t \in [0,T)$*

$$f(t,0) = f(t,l) = u_0(0) = u_0(l) = u_1(0) = u_1(l) = u_0''(0) = u_0''(l) = 0.$$

Ať jsou $\tilde{u}_0$, $\tilde{u}_1$ $2l$-periodická rozšíření u_0, u_1 na $\mathbb{R}$ lichá vzhledem k bodu 0 a $\tilde{f}$ je $2l$-periodické rozšíření, liché vzhledem k bodu 0 v proměnné x. Definujeme

$$u(t,x) = \frac{1}{2}\left[\tilde{u}_0(x-ct) + \tilde{u}_0(x+ct)\right] + \frac{1}{2c}\int_{x-ct}^{x+ct} \tilde{u}_1(s)ds + \frac{1}{2c}\int_0^t \int_{x-c(t-\tau)}^{x+c(t-\tau)} \tilde{f}(\tau,\xi)d\xi d\tau.$$

Pak funkce u splňuje 1) $u \in C^2([0,T)\times[0,l])$, 2) $\partial_t^2 u - c^2\partial_x^2 u = f$ v $(0,T)\times(0,l)$, 3) $u = u_0$, $\partial_t u = u_1$ v $\{0\}\times[0,l]$, 4) $u = 0$ v $(0,\infty)\times\{0,l\}$.

Cvičení. *Vyjádřete řešení z předchozí věty jen pomocí funkcí u_0, u_1, f na množině $(0, 2l/c)\times(0,l)$.*

d'Alembertova formule Pomocí d'Alembertovy formule najděte řešení úlohy $\partial_1^2 u - \partial_2^2 u = f$ na $(0,+\infty)\times\mathbb{R}$, $u(0,\cdot) = u_0$, $\partial_1 u(0,\cdot) = u_1$ na $\mathbb{R}$ s následujícími daty. 1) $f = 0$, $u_1 = 0$, $u_0 = \phi$, 2) $f = 0$, $u_1 = 0$, $u_0 = \phi$, 3) $f(t,x) = \phi(x)$ pro $t \in (0,+\infty)$, $x \in \mathbb{R}$, $u_1 = 0$, $u_0 = 0$. Uvažujte postupně funkce $\phi = \sin$ a $\phi = \sin^3 \chi_{(2\pi,3\pi)}$.

Vlnová rovnice na poloprostoru Řešte předchozí úlohu na poloprostoru $(0,+\infty)^2$ s okrajovou podmínkou $u(t,0) = 0$ nebo $\partial_2 u(t,0) = 0$ pro $t > 0$.

7 7. cvičení - Vlnová rovnice - Fourierova metoda

1. a) Řešte Fourierovou metodou úlohu $\partial_t^2 u - c^2 \partial_x^2 u = 0$ pro $(t,x) \in (0,+\infty)\times(0,l) =: \Omega$, $u(0,x) = u_0(x)$, $u_t(0,x) = u_1(x)$ pro $x \in (0,l)$, $u(t,0) = 0$, $\partial_x u(t,l) = 0$ pro $t \in (0,+\infty)$. Určete, za jakých předpokladů na funkce u_0 a u_1 Fourierova řada stejnoměrně konverguje ke klasickému řešení, a sečtěte ji. Jaké jsou nutné a postačující podmínky pro existenci klasického řešení?

b) Pomocí Duhamelova principu řešte úlohu $\partial_t^2 u - c^2 \partial_x^2 u = f$ pro $(t,x) \in \mathbb{R}\times(0,l)$, $u(0,x) = 0$, $\partial_t u(0,x) = 0$ pro $x \in (0,l)$, $u(t,0) = 0$, $\partial_x u(t,l) = 0$ pro $t > 0$. Jaké jsou postačující podmínky na funkci f pro existenci klasického řešení?

c) Řešte úlohu $\partial_t^2 u - c^2 \partial_x^2 u = 0$ pro $(t,x) \in \mathbb{R}\times(0,l)$, $u(0,x) = 0$, $\partial_t u(0,x) = 0$ pro $x \in (0,l)$, $u(t,0) = \alpha(t)$, $\partial_x u(t,l) = \beta(t)$ pro $t > 0$. Jaké jsou postačující podmínky na funkce α a β pro existenci klasického řešení?

Řešení.

2. Buď $c > 0$, $u_0, u_1, g : (0,+\infty) \to \mathbb{R}$, $f : (0,+\infty)^2 \to \mathbb{R}$. Najděte řešení následující úlohy. Hledáme $u : (0,+\infty)^2 \to \mathbb{R}$, které splňuje 1) $u \in C^2([0,+\infty)^2)$, 2) $\partial_t^2 u - c^2 \partial_x^2 u = f$ in $(0,+\infty)^2$, 3) $u = u_0$, $\partial_t u = u_1$ v $\{0\}\times[0,+\infty)$, 4) $u = g$ v $[0,+\infty)\times\{0\}$. Součástí řešení je volba prostorů funkcí pro data úlohy i vyjádření explicitní formule pro řešení.

8 8. cvičení - Vlnová rovnice - Fourierova metoda - 2D

3. Pomocí Fourierovy metody nalezněte kandidáta na řešení úlohy $\partial_t^2 u - \Delta u = 0$ pro $(t,x) \in \mathbb{R}\times\Omega$, kde $(0,\pi)^2 =: \Omega$, $u(0,x) = u_0(x)$, $u_t(0,x) = u_1(x)$ pro $x \in (0,\pi)^2$, $u(t,x) = 0$ pro $(t,x) \in (0,+\infty)\times\partial\Omega$. Najděte řešení pro $u_0(x,y) = \sin^3(x)\sin^3(y)$ a $u_1 = 0$.

Navrhněte podmínky na data, které zajistí regularitu řešení.

Odůvodněte, že množina, do které rozvíjíte řešení, tvoří bázi $L^2((0,\pi)^2)$.

Řešení.

Vizualizace řešení v programu Mathematica.

9 9. cvičení - vlnová rovnice 2d a 3d

4. Odvoďte pomocí Duhamelova principu řešení vlnové rovnice s nenulovou pravou stranou z následující věty

Věta Cv0.1. *Buď $d \in \{2,3\}$, $T > 0$, $f \in C^2([0,T) \times \mathbb{R}^d)$. Pak funkce definovaná pro $t \in (0,T)$, $x \in \mathbb{R}^d$ předpisem*

$$u(t,x) = \frac{1}{2}\int_0^t \int_{x-(t-\tau)}^{x+(t-\tau)} f(\tau,\xi)\,\mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\tau \quad \textit{pro } d = 1,$$

$$u(t,x) = \frac{1}{2\pi}\int_0^t \int_{U(x,t-\tau)} \frac{f(\tau,\xi)}{\sqrt{(t-\tau)^2 - |x-\xi|^2}}\,\mathrm{d}\lambda^2(\xi)\,\mathrm{d}\tau \quad \textit{pro } d = 2,$$

$$u(t,x) = \frac{1}{4\pi}\int_{U(x,t)} \frac{f(t-|x-\xi|,\xi)}{|x-\xi|}\,\mathrm{d}\lambda^3(\xi) \quad \textit{pro } d = 3,$$

splňuje

1. $u \in C^2([0,T) \times \mathbb{R}^d)$,
2. $\partial_t^2 u - \Delta u = f$ *v* $(0,T) \times \mathbb{R}^d$,
3. $u = 0$, $\partial_t u = 0$ *v* $\{0\} \times \mathbb{R}^d$.

5. Buď $d = 3$ a $u_0 = u_0(|x|^2)$, $u_1 = u_1(|x|^2)$. Dokažte, že řešení vlnové rovnice v $\mathbb{R}^3$ bude opět záviset pouze na $|x|$ a spočtěte ho.

Vizualizace řešení v programu Mathematica.

6. Dokažte: Je-li $T > 0$, $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ s C^1 hranicí, $u \in C^2([0,T] \times \Omega)$, $\partial_t^2 u - \Delta u = 0$ v $[0,T] \times \Omega$, $u = 0$ v $[0,T] \times \partial\Omega$, $u = 0$, $\partial_t u = 0$ v $\{0\} \times \Omega$, je $u = 0$ v $[0,T] \times \overline{\Omega}$.

10 10. cvičení - zápočtová písemka

Zápočtová písemka.

11 11-té cvičení

7. Ověřte tvrzení o Tichonovově protipříkladu z knihy [Krylov, 1996].

Remark 8.1.24. Widder's theorem says that any *nonnegative* function which is continuous in $[0,\infty) \times \mathbb{R}$ and equals zero for $t = 0$ and satisfies the heat equation $u_{xx} - u_t = 0$ in $(0,\infty) \times \mathbb{R}$ is identically zero.

Tychonoff's example shows that the assumption on sign of u is essential. Namely, the following function satisfies all the above requirements apart from positivity:

$$u(t,x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{g^{(k)}(t)}{(2k)!} x^{2k}, \quad g(t) = \exp(-t^{-2}) \quad t > 0, \quad g(0) = 0.$$

Speciálně ukažte, že funkce $u : (0,+\infty) \times \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ definovaná nahoře řeší rovnici vedení tepla $\partial_t u - \partial_x^2 u = 0$ na $(0,+\infty) \times \mathbb{R}$ s počáteční podmínkou $u(0,x) = 0$ pro $x \in \mathbb{R}$. Nápovědu je možné nalézt na mathoverflow nebo v článku [Ferretti, 2003].

Řešení.

8. a) Řešte Fourierovou metodou úlohu $\partial_t u - \partial_x^2 u = 0$ pro $(t,x) \in (0,+\infty) \times (0,\pi) =: \Omega$, $u(0,x) = u_0(x)$ pro $x \in (0,\pi)$, $u(t,0) = 0$, $\partial_x u(t,\pi) = 0$ pro $t \in (0,+\infty)$. Určete, za jakých předpokladů na funkci u_0 Fourierova řada stejnoměrně konverguje ke klasickému řešení, a sečtěte ji. Jaké jsou nutné a postačující podmínky pro existenci klasického řešení? Najděte řešení pro $u_0(x) = \sin^3(x)$.

b) Pomocí Duhamelova principu najděte kandidáta na řešení úlohy $\partial_t u - \partial_x^2 u = f$ pro $(t,x) \in \mathbb{R} \times (0,\pi)$, $u(0,x) = 0$ pro $x \in (0,\pi)$, $u(t,0) = 0$, $\partial_x u(t,\pi) = 0$ pro $t > 0$. Jaké jsou postačující podmínky na funkci f pro existenci klasického řešení?

Řešení.

9. Pomocí Fourierovy metody nalezněte kandidáta na řešení úlohy $\partial_t u - \Delta u = 0$ pro $(t,x) \in \mathbb{R} \times \Omega$, kde $(0,\pi)^2 =: \Omega$, $u(0,x,y) = u_0(x,y)$ pro $(x,y) \in (0,\pi)^2$, $u(t,x,y) = 0$ pro $(t,x,y) \in (0,+\infty) \times \partial\Omega$. Najděte řešení pro $u_0(x,y) = \sin^3(x)\sin^3(y)$.

Řešení.

Navrhněte podmínky na data, které zajistí regularitu řešení.

Vizualizace řešení v programu Mathematica.

12 12-té cvičení

10. Pomocí Fourierovy metody nalezněte kandidáta na řešení úlohy $-\Delta u = 0$ v $(0,\pi)^2 =: \Omega$ s okrajovou podmínkou $u = 0$ na $\partial\Omega \cap \{y > 0\}$, $u(x,0) = u_0(x)$ pro $x \in [0,\pi]$ a dané u_0. Diskutujte podmínky na u_0, aby nalezený kandidát byl skutečně řešení.

11. Řešte stejnou úlohu pro okrajovou podmínku $u = 0$ na $\partial\Omega \cap \{x > 0\}$, $u(0,y) = u_0(y)$ pro $y \in [0,\pi]$ a pro dané u_0.

12. Řešte stejnou úlohu pro okrajovou podmínku $u = u_0$ na $\partial\Omega$. Speciálně pro $u = 0$ na $\partial\Omega \cap \{xy > 0\}$, $u(0,y) = 1 + \sin^3(y) - y/\pi$ pro $y \in [0,\pi]$ a $u(x,0) = 1 + \sin^3(x) - x/\pi$ pro $x \in [0,\pi]$

13. Pomocí Fourierovy metody nalezněte kandidáta na řešení úlohy $-\Delta u = f$ v $(0,\pi)^2 =: \Omega$ s okrajovou podmínkou $u = 0$ na $\partial\Omega$.

Příklady jsou řešeny v poznámkách doc. Rokyty. Obrázky řešení v programu Mathematica jsou zde.

14. Najděte Hadamardův příklad špatně zadané úlohy. Řešte $-\Delta u = 0$ v $(0,+\infty) \times (0,\pi) =: \Omega$ s okrajovou podmínkou $u = 0$ na $\{y \in \{0,\pi\}\}$ a počáteční podmínkou $u = 0$ a $\partial u = \sin(ny)/n$ na $\{0\} \times (0,+\infty)$ pro $n \in \mathbb{N}$. Uvažte $u(1,\cdot)$.

15. Spočtěte objem jednotkové koule v $\mathbb{R}^d$ pomocí integrace funkce $\exp(-|x|^2)$ s využitím sférické Fubiniho věty.

13 Zbytky

Věta. *Věta Gaussova-Greenova-Ostrogradského Buď $\Omega \subset \mathbb{R}^d$, otevřená, $\partial\Omega \in C^1$, tj. až na otočení*

$$\forall x \in \partial\Omega, \exists r > 0, \gamma : \mathbb{R}^{d-1}, \gamma \in C^1(\mathbb{R}^{d-1}) : \Omega \cap U(x,r) = \{y \in U(x,r); y_n > \gamma(y_1, \ldots, y_{d-1}),$$

$F \in C^1(\overline{\Omega})$, $F : \overline{\Omega} \to \mathbb{R}$. Označme vnější normálu k Ω ν. Pak

$$\forall i \in \{1, \ldots, d\} : \int_\Omega \partial_i F = \int_{\partial\Omega} F \nu_i \,\mathrm{d}S.$$

Poznámka. *Takto je věta formulována v [Evans, 2010, Appendix C.2]. Poznámky o souvisloti uvedené věty s větou z Geometrie 2. Speciálně, diskuze kvalit Ω a F.*

Věta. *Sférická Fubiniho věta Buď $g : \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}$, $g \in L^1(\mathbb{R}^n)$. Pak*

$$\int_{\mathbb{R}^d} g = \int_0^{+\infty} (\int_{\partial U(x,r)} g \,\mathrm{d}S) \,\mathrm{d}r.$$

Poznámka. *Věta obecně plyne z* co-area *formule, viz [Evans, 2010, Appendix C.3]. Také se dá dokázat přímo z definice, což je jednoduché pro $d \in \{2, 3\}$, ale vyžaduje multipolání souřadnice ve vyšších dimenzích. To může být příliš technicky náročné.*

1) Pomocí Gaussovy-Greenovy-Ostrogradského věty aplikované na $F(x) = x$, $F : \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}^d$ určete vztah mezi objemem jednotkové koule a plochou jednotkové sféry v $\mathbb{R}^d$. Má vyjít $S^{d-1}(\partial U(0, r)) = dr^{d-1}\lambda^d(U(0, r))$. 2) Pomocí sférické Fubiniho věty aplikované na $F(x) = e^{-|x|^2}$, $F : \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}$ a předchozího příkladu spočtěte $\lambda^d(U(0, 1))$. 3) Dokažte

Lemma. *Buď $R > r > 0$, $x \in \mathbb{R}^d$, $u \in C(U(x, R))$. Pak*

$$\partial_r(\int_{U(x,r)} u \,\mathrm{d}\lambda^n) = \int_{\partial U(x,r)} u \,\mathrm{d}S \quad a \quad \fint_{\partial U(x,r)} u \,\mathrm{d}S = \fint_{\partial U(0,1)} u(x + rz) \,\mathrm{d}S(z).$$

. . . .

Příště něco z následujícího . . .

Značení, korektnost podle Hadamarda

Zde něco chybí.

13.1 26.11.

16. Buď $l > 0$, $u_0 : [0, l] \to \mathbb{R}$. Najděte pomocí Fourierovy metody rozdělení proměnných kandidáta na řešení problému

$$\partial_t u - \partial_x^2 u = 0, \qquad \text{v } (0, +\infty) \times (0, l), \tag{13.1}$$

$$u = u_0, \qquad \text{v } \{0\} \times [0, l], \tag{13.2}$$

$$u = 0, \qquad \text{v } [0, +\infty) \times \{0, l\}. \tag{13.3}$$

Ukažte, že, je-li $u_0 \in L^1(0, l)$, splňuje kandidát na řešení $u \in C^\infty((0, +\infty) \times [0, l])$. Ukažte, že kandidát splňuje rovnici (13.1) a (13.2).

Ukažte, že, je-li $u_0 \in C^1([0, l])$ a $u_0(0) = u_0(l) = 0$, je $u \in C([0, +\infty) \times [0, l])$ a platí rovnice (13.3).

13.2 3.12.

17. Rozmyslete si, že v úloze ze Sekce 13.1 je možné oslabit předpoklady na $u_0 \in C^{0,1}([0, l])$, $u_0(0) = u_0(l) = 0$. **18.** V úloze ze Sekce 13.1 položte $u_0(x) = \min(x, l-x)$ pro $x \in (0, l)$ a spočtěte řešení. **19.** V úloze ze Sekce 13.1 položte $l = \pi$ a $u_0(x) = \sin(x) + 3\sin(3x)$ pro $x \in (0, \pi)$ a spočtěte řešení.

20. Buď $f : (0,+\infty) \times (0,l) \to \mathbb{R}$. Najděte kandidáta na řešení problému

$$\begin{aligned} &\partial_t u - \partial_x^2 u = f, && \text{v } (0,+\infty) \times (0,l), && (13.4)\\ &u = 0, && \text{v } \{0\} \times [0,l], && (13.5)\\ &u = 0, && \text{v } [0,+\infty) \times \{0,l\}. && (13.6) \end{aligned}$$

Ukažte, že, je-li $f \in C^2([0,+\infty) \times [0,l]) \cap L^\infty([0,+\infty) \times [0,l])$, $f = f'' = 0$ v $[0,+\infty) \times \{0,l\}$, je $u \in C^2([0,+\infty) \times [0,l])$ a splňuje (13.4), (13.5) and (13.6).

21. Buď $u_0 : [0,+\infty) \to \mathbb{R}$, $f : (0,+\infty)^2 \to \mathbb{R}$. Najděte kandidáta na řešení problému

$$\begin{aligned} &\partial_t u - \partial_x^2 u = 0, && \text{v } (0,+\infty) \times (0,+\infty), && (13.7)\\ &u = u_0, && \text{v } \{0\} \times [0,+\infty], && (13.8)\\ &u = 0, && \text{v } [0,+\infty) \times \{0\}. && (13.9) \end{aligned}$$

Ukažte, že, je-li $u_0 \in L^1(0,+\infty)$ a $f = 0$, splňuje kandidát na řešení $u \in C^\infty((0,+\infty) \times [0,+\infty))$. Ukažte, že kandidát splňuje rovnici (13.7) a (13.8).

Ukažte, že, je-li $u_0 \in C^1([0,+\infty)) \cap L^\infty([0,+\infty))$, $f = 0$ a $u_0(0) = 0$, je $u \in C([0,+\infty) \times [0,+\infty))$ a platí rovnice (13.9).

Ukažte, že, je-li $u_0 = 0$ a $f \in C^2([0,+\infty)^2) \cap L^\infty([0,+\infty)^2)$, $f = f'' = 0$ v $[0,+\infty) \times \{0\}$, je $u \in C^2([0,+\infty)^2)$ a splňuje (13.7), (13.8) and (13.9).

13.3 Notace

22. Spočtěte Δu a $D(\Delta u)$, je-li $u(x) = |x|^{2-d}$ pro $x \in \mathbb{R}^d$, $d > 2$. Spočtěte Δu a $D(\Delta u)$, je-li $u(x) = \lg(|x|)$ pro $x \in \mathbb{R}^d$, $d = 2$

Výsledek:

$D(\Delta u) = D(u) = \mathbb{R}^d \setminus \{0\}$, $\Delta u = 0$

23. Spočtěte $\partial_t u - \Delta u$ a $D(\partial_t - \Delta u)$, je-li $u(t,x) = (4t)^{-d/2} \exp(-|x|^2/4t)$ pro $x \in \mathbb{R}^d$ a $t > 0$.

Výsledek:

$\partial_t u - \Delta u = 0$ pro $x \in \mathbb{R}^d$ a $t > 0$.

24. Spočtěte $\partial_t^2 u - \Delta u$, je-li $u(t,x) = \chi_{(0,+\infty)}(ct - |x|)/\sqrt{(ct)^2 - |x|^2}$ pro $x \in \mathbb{R}^2$ a $t > 0$.

Výsledek:

$D(\partial_t^2 u - \Delta u) = (0,+\infty) \times \mathbb{R}^2 \setminus \{(t,x) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^2; ct = |x|\}$, $\partial_t^2 u - \Delta u = 0$.

13.4 Korektnost podle Hadamarda

25. Buď $c \in \mathbb{R}$. Ukažte, že $u(t,x) := ct$ pro $t, x \in \mathbb{R}$ řeší úlohu $\partial_t^2 u \pm \partial_x^2 u = 0$ s počáteční podmínkou $u(0,x) = 0$ pro $x \in \mathbb{R}$.

26. Buď $n \in \mathbb{N}$. Ukažte, že $u(t,x) := \exp(-\sqrt{n}) \cos(nx) \sinh(nt)/n$ pro $t, x \in \mathbb{R}$ řeší úlohu $\partial_t^2 u + \partial_x^2 u = 0$ s počáteční podmínkou $u(0,x) = 0$, $\partial_t u(0,x) = \exp(-\sqrt{n}) \cos(nx)$ pro $x \in \mathbb{R}$. Zkoumejte chování $u(0,\cdot)$ a $u(1,\cdot)$ pro $n \to +\infty$.

27. Uvažte úlohu z předchozího příkladu na $(0,+\infty)\times(-\pi/2,\pi/2)$ navíc s okrajovou podmínkou $u(t,\pm\pi/2)=0$ pro $t>0$. Ukažte, že není dobře zadaná např. v prostorech L^∞ nebo C.

28. Najděte řešení rovnice $\partial_t u - \partial_x^2 u = 0$ na $(0,+\infty)\times\mathbb{R}$ s počáteční podmínkou $u(0,x)=0$ pro $x\in\mathbb{R}$.

Výsledek:

$u=0$

29. Najděte netriviální řešení předchozí úlohy, viz [Tichonov, 1935].

- Zvolte $\alpha\in(1,2)$, definujte $A_n=[\alpha n+1]!$ a ukažte, že řada $\sum_{n=0}^{+\infty} 1/\sqrt[n]{A_n}$ konverguje.
- Podle důkazu na straně 63 knihy [Carleman, 1926] existuje nenulová $F\in C^\infty(\mathbb{R})$ taková, že pro všechna $n\in\{0,\dots\}$ a pro všechna $t\in\mathbb{R}$ platí $F^{(n)}(0)=0$ a $|F^{(n)}(t)|\le A_n$.
- Definujte $u(t,x)=\sum_{n=0}^{+\infty} F^{(n)}(t)x^{2n}/(2n)!$ a ukažte, že tato řada spolu se všemi jejími formálními derivacemi konverguje lokálně stejnoměrně na $\mathbb{R}^2$ a tedy $u\in C^\infty(\mathbb{R}^2)$.
- Ukažte, že funkce u řeší zadanou rovnici i počáteční podmínku a je netriviální.

13.5 Lineární a kvazilineární PDR 1. řádu

Nalezněte charakteristiky a (metodou charakteristik) řešení následujících rovnic:

30. $u_x = 6x^2u_y$.

Výsledek:

$u(x,y)=F(2x^3+y)$, kde F je libovolná hladká funkce. **31.** $u_t+au_x=0$, $u(x,0)=\sin x$, $(a\neq 0)$.

Výsledek:

$u(x,t)=\sin(x-at)$. **32.** $u_t+xu_x+tu=0$, $u(x,0)=\sin x$.

Výsledek:

$u(x,t)=e^{-\frac{t^2}{2}}\sin(xe^{-t})$. **33.** $(z+y-x)u_x+(z+x-y)u_y+zu_z=0$.

Výsledek:

$u(x,y,z)=\Phi(x+y-2z,z^2(x-y))$, kde Φ je libovolná hladká funkce dvou proměnných.

34. Odvoďte, že řešení Cauchyovy úlohy $u_t+au_x=0$, $u(x,0)=\varphi(x)$, $(a\neq 0)$ je toto: $u(x,t)=\varphi(x-at)$ ještě jinak, než metodou charakteristik.

Návod:

Nalezněte charakteristiky a (metodou charakteristik) řešení následujících rovnic:

35. $u_x+yu_y=0$, $u(0,y)=\frac{1}{y}$.

Výsledek:

$u(x,y)=e^x/y$. **36.** $u_t+uu_x=0$, $u(x,0)=\varphi(x)$, kde

1. $\varphi(x)=0$ pro $x\le 0$, $\varphi(x)=x$ pro $x>0$,

2. $\varphi(x) = -x$ pro $x \leq 0$, $\varphi(x) = 0$ pro $x > 0$.

3. $\varphi(x) = 0$ pro $x \leq 0$, $\varphi(x) = 1$ pro $x \geq 1$, φ spojitá a po částech afinní funkce.

4. $\varphi(x) = 1$ pro $x \leq 0$, $\varphi(x) = 0$ pro $x \geq 1$, φ spojitá a po částech afinní funkce.

5. $\varphi(x) = \sin x$.

Výsledek:

Protože pro tuto rovnici mají charakteristiky, vycházející z bodu $[x_0, 0]$, směrnici $1/\varphi(x_0)$ (spočtěte si to!), lze odtud odvodit, že v prvních třech případech existuje globální klasické řešení, zatímco v dalších dvou je klasické řešení definováno pouze lokálně. **37.** $xzz_x + yzz_y = x^2 + y^2 + z^2$, $z(1, y) = y^2$.

Výsledek:

$u(x, y) = 2(x^2 + y^2)\ln x - \frac{y^4}{x^2}$.

38.* Metodou charakteristik řešte následující úlohu[4] pro neznámou funkci $w = w(y, t)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} &= \frac{M\sigma}{\sigma - y - sw}\Big(1 + sd\frac{\partial w}{\partial y}\Big), \quad y \in \mathbb{R}, \quad t > 0, \\ w(y, 0) &= 0, \quad y \in \mathbb{R}. \end{aligned}$$

M, σ, s, d jsou kladné (známé) konstanty. Uvažujte $|y| < \sigma$ a $t > 0$ dostatečně malé.

Návod:

Výsledek:

$w(y, t) = \frac{1}{s(d+1)}\big(\sigma - y - \sqrt{(\sigma - y)^2 - 2s(d+1)M\sigma t}\big)$.

39. Nalezněte řešení systému rovnic

$$\begin{aligned} U_t(x, t) + A \cdot U_x(x, t) &= 0, \quad x \in \mathbb{R}, \quad t > 0, & (13.10) \\ U(x, 0) &= F(x), \quad x \in \mathbb{R}, & (13.11) \end{aligned}$$

kde $A = \begin{pmatrix} 0 & 8 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}$, $U = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$, $F = \begin{pmatrix} f \\ g \end{pmatrix}$, a $f(x)$, $g(x)$ jsou dané funkce.

Návod:

40. Pro obecný systém s rovnic tvaru (13.10) ukažte, že pokud A je konstantní $s \times s$ diagonalizovatelná matice, lze postup z předchozího případu vždy použít a nalézt řešení takového systému. Připomeňte si, že matice mající různá reálná vlastní čísla je diagonalizovatelná.

13.6 Kanonický tvar lineárních PDR 2. řádu ve dvou proměnných

Určete typ PDR, převeďte ji do kanonického tvaru a načrtněte reálné charakteristiky. **41.** $u_{xx} - yu_{yy} = 0$ **42.** $xu_{xx} - 2\sqrt{xy}u_{xy} + yu_{yy} + \frac{1}{2}u_y = 0$, $x, y > 0$ **43.** $2u_{xx} + 2u_{xy} + u_{yy} + 4u_x + 4u_y + u = 0$

[4] Výsledek této úlohy se uplatní v důkaze věty Cauchyho-Kowalevské .

13.7 Řešení lineárních rovnic 2. řádu ve dvou proměnných

44. Nechť $u \in C^2(\mathbb{R})$ je řešením rovnice $au_{xx} + 2bu_{xy} + cu_{yy} = 0$ s $a \neq 0$. Dokažte, že je-li tato rovnice parabolická, pak existují funkce $F, G \in C^2(\mathbb{R})$ takové, že $u(x, y) = F(mx + y) + xG(mx + y)$, kde $m = -b/a$. **Varianta 4.** Ať $a, b, c \in \mathbb{R}$, $a \neq 0$ a $u \in C^2(\mathbb{R})$ řeší rovnici $au_{xx} + 2bu_{xy} + cu_{yy} = 0$ v $\mathbb{R}^2$. Ať $f \in C^2(\mathbb{R})$, $g \in C^1(\mathbb{R})$ a u řeší počáteční podmínku $u(x, 0) = f(x)$, $u_y(x, 0) = g(x)$ pro $x \in \mathbb{R}$. Označme $\Delta = b^2 - ac$ a předpokládejme $\Delta > 0$. Označme $\phi_x = -(b + \sqrt{\Delta})/a$ a $\psi_x = -(b - \sqrt{\Delta})/a$ a předpokládejme $\phi_x, \psi_x \neq 0$. Pak

$$u(x, y) = \frac{1}{\phi_x - \psi_x}(\phi_x f(x + \frac{y}{\phi_x}) - \psi_x f(x + \frac{y}{\psi_x})) + \frac{\phi_x\psi_x}{\psi_x - \phi_x}\int_{x+\frac{y}{\psi_x}}^{x+\frac{y}{\phi_x}} g(s)\,\mathrm{d}s. \tag{13.12}$$

Náznak důkazu: charakteristické rovnice jsou $y'(x) = (b \pm \sqrt{\Delta})/a$ a charakteristiky tedy $y(x) = \phi_x x + c$ a $y(x) = \psi_x x + c$ pro $c \in \mathbb{R}$. Transformaci souřadnic zvolíme $\phi(x, y) = y + \phi_x x), \psi(x, y) = y + \psi_x x$. Po transformaci $U(\phi(x, y), \psi(x, y)) = u(x, y)$ dostáváme rovnici $U_{\xi\eta} = 0$ a po vyřešení $U(\xi, \eta) = G(\xi/\phi_x) + F(\eta/\psi_x)$ a $u(x, y) = G(x + y/\phi_x) + F(x + y/\psi_x)$.

Pro dopočtení tvaru řešení využijeme linearity rovnice a příklad rozdělíme na dva případy. Předpokládejme na chvíli, že $g = 0$ na $\mathbb{R}$. Po dosazení do počáteční podmínky dostáváme rovnice

$$G'(x) + F'(x) = f'(x), \quad \frac{1}{\phi_x}G'(x) + \frac{1}{\psi_x}F'(x) = 0,$$

tedy $F(x) = \frac{\psi_x}{\psi_x - \phi_x}f(x) + c$ a $G(x) = \frac{\phi_x}{\phi_x - \psi_x}f(x) + d$ pro vhodné $c, d \in \mathbb{R}$. Dohromady

$$u(x, y) = \frac{1}{\phi_x - \psi_x}(\phi_x f(x + \frac{y}{\phi_x}) - \psi_x f(x + \frac{y}{\psi_x})),$$

což je první část vzorce (13.12). Fakt, že $c + d = 0$ plyne z počáteční podmínky pro u.

Je-li $f = 0$ dostáváme po dosazení do počáteční podmínky rovnice

$$G'(x) + F'(x) = 0, \quad \frac{1}{\phi_x}G'(x) + \frac{1}{\psi_x}F'(x) = g(x),$$

tedy

$$G(x) = \int_0^x g(s)\,\mathrm{d}s\frac{\psi_x\phi_x}{\psi_x - \phi_x} + c, \quad F(x) = \int_0^x g(s)\,\mathrm{d}s\frac{\psi_x\phi_x}{\phi_x - \psi_x} + d,$$

kde $c, d \in \mathbb{R}$ jsou vhodně zvoleny. Po dosazení do spočteného tvaru řešení a počátečních podmínek dostáváme

$$u(x, y) = \frac{\phi_x\psi_x}{\psi_x - \phi_x}\int_{x+\frac{y}{\psi_x}}^{x+\frac{y}{\phi_x}} g(s)\,\mathrm{d}s,$$

což je druhá část (13.12).

Nalezněte řešení Cauchyovy úlohy **45.** $4y^2u_{xx} + 2(1 - y^2)u_{xy} - u_{yy} - \frac{2y}{1+y^2}(2u_x - u_y) = 0$ v $\mathbb{R}^2$, $u(x, 0) = f(x)$ a $u_y(x, 0) = g(x)$ pro $x \in \mathbb{R}$, kde $f \in C^2(\mathbb{R})$ a $g \in C^1(\mathbb{R})$ jsou zadané funkce. **46.** $u_{xx} - 2\sin(x)u_{xy} - (3 + \cos^2(x))u_{yy} + u_x + (2 - \sin(x) - \cos(x))u_y = 0$ v $\mathbb{R}^2$, $u(x, \cos(x)) = 0$, $u_y(x, \cos(x)) = e^{-x/2}\cos(x)$ pro $x \in \mathbb{R}$. **47.** $u_{xx} + 2\cos(x)u_{xy} - \sin^2(x)u_{yy} - \sin(x)u_y = 0$ v $\mathbb{R}^2$, $u(x, \sin(x)) = x + \cos(x)$, $u_y(x, \sin(x)) = \sin(x)$ pro $x \in \mathbb{R}$. **48.** $(1 - \cos(y))u_{xx} + \cos(y)u_{xy} - u_{yy} - \frac{\sin(y)}{2-\cos(y)}(u_x - u_y) = 0$ v $\mathbb{R}^2$, $u(x, 0) = 2x$, $u_y(x, 0) = 1$ pro $x \in \mathbb{R}$. **49.** $2u_{xx} + 2u_{xy} - 4u_{yy} - 3u_x + 3u_y = 0$ v $\mathbb{R}^2$, $u(x, 0) = 2e^{\frac{x}{2}}$, $u_y(x, 0) = 0$ pro $x \in \mathbb{R}$. **50.** $u_{tt} - a^2u_{xx} = |x|$ v $\mathbb{R}^2$, $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$ pro $x \in \mathbb{R}$. Ukažte, že $u \notin C^3(\mathbb{R}^2)$. **51.** Buď $a > 0$, $f(x, t) = at$ pro $x \leq at$ a $f(x, t) = x$ pro $x > at$. Ukažte, že Cauchyova úloha $u_{tt} - a^2u_{xx} = f$ v $\mathbb{R} \times (0, +\infty)$, $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$ pro $x \in \mathbb{R}$ nemá řešení $u \in C^2(\mathbb{R} \times (0, +\infty)$.

13.8 Klasifikace PDR 2. řádu s konstantními koeficienty v $\mathbb{R}^n$

Určete kanonický tvar a typ rovnice **52.** $u_{xx}+2u_{xy}-2u_{xz}+2u_{yy}+6u_{zz}=0$, $u=u(x,y,z)$ **53.** $4u_{xx}-4u_{xy}-2u_{yz}+u_y+u_z=0$, **54.** $u_{xy}-u_{xz}+u_x+u_y-u_z=0$, **55.** $u_{xx}+2u_{xy}+2u_{yy}+2u_{yz}+2u_{yt}+2u_{zz}+3u_{tt}=0$, **56.** $\partial_1^2 u+2\sum_{k=2}^n \partial_k\partial_k u-2\sum_{k=1}^{n-1}\partial_k\partial_{k+1}u=0$ **57.** $\partial_1^2-2\sum_{k=2}^n(-1)^k\partial_{k-1}\partial_k u=0$,

13.9 Charakteristiky

Buď $\overline{x}\in\mathbb{R}^n$, $m\in\mathbb{N}$, $\Phi:\mathbb{R}^n\to\mathbb{R}$, $\Phi\in C^m(U(\overline{x}))$, $\Phi(\overline{x})=0$, $\partial_n\Phi(\overline{x})\neq 0$, $Lu=\sum_{|\alpha|=m}A_\alpha(x)D^\alpha u+b$, kde $A_\alpha:\mathbb{R}^n\to\mathbb{R}^{N\times N}$, $u:\mathbb{R}^n\to\mathbb{R}^N$.

58. Ukažte, že plocha $S=\{x\in\mathbb{R}^n;\Phi(x)=0\}$ je charakteristická v bodě $\overline{x}$ právě tehdy, když

$$\det\Big(\sum_{|\alpha|=m}A_\alpha(\overline{x})(\nabla\Phi)^\alpha(\overline{x})\Big)=0.$$

Ukažte, že plocha $S=\{x\in\mathbb{R}^n;\Phi(x)=0\}$ je charakteristická právě tehdy, když pro každé $\overline{x}\in S$ platí

$$\det\Big(\sum_{|\alpha|=m}A_\alpha(\overline{x})(\nabla\Phi)^\alpha(\overline{x})\Big)=0.$$

59. Ať $Lu=\sum_{\alpha=1}^n A_\alpha(x)\frac{\partial u}{\partial x_\alpha}$. Určete podmínku pro charakteristickou plochu. Buď navíc $N=1$. Jak charakteristická plocha souvisí s charakteristickou křivkou rovnice $Lu=0$?

Charakterizujte charakteristické plochy pro rovnice **60.** $\Delta u=0$, kde $\Delta=\sum_{k=1}^n\partial_{x_\alpha}^2$ **61.** $\partial_t u-\Delta u=0$ **62.** $\partial_t^2 u-\Delta u=0$

63. Uvažme systém pro neznámé funkce (u,v,w) proměnných (x,y)

$$\begin{aligned}\partial_x u&=v\\ \partial_y u&=w\\ \partial_x v+\partial_y w&=0\end{aligned}$$

Jedná se o Laplaceovu rovnici přepsanou jako systém. Chtěli bychom tedy, aby tento systém byl eliptický. Pokud bychom jako jeho hlavní část zvolili pouze členy nejvyššího řádu

$$L^p(\xi)=\begin{pmatrix}\partial_x & 0 & 0\\ \partial_y & 0 & 0\\ 0 & \partial_x & \partial_y\end{pmatrix}$$

dostali bychom $\det L^p(\xi)=0$. Budeme postupovat podle [M. Renardy, 1993, Sekce 2.1.3]. Každému sloupci přiřadíme celá čísla t_j a každému řádku celá čísla s_j tak, aby řád diferenciálního operátoru ve sloupci j a řádku k byl menší nebo roven t_j+s_k. Za hlavní část vezmeme pouze tu část diferenciálního operátoru, která má řád t_j+s_k. Čísla volíme tak, aby $\det L^p(i\xi)$ nebyl identicky roven 0. Najděte t_j a s_k a ukažte, že poté je systém eliptický, tj. neexistují netriviální vlastní směry.

64. Stokesův systém v $\mathbb{R}^3$ má tvar $-\Delta u+\nabla p=0$, $\operatorname{div}u=0$ pro neznámé funkce $u:\mathbb{R}^3\to\mathbb{R}^3$, $p:\mathbb{R}^3\to\mathbb{R}$. Jak vypadají charakteristické plochy?

13.10 Vlastní čísla druhé derivace

65. Buď $l>0$ a $\varphi\in C^1([0,l])$, $\varphi(0)=\varphi(l)=0$. Pak existuje jednoznačně určené rozšíření $\tilde{\varphi}$ definované na $\mathbb{R}$, které je liché vzhledem k bodu 0 a $2l$ periodické. Navíc platí $\tilde{\varphi}\in C^1(\mathbb{R})$ a $\tilde{\varphi}$ je liché vzhledem k bodu l. Je-li $\varphi\in C^2([0,l])$ a $\varphi''(0)=\varphi''(l)=0$, je též $\tilde{\varphi}\in C^2(\mathbb{R})$. Dokažte.

66. Najděte vlastní čísla a funkce druhé derivace na intervalu $(0, l)$ s okrajovou podmínkou $w(0) = 0$, $w(l) = 0$. Tedy najděte $\lambda \in \mathbb{R}$ a $w \in C^2([0, l])$, $w(0) = 0$, $w(l) = 0$, aby platila rovnice $-w'' = \lambda w$ v $(0, l)$.

67. Najděte $\lambda \in \mathbb{R}$ a $w \in C^2([0, l])$, $w(0) = 0$, $w'(l) = 0$, aby platila rovnice $-w'' = \lambda w$ v $(0, l)$.

68. Najděte $\lambda \in \mathbb{R}$ a $w \in C^2([0, l])$, $w'(0) = 0$, $w(l) = 0$, aby platila rovnice $-w'' = \lambda w$ v $(0, l)$.

69. Najděte $\lambda \in \mathbb{R}$ a $w \in C^2([0, l])$, $w'(0) = 0$, $w'(l) = 0$, aby platila rovnice $-w'' = \lambda w$ v $(0, l)$.

13.11 Vlnová rovnice

Buď $a > 0$. V této sekci budeme řešit rovnice

$$u_{tt} - a^2 u_{xx} = 0 \quad \text{v } \mathbb{R}^2 \tag{13.13}$$

$$u_{tt} - a^2 u_{xx} = f \quad \text{v } \mathbb{R}^2 \tag{13.14}$$

pro neznámou funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$.

70. Ať $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ je konvexní oblast a $u \in C^2(\Omega$ řeší bodově (13.13). Pak existují $P, Q \in C^2(\mathbb{R}^2)$ takové, že $u(x,t) = P(x - at) + Q(x + at)$. Dokažte.

71. Buď dáno $\varphi \in C^2(\mathbb{R})$, $\psi \in C^1(\mathbb{R})$. Najděte řešení (13.13) s počáteční podmínkou $u(x, 0) = \varphi(x)$, $u_t(x, 0) = \psi(x)$ pro $x \in \mathbb{R}$. Ukažte, že řešení u je určené jednoznačně a $u \in C^2(\mathbb{R}^2)$.

72. Ukažte, že pokud navíc k předpokladům předchozí úlohy existuje $x_0 \in \mathbb{R}$ tak, že pro $x \in \mathbb{R} : \varphi(x_0 + x) = \varphi(x_0 - x), \psi(x_0 + x) = \psi(x_0 - x)$ (φ a ψ jsou sudé kolem bodu x_0) má stejnou vlastnost i řešení u. Speciálně potom platí pro $t \in \mathbb{R}$, že $u_x(x_0, t) = 0$.

73. Ukažte, že pokud navíc k předpokladům předchozí úlohy existuje $x_0 \in \mathbb{R}$ tak, že pro $x \in \mathbb{R}$ platí $\varphi(x_0 + x) = -\varphi(x_0 - x), \psi(x_0 + x) = -\psi(x_0 - x)$ (φ a ψ jsou liché kolem bodu x_0), má stejnou vlastnost i řešení u. Speciálně potom platí pro $t \in \mathbb{R}$, že $u(x_0, t) = 0$.

74. Nechť $f \in C^2(\mathbb{R}^2)$ a uvažme Cauchyův problém (13.14) s počáteční podmínkou $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$ pro $x \in \mathbb{R}$. Výpočtem ukažte, že existuje právě jedno řešení.

75. Je-li navíc funkce f lichá podle bodu $x_0 \in \mathbb{R}$, je též řešení liché podle bodu x_0. Speciálně je pro $t \in \mathbb{R}$ $u(0, t) = 0$.

76. Uvažujme (13.14) s počáteční podmínkou $u(x, 0) = \varphi(x)$, $u_t(x, 0) = \psi(x)$ pro $x \in \mathbb{R}$, kde $f \in C^1(\mathbb{R}^2)$, $\varphi \in C^2(\mathbb{R})$, $\psi \in C^1(\mathbb{R})$ jsou sudé podle $x_0 \in \mathbb{R}$. Pak řešení je pro všechny $t \in \mathbb{R}$ také sudé podle x_0 a tedy u_x je lichá podle x_0 a tedy $u_x(0, t) = 0$ pro $t \in \mathbb{R}$.

77. Ukažte, že okrajová úloha $u_{tt} - a^2 u_{xx} = 0$ pro $(x, t) \in (0, +\infty) \times \mathbb{R} =: \Omega$, $u(x, 0) = \varphi(x)$, $u_t(x, 0) = \psi(x)$ pro $x \in (0, +\infty)$, $u(0, t) = 0$ pro $t \in \mathbb{R}$, kde $\varphi \in C^2([0, +\infty))$, $\psi \in C^1([0, +\infty))$, $\varphi(0) = \psi(0) = \varphi''(0) = 0$ má právě jedno řešení $u \in C^2(\overline{\Omega})$ a odvoďte pro něj vzorec.

78. Ukažte, že okrajová úloha $u_{tt} - a^2 u_{xx} = 0$ pro $(x, t) \in (0, +\infty) \times \mathbb{R} =: \Omega$, $u(x, 0) = \varphi(x)$, $u_t(x, 0) = \psi(x)$ pro $x \in (0, +\infty)$, $u_x(0, t) = 0$ pro $t \in \mathbb{R}$, kde $\varphi \in C^2([0, +\infty))$, $\psi \in C^1([0, +\infty))$, $\varphi'(0) = \psi'(0) = 0$ má právě jedno řešení $u \in C^2(\overline{\Omega})$ a odvoďte pro něj vzorec.

79. a) Řešte Fourierovou metodou úlohu $u_{tt} - a^2 u_{xx} = 0$ pro $(x, t) \in (0, l) \times \mathbb{R} =: \Omega$, $u(x, 0) = \varphi(x)$, $u_t(x, 0) = \psi(x)$ pro $x \in (0, l)$, $u(0, t) = 0$, $u_x(l, t) = 0$ pro $t \in \mathbb{R}$. Určete, za jakých předpokladů na funkce φ, ψ Fourierova řada stejnoměrně konverguje ke klasickému řešení, a sečtěte ji. Jaké jsou nutné a postačující podmínky pro existenci klasického řešení?

b) Pomocí Duhamelova principu řešte úlohu $u_{tt}-a^2u_{xx}=f$ pro $(x,t)\in(0,l)\times\mathbb{R}=:\Omega$, $u(x,0)=0$, $u_t(x,0)=0$ pro $x\in(0,l)$, $u(0,t)=0$, $u_x(l,t)=0$ pro $t\in\mathbb{R}$. Jaké jsou postačující podmínky na funkci f pro existenci klasického řešení?

c) Řešte úlohu $u_{tt}-a^2u_{xx}=0$ pro $(x,t)\in(0,l)\times\mathbb{R}=:\Omega$, $u(x,0)=0$, $u_t(x,0)=0$ pro $x\in(0,l)$, $u(0,t)=\alpha_1(t)$, $u_x(l,t)=\alpha_2(t)$ pro $t\in\mathbb{R}$. Jaké jsou postačující podmínky na funkce α_1 a α_2 pro existenci klasického řešení?

d) Speciální případ předešlého. Řešte úlohu $u_{tt}-u_{xx}=0$ pro $(x,t)\in(0,1)\times\mathbb{R}=:\Omega$, $u(x,0)=0$, $u_t(x,0)=0$ pro $x\in(0,1)$, $u(0,t)=\alpha(t)$, $u_x(1,t)=\beta(t)$ pro $t\in\mathbb{R}$. Jaké jsou postačující podmínky na funkce α a β pro existenci klasického řešení?

Řešení:

Úlohu rozdělím za pomoci linearity problému na dvě: Nejdříve hledám funkci u_1, která řeší: $u_{tt}-u_{xx}=0$ pro $(x,t)\in(0,1)\times\mathbb{R}=:\Omega$, $u(x,0)=0$, $u_t(x,0)=0$ pro $x\in(0,l)$, $u(0,t)=\alpha(t)$, $u_x(l,t)=0$ pro $t\in\mathbb{R}$.

Funkci u_1 budu hledat ve tvaru $u_1(x,t)=A(x+t)+A(x-t)$ pro vhodně zvolenou funkci $A:\mathbb{R}\to\mathbb{R}$. Z podmínky $u_x(l,t)=0$ vidíme, že A musí být sudé vzhledem k bodu 1, a z $u(0,t)=\alpha(t)$, že pro $x\in(0,1)$ musí platit $\alpha(x)=A(-x)$. Pomocí symetrií určíme celé A. Nejdříve si definujeme

$$\alpha_+(x)=\begin{cases}\alpha(x), & \text{pro } x\geq 0,\\ 0, & \text{jinak}\end{cases}\qquad \alpha_-(x)=\alpha_+(-x),\quad \text{pro } x\in\mathbb{R}.$$

Konečně,

$$A(x)=\sum_{k=0}^{+\infty}(-1)^k\alpha_-(x+2k)-\sum_{k=1}^{+\infty}(-1)^k\alpha_+(x-2k).$$

Zřejmě je $u_1(0,t)=A(t)+A(-t)=\sum_{k=0}^{+\infty}(-1)^k\alpha_-(t+2k)-\sum_{k=1}^{+\infty}(-1)^k\alpha_+(t-2k)+\sum_{k=0}^{+\infty}(-1)^k\alpha_-(-t+2k)-\sum_{k=1}^{+\infty}(-1)^k\alpha_+(-t-2k)=\alpha_-(t)+\alpha_-(-t)=\alpha(t)$ pro $t>0$.

Dále je $A(1+x)-A(1-x)=\sum_{k=0}^{+\infty}(-1)^k\alpha_-(1+x+2k)-\sum_{k=1}^{+\infty}(-1)^k\alpha_+(1+x-2k)-\sum_{k=0}^{+\infty}(-1)^k\alpha_-(1-x+2k)-\sum_{k=1}^{+\infty}(-1)^k\alpha_+(1-x-2k)=\sum_{k=0}^{+\infty}(-1)^k\alpha_-(1+x+2k)-\sum_{k=0}^{+\infty}(-1)^{k+1}\alpha_+(-1+x-2k)-\sum_{k=0}^{+\infty}(-1)^k\alpha_-(1-x+2k)+\sum_{k=0}^{+\infty}(-1)^{k+1}\alpha_+(-1-x-2k)=0$.

QED

80. Buď $\mu_1,\mu_2\in C^2([0,+\infty))$. Řešte úlohu $u_{tt}-a^2u_{xx}=0$ pro $(x,t)\in(0,l)\times\mathbb{R}$, $u(x,0)=\varphi(x)$, $u_t(x,0)=\psi(x)$ pro $x\in(0,l)$, $u(0,t)=\mu_1(t)$, $u(l,t)=\mu_2(t)$ pro $t\in[0,+\infty)$. Proveďte homogenizaci okrajových podmínek a použijte Fourierovu metodu.

81. Řešte Fourierovou metodou úlohu $u_{tt}-a^2u_{xx}=0$ pro $(x,t)\in(0,l)\times\mathbb{R}=:\Omega$, $u(x,0)=\varphi(x)$, $u_t(x,0)=\psi(x)$ pro $x\in(0,l)$, $u_x(0,t)=0$, $u_x(l,t)=0$ pro $t\in\mathbb{R}$. Určete, za jakých předpokladů na funkce φ, ψ Fourierova řada stejnoměrně konverguje ke klasickému řešení, a sečtěte ji. Jaké jsou nutné a postačující podmínky pro existenci klasického řešení?

82. Spočtěte řešení Cauchyovy úlohy pro vlnovou rovnici v 1d, je-li $c=1$, $u_0=0$ a $u_1=\sin^3\chi_{(2\pi,3\pi)}$.

83. Spočtěte řešení Cauchyovy úlohy pro vlnovou rovnici v 1d, je-li $c=1$, $u_0=\sin^3\chi_{(2\pi,3\pi)}$ a $u_1=0$.

84. Za předpokladů Věty 4.6 sečtěte

$$\sum_{n=1}^{+\infty}\frac{2}{l}\int_0^l u_0(y)\sin(\frac{n\pi y}{l})dy\cos(\frac{n\pi c}{l}t)\sin(\frac{n\pi x}{l}).$$

Uvažme Cauchyovu úlohu pro vlnovou rovnici ve 3d. Řešení je dáno Větou 4.15.

85. Buď $\varphi : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ hladká, sudá funkce s kompaktním nosičem. Položme $u_0(x) = \varphi(|x|)$, $u_1(x) = 0$. Ukažte, že řešení vlnové rovnice definované Kirchhoffovým vzorcem, je sféricky symetrické.

86. Za situace z předchozího příkladu spočtěte hodnoty řešení pro $x = 0$, tj. $u(t, 0)$.

87. Spočtěte $u(t, 0)$, je-li $\varphi(s) = \exp(-\alpha s^2)$ pro jisté $\alpha \in \mathbb{R}$. Příklad je z [Čihák et al., 2002, Sekce 9.2, 8a].

Uvažme Cauchyovu úlohu pro vlnovou rovnici ve 2d. Řešení je dáno Větou 4.15.

88. Buď $\varphi : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ hladká, sudá funkce s kompaktním nosičem. Položme $u_0(x) = \varphi(|x|)$, $u_1(x) = 0$. Ukažte, že řešení vlnové rovnice definované Poissonovým vzorcem, je osově symetrické.

89. Za situace z předchozího příkladu spočtěte hodnoty řešení pro $x = 0$, tj. $u(t, 0)$.

90. Spočtěte $u(t, 0)$, je-li $\varphi(s) = |s|^n$ pro jisté $n \in \mathbb{N}$. Příklad je z [Čihák et al., 2002, Sekce 9.2, 7a].

91. Spočtěte $u(t, 0)$, je-li $\varphi(s) = (1 - \cos(\omega s)/s$ pro jisté $\omega > 0$. Příklad je z [Čihák et al., 2002, Sekce 9.2, 7b].

13.12 Vlnová rovnice s nenulovou pravou stranou

92. Nechť $f : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ a $\partial_1 f : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ jsou spojité. Pak

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \int_0^t f(t, \tau)\, \mathrm{d}\tau = f(t, t) + \int_0^t f_t(t, \tau)\, \mathrm{d}\tau.$$

93. Nechť $f \in C^1(\mathbb{R}^2)$ a $a > 0$. Buď

$$u(x, t) = \frac{1}{2a} \int_0^t \int_{x-a(t-\tau)}^{x+a(t-\tau)} f(\sigma, \tau)\, \mathrm{d}\sigma\, \mathrm{d}\tau.$$

Ukažte, že $u \in C^2(\mathbb{R}^2)$ a že $u_{tt} - a^2 u_{xx} = f$ v $\mathbb{R}^2$, $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$ pro $x \in \mathbb{R}$.

13.13 Rovnice vedení tepla

94. Buď $G = (a, b) \times (0, T)$, $\Gamma = \partial G \setminus ((a, b) \times \{T\})$. Nechť $u \in C^2(G) \cap C(\overline{G})$ je řešením rovnice $u_t = a(x, t)u_{xx} + 2b(x, t)u_x + c(x, t)u$ v G, kde $a(x, t) \geq 0$, $c(x, t) \leq 0$ v $x \in G$. Dokažte, že $\max_{\overline{G}} |u| = \max_\Gamma |u|$.

95. Buď $G = (a, b) \times (0, T)$, $\Gamma = \partial G \setminus ((a, b) \times \{T\})$. Nechť $u \in C^2(G) \cap C(\overline{G})$ je řešením rovnice $u_t = a(x, t)u_{xx} + 2b(x, t)u_x + c(x, t)u$ v G, kde $a(x, t) \geq 0$ v $x \in G$. Dokažte, že $\max_{\overline{G}} |u| = e^{CT} \max_\Gamma |u|$, kde $C = \max\{0, \max_{\overline{G}} c\}$.

96. Najděte pomocí Duhamelova principu řešení úlohy $u_t - a^2 u_{xx} = f$ v $\Omega := \mathbb{R} \times (0, +\infty)$, $u(x, 0) = 0$ pro $x \in \mathbb{R}$, kde $f \in C^2(\overline{\Omega}) \cap L^\infty(\overline{\Omega})$.

97. Řešte Fourierovou metodou úlohu $u_t - a^2 u_{xx} = 0$ pro $(x, t) \in (0, l) \times (0, +\infty)$, $u(x, 0) = \varphi(x)$ pro $x \in (0, l)$, $u(0, t) = 0$, $u(l, t) = 0$ pro $t \in (0, +\infty)$. Speciálně položte $\varphi(x) = \min(x, l - x)$ pro $x \in (0, l)$.

98. Řešte Fourierovou metodou úlohu $u_t - a^2 u_{xx} = 0$ pro $(x, t) \in (0, l) \times (0, +\infty)$, $u(x, 0) = \varphi(x)$ pro $x \in (0, l)$, $u_x(0, t) = 0$, $u_x(l, t) = 0$ pro $t \in (0, +\infty)$. Speciálně položte $\varphi(x) = x$ pro $x \in (0, l)$.

99. Řešte Fourierovou metodou úlohu $u_t - a^2 u_{xx} = 0$ pro $(x, t) \in (0, l) \times (0, +\infty)$, $u(x, 0) = \varphi(x)$ pro $x \in (0, l)$, $u(0, t) = 0$, $u_x(l, t) = 0$ pro $t \in (0, +\infty)$. Speciálně položte $\varphi(x) = \min(x, l/2)$ pro $x \in (0, l)$.

100. Řešte Fourierovou metodou úlohu $u_t - a^2 u_{xx} = 0$ pro $(x, t) \in (0, l) \times (0, +\infty)$, $u(x, 0) = \varphi(x)$ pro $x \in (0, l)$, $u_x(0, t) = 0$, $u(l, t) = 0$ pro $t \in (0, +\infty)$. Speciálně položte $\varphi(x) = x^2 - l^2$ pro $x \in (0, l)$.

101. Řešte Fourierovou metodou úlohu $u_t - a^2 u_{xx} = 0$ pro $(x,t) \in (0,l) \times (0,+\infty)$, $u(x,0) = \varphi(x)$ pro $x \in (0,l)$, $u_x(0,t) = 0$, $K_1 u_x(l,t) + K_2 u(l,t) = 0$ pro $t \in (0,+\infty)$.

102. Řešte Fourierovou metodou úlohu $u_t - a^2 \Delta u = 0$ pro $(x,t) \in G \times (0,+\infty)$, $G = (0,l_1) \times (0,l_2)$, $u(x,0) = \varphi(x)$ pro $x \in G$, $u(x,t) = 0$ pro $x \in \partial G$, $t > 0$.

4 Písemky

1 1. zápočtová písemka

Zápočtová písemka z UPDR, ZS 2023

1. Mějme diferenciální rovnici $3\partial_x^2 u(x,y) + 4\partial_x \partial_y u(x,y) + \partial_y^2 u(x,y) = 0$. a) Určete typ rovnice. b) Převeďte rovnici na tvar, který neobsahuje smíšené druhé parciální derivace. c) Je-li to možné, napište obecné řešení.

2. Buď $u_0 \in C^\infty(\mathbb{R})$. Uvažme úlohu $\frac{1}{x}\partial_x u(x,y) + (x^2+1)\partial_y u(x,y) = 0$ pro neznámou funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ s počáteční podmínkou $u(1,y) = u_0(y)$ pro $y \in \mathbb{R}$. a) Najděte řešení zadané úlohy na jistém okolí bodu $(1,1)$.

3. Uvažme úlohu $\partial_t^2 u(t,x) - \partial_x^2 u(t,x) = 0$ v $(0,+\infty) \times (0,2\pi)$ s okrajovými podmínkami $\partial_x u(t,0) = \partial_x u(t,2\pi)$ a $u(t,0) = u(t,2\pi)$ pro $t > 0$ a počátečními podmínkami $u(0,x) = 0$ a $\partial_t u(0,x) = u_1(x)$ pro $x \in (0,2\pi)$ a dané u_1. a) Najděte kandidáta na řešení úlohy. b) Najděte řešení úlohy pro $u_1(x) = \sin^2(x)$.

2 Opravné příklady na zápočet

Dodatečné příklady na zápočet z UPDR, ZS 2023

1. Mějme diferenciální rovnici $3\partial_x^2 u + 6\partial_x \partial_y u + \partial_y^2 u = 0$. a) Určete typ rovnice. b) Převeďte rovnici na tvar, který neobsahuje smíšené druhé parciální derivace. c) Je-li to možné, napište obecné řešení.

2. Buď $u_0 \in C^\infty(\mathbb{R})$. Uvažme úlohu $\frac{1}{x^2}\partial_x u(x,y) + (x^3+y)\partial_y u(x,y) = 0$ pro neznámou funkci $u : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ s počáteční podmínkou $u(1,y) = u_0(y)$ pro $x \in \mathbb{R}$. a) Najděte řešení zadané úlohy na jistém okolí bodu $(1,1)$.

3. Uvažme úlohu $\partial_t u - \partial_x^2 u = 0$ v $(0,+\infty) \times (0,2\pi)$ s okrajovými podmínkami $\partial_x u(t,0) = \partial_x u(t,2\pi)$ a $u(t,0) = u(t,2\pi)$ pro $t > 0$ a počáteční podmínkou $u(0,x) = u_0(x)$ pro $x \in (0,2\pi)$ a dané $u_0 : (0,2\pi) \to \mathbb{R}$. a) Najděte kandidáta na řešení úlohy. b) Najděte řešení úlohy pro $u_0(x) = \sin^3(x)$.

5 Domácí úkol

1 Odvození fundamentálního řešení rovnice vedení tepla (RVT)

Poslední změna: 12.01.2024 15:48:57

Budeme hledat speciální řešení $u : (0, +\infty) \times \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ rovnice

$$\partial_t u(t, x) - \Delta_x u(t, x) = 0,$$

pro $t > 0$ a $x \in \mathbb{R}^n$. Operátor Δ uvažujeme pouze vzhledem k proměnné x.

1. Ukažte, že operátor Δ je rotačně invariantní, tj. pro libovolnou ortonormální matici $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $w \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$, $x \in \mathbb{R}^n$ platí $(\Delta w)(Ax) = \Delta(w(Ax))$.

   Závěr: Speciální řešení RVT budeme hledat ve tvaru $u(t, x) = v(t, |x|)$.

2. Ukažte, že pokud $v(t, |x|)$ řeší RVT v $Q \subset (0, +\infty) \times \mathbb{R}^n$, $\lambda > 0$, pak $v(\lambda^2 t, \lambda|x|)$ řeší RVT na $Q_\lambda = \{(t, x) \in (0, +\infty) \times \mathbb{R}^n; (\lambda^2 t, \lambda x) \in Q\}$.

3. Ukažte, že pokud pro jisté $\alpha > 0$ a pro všechna $t > 0$, $\lambda > 0$, $x \in \mathbb{R}^n$ platí $(\lambda^2 t)^\alpha w(\lambda^2 t, \lambda|x|) = t^\alpha w(t, |x|)$, tak funkce w musí mít tvar $w(t, |x|) = t^{-\alpha} v(|x|/\sqrt{t})$ pro jistou funkci $v : (0, +\infty) \to \mathbb{R}$.

   Závěr: Řešení RVT hledáme ve tvaru
   $$u(t, x) = t^{-\alpha} v(|x|^2/t) \tag{1.1}$$
   pro vhodnou funkci $v : (0, +\infty) \to \mathbb{R}$ a $\alpha \in \mathbb{R}$.

4. Najděte obecné řešení RVT ve tvaru (1.1) na $(0, +\infty) \times \mathbb{R}^n$. Postupujte následovně

   (a) Dosaďte (1.1) do RVT a upravte tak, aby výsledná rovnice závisela pouze na $|x|^2/t$.

   (b) Nahraďte $|x|^2/t$ novou proměnnou s a vzniklou rovnici vynásobte integračním faktorem s^β. Zvolte α a β tak, aby se vzniklá rovnice dala napsat jako rovnost derivací.

   (c) Integrujte a napište obecné řešení v.

5. Volte parametry tak, aby $v(0+) \in (0, +\infty)$ a
   $$\int_{\mathbb{R}^n} u(1/4, x)\,\mathrm{d}x = 1.$$

6. Buď $n > 2$. Ukažte, že funkce $h(x) = \int_0^{+\infty} u(t, x)\,\mathrm{d}t$ pro $x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ řeší rovnici $\Delta h = 0$ v $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ a najděte vyjádření funkce h, které neobsahuje integrál.

Reference

[Carleman, 1926] Carleman, T. (1926). *Les fonctions quasi analytiques.* Gauthier-Villars.

[Evans, 2010] Evans, L. C. (2010). *Partial differential equations*, volume 19 of *Graduate Studies in Mathematics.* American Mathematical Society, Providence, RI, second edition.

[Ferretti, 2003] Ferretti, E. (2003). Uniqueness in the cauchy problem for parabolic equations. *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*, 46(2):329–340.

[John and Nečas, 1982] John, O. and Nečas, J. (1982). *Rovnice matematické fyziky.* Státní pedagogické nakladatelství, Praha.

[Krylov, 1996] Krylov, N. V. (1996). *Lectures on elliptic and parabolic equations in Hölder spaces*, volume 12 of *Graduate Studies in Mathematics.* American Mathematical Society, Providence, RI.

[Kufner et al., 1977] Kufner, A., John, O., and Fučík, S. (1977). *Function spaces.* Monographs and Textbooks on Mechanics of Solids and Fluids, Mechanics: Analysis. Noordhoff International Publishing, Leyden; Academia, Prague.

[Kurzweil, 1978] Kurzweil, J. (1978). *Obyčejné diferenciální rovnice.* TKI, SNTL, Praha.

[M. Renardy, 1993] M. Renardy, R. R. (1993). *An Introduction to Partial Differential Equations.* Springer-Verlag, New York.

[Pick et al., 2019] Pick, L., Hencl, S., Spurný, J., and Zelený, M. (2019). Matematická analýza 1. skript k přednášce, verze 14.10.2019, `https://www2.karlin.mff.cuni.cz/~kaplicky/texts/MA-skript-211014.pdf`.

[Pinchover and Rubinstein, 2005] Pinchover, Y. and Rubinstein, J. (2005). *An introduction to partial differential equations.* Cambridge University Press, Cambridge.

[Tichonov, 1935] Tichonov, A. (1935). Théorèmes d'unicité pour l'équation de la chaleur. *Matematiceskij sbornik*, 42(2):199–216.

[Čihák et al., 2002] Čihák, P., Čerych, J., and Kopáček, J. (2002). *Příklady z matematiky pro fyziky V.* matfyzpress.