

7 Barevnost a další těžké problémy

Již dříve jsme si připomínali jeden z historických kamenů teorie grafů – slavný problém *sedmi mostů v Královci* (dnešním Kaliningradě). Další neméně slavný problém pochází z poloviny 19. století a je obvykle zvaný **problémem čtyř barev**.

Na rozdíl od sedmi mostů, problém čtyř barev zůstal nevyřešený po více než 100 let!

Kolik barev je třeba použít na obarvení politické mapy pro rozlišení sousedních států?

Někteří matematici však kladou prapočátky teorie grafů daleko před Eulerovými sedmi mosty či problémem čtyř barev, až ke středověké otázce, zda lze šachovým **koněm obejít celou šachovnici** bez opakování.

Tato otázka nakonec vede k dalšímu zajímavému a obtížnému problému tzv. Hamiltonovské kružnice v grafu. . . □

Stručný přehled lekce

- Definice barevnosti grafu, základní vlastnosti.
- Varinaty problému barvení. Další problémy jako Hamiltonovská kružnice.
- Algoritmická obtížnost základních grafových problémů.

7.1 Barevnost grafu

Nejprve si uveďme pojem barevnosti – představme si, že hrany grafu nám říkají, že jejich koncové vrcholy musí být barevně odlišené (třeba proto, že reprezentují sousední státy, nebo proto, že jinak jsou si příliš podobné a je třeba je jinak rozlišit, atd). □ Samozřejmě bychom mohli každému vrcholu grafu dát jinou barvu, ale k čemu by pak takový problém byl? My bychom chtěli použít barev celkem co nejméně. □

Definice: *Obarvením grafu* G pomocí k barev myslíme libovolné zobrazení

$$c : V(G) \rightarrow \{1, 2, \dots, k\}$$

takové, že každé dva vrcholy spojené hranou dostanou různé barvy, tj. $c(u) \neq c(v)$ pro všechny $\{u, v\} \in E(G)$.

Definice 7.1. Barevnost grafu G

je nejmenší číslo $\chi(G)$ pro které existuje obarvení grafu G pomocí $\chi(G)$ barev. □

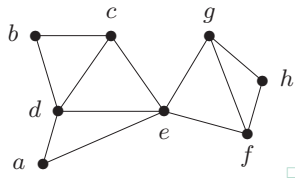
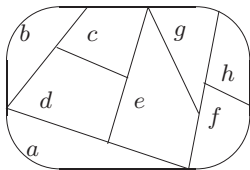
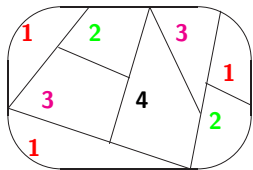
Čísla $1, 2, \dots, k$ z předchozí definice tak nazýváme barvami vrcholů (je to pohodlnější, než popisovat barvy běžnými jmény jako bílá, červená, atd).

Poznámka: Uvědomme si, že barevnost lze definovat pouze pro graf bez smyček, protože oba konce smyčky mají vždy stejnou barvu a nic s tím nenaděláme.

Lema 7.2. *Nechť G je jednoduchý graf (bez smyček) na n vrcholech. Pak $\chi(G) \leq n$ a rovnost nastává právě když $G \simeq K_n$ je úplný graf. \square*

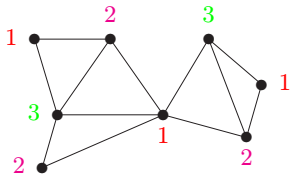
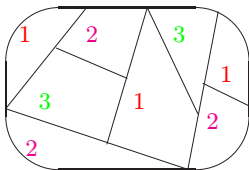
Důkaz: Stačí každý vrchol obarvit jinou barvou a máme skutečné obarvení n barvami dle definice. Navíc pokud některá dvojice u, v vrcholů není spojená hranou, můžeme volit lepší obarvení $c(u) = c(v) = 1$ a zbylé vrcholy různými barvami $2, 3, \dots, n - 1$, tj. pak $\chi(G) < n$. \square

Příklad 7.3. Vraťme se k příkladu „barvení“ mapy z úvodu lekce a ukažme si, jak mapy souvisejí s grafy a jejich barevností.



Jednotlivé oblasti na mapě (předpokládáme, že každý stát má souvislé území, tj. státy = oblasti) prohlásíme za vrcholy našeho grafu a sousední dvojice států spojíme hranami. Nezapomeňme, že “sousední” znamená sdílení celého úseku hranice, ne jen jednoho rohu. □

Při troše snahy také najdeme lepší obarvení uvedené mapy využívající pouhých tří barev:

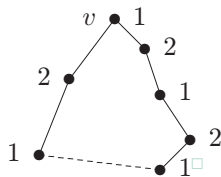
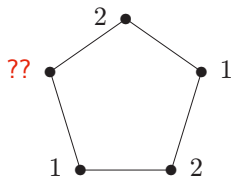


Věta 7.4. Graf G má barevnost 1 právě když nemá žádné hrany.

Graf G má barevnost 2 právě když nemá žádnou kružnici liché délky jako podgraf. \square

Důkaz: Pokud graf nemá hrany, můžeme všechny vrcholy obarvit stejnou barvou 1. Naopak pokud mají všechny vrcholy stejnou barvu, nemůže graf mít žádnou hranu. \square

Druhá část: Na jednu stranu, lichou kružnici nelze obarvit dvěma barvami, viz obrázek. Na druhou stranu si představme, že zvolíme libovolný vrchol v grafu G s barvou 1 a ostatní vrcholy obarvíme takto: Vrcholy, jejichž vzdálenost od v je lichá, obarvíme 2. Vrcholy, jejichž vzdálenost od v je sudá, obarvíme 1.



Pokud bychom tak získali třeba dva vrcholy spojené hranou f v sudé vzdálenosti od v , získáme uzavřený sled S liché délky přes f a v . Stejně tak pro dva vrcholy v liché vzdálenosti. Vezmeme-li ze sledu S ty hrany, které se opakují lichý počet krát, dostaneme Eulerovský podgraf T lichého počtu hran. Jak již víme (Oddíl 4.1), T pak obsahuje kružnici a tudíž jej lze induktivně sestavit jako hranově-disjunktní sjednocení kružnic. Avšak sjednocení kružnic sudé délky nevytvoří T liché velikosti, spor. Proto naše obarvení za daných předpokladů nemůže dát stejnou barvu sousedním vrcholům, a tudíž dvě barvy stačí. \square

Hladové obarvení

Definice: Graf G je k -degenerovaný, pokud každý podgraf G obsahuje vrchol stupně nejvýše k .

Příkladem k -degenerovaného grafu je každý graf stupně nejvýše k , ale na druhou stranu k -degenerované grafy mohou mít vysoké stupně. (Nestačí však mít jen nízký nejmenší stupeň!)

□

Věta 7.5. Každý k -degenerovaný graf lze hladově korektně obarvit $k + 1$ barvami. □

Důkaz: Jelikož graf G je k -degenerovaný, vybereme libovolný jeho vrchol v_1 stupně nejvýše k a rekurzivní aplikací tohoto postupu obarvíme podgraf $G - v_1$, který je podle definice také k -degenerovaný. Nakonec si všimneme, že $\leq k$ sousedé vrcholu v_1 dostanou nejvýše k různých barev, takže v_1 dobarvíme zbylou barvou. □

Důležité aplikace této věty uvidíme v příští lekci, avšak jedno zajímavé zesílení (*Brooksovu větu*) si uvedeme nyní:

Věta 7.6. *Nechť G je souvislý jednoduchý graf maximálního stupně $k \geq 2$. Pak $\chi(G) \leq k$ až na případy, kdy G je úplný graf nebo lichá kružnice.*

Důkaz (náznak): Pro $k = 2$ plyne tvrzení z Věty 7.4. Nechť tedy $k \geq 3$. V jednom směru je jasné, že $\chi(K_{k+1}) = k + 1$. Naopak tedy předpokládejme, že G není úplný. \square

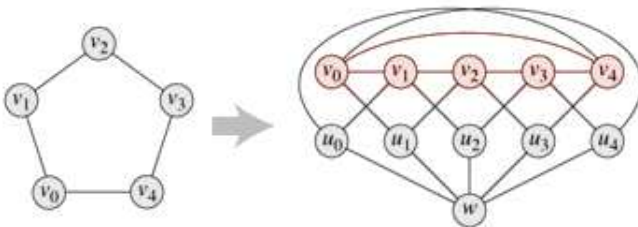
- Prvním krokem nahlédneme, že pak G obsahuje dva nespojené vrcholy u, v se společným sousedem w . Pokud ale je graf $G - \{u, v\}$ nesouvislý, pak graf příslušně rozdělíme a indukcí po částech obarvíme. \square
- Přidejme tedy předpoklad, že $G - \{u, v\}$ je souvislý. Druhým krokem nahlédneme, že graf H vzniklý z $G - w$ ztotožněním u s v do jednoho vrcholu je $(k - 1)$ -degenerovaný. \square
- Tudíž graf H hladově obarvíme k barvami podle Věty 7.5. Po opětovném “rozpuštění” vrcholů u, v získáme obarvení $G - w$ k barvami takové, že u, v mají stejnou barvu. Nyní w má v sousedství nejvýše $k - 1$ barev a G celý obarvíme. \square

Grafy vysoké barevnosti

Ke správnému pochopení barevnosti grafu je nezbytné se zamyslet, které grafy mají vysokou barevnost. Jedná se například o grafy obsahující velké kliky (úplné podgrafy). Je to však vše? □

Není! Lze nalézt grafy s libovolně vysokou barevností neobsahující ani trojúhelníky.

Tvrzení 7.7. (Mycielski) *Graf získaný z grafu G následující konstrukcí (viz obrázek) má barevnost $\chi(G) + 1$ a neobsahuje trojúhelníky, pokud je neobsahuje ani G .*



□

Nejobecněji lze říci následující překvapivé tvrzení:

Věta 7.8. (Erdős) *Pro každá $c, r > 0$ existuje graf s barevností alespoň c a neobsahující kružnice kratší než r .*

7.2 Variace na barevnost a jiné

Definice 7.9. Hranová barevnost grafu G .

Hledáme obarvení $c_e(E(G)) \rightarrow \{1, 2, \dots, k\}$ takové, že žádné dvě hrany se společným vrcholem nedostanou stejnou barvu.

Nejmenší možný počet barev k , pro které hranové obarvení existuje, se nazývá **hranová barevnost** $\chi_e(G)$ grafu. \square

Na rozdíl od běžné barevnosti umíme hranovou barevnost docela ostře aproximovat.

Věta 7.10. (Vizing) Pro každý jednoduchý graf platí $\Delta(G) \leq \chi_e(G) \leq \Delta(G) + 1$.

Platí, že většina grafů splňuje $\Delta(G) = \chi_e(G)$. Umíte jednoduše sestrojít (a dokázat) příklady pro druhý případ?

Problém přesného určení hranové barevnosti grafu však stále zůstává algoritmicky velmi obtížný a také úzce souvisí s problémem čtyř barev.

Definice 7.11. **Výběrová barevnost** grafu G .

Je dán graf G spolu s přiřazenými „seznamy barev“ $L : V(G) \rightarrow \binom{\mathbb{N}}{k}$ (k -prvkové podmnožiny). Nyní hledáme obarvení $c_{ch} : V(G) \rightarrow \mathbb{N}$ takové, že žádné dva sousední vrcholy nedostanou stejnou barvu a navíc $c_{ch}(v) \in L(v)$ pro každý vrchol v .

Nejmenší možná délka k seznamů barev, pro kterou výběrové obarvení vždy existuje (tj. pro každou možnou takovou volbu seznamů), se nazývá **výběrová barevnost** $ch(G)$ grafu. \square

Výběrová barevnost může (kupodivu!) být libovolně „vzdálena“ běžné barevnosti.

Tvrzení 7.12. *Pro každé k nalezneme bipartitní graf s výběrovou barevností větší než k .* \square

Fakt: Hranová výběrová barevnost úplných bipartitních grafů úzce souvisí se známým problémem *latinských obdélníků*.

Hamiltonovské grafy

Definice: Kružnice C obsažená v grafu G se nazývá *Hamiltonovská*, pokud C prochází všemi vrcholy G . Obdobně mluvíme o *Hamiltonovské cestě* P v G , pokud cesta $P \subset G$ prochází všemi vrcholy G .

Graf G je *Hamiltonovský*, pokud obsahuje Hamiltonovskou kružnici. \square

Možná to zní překvapivě, ale i problém Hamiltonovské kružnice úzce souvisel s řešením problému čtyř barev. To je však mimo rámec našeho textu.

Věta 7.13. (Dirac) Každý graf na $n \geq 3$ vrcholech s minimálním stupněm $\geq n/2$ je Hamiltonovský. \square

Důkaz (náznak): Necht' P je nejdelší cesta v grafu G s vrcholy po řadě u_0, u_1, \dots, u_k . Podle její maximality leží každý soused u_0 i u_k na P . Pak existuje $0 < i < k$ takové, že $u_0 u_{i+1} \in E(G)$ a zároveň $u_k u_i \in E(G)$. Pak $u_0 u_{i+1} P u_k u_i P$ tvoří kružnici v G a snadno plyne, že se jedná o Hamiltonovskou kružnici. \square

7.3 \mathcal{NP} -úplnost grafových problémů

Definice složitostní třídy \mathcal{NP} se týká výhradně **rozhodovacích problémů** (s „ANO/NE“ odpovědí). Dá se neformálně říci, že problém patří do třídy \mathcal{NP} , pokud jeho odpověď ANO lze prokázat (ve smyslu „uhodnout a ověřit“) výpočtem, který běží v polynomiálním čase.

\mathcal{NP} -úplné problémy jsou zhruba řečeno ty, které ve třídě \mathcal{NP} mají nejvyšší obtížnost řešení.

Od jednoho \mathcal{NP} -úplného problému A se „dostaneme“ k jinému B tzv. **polynomiálním převodem**: Ukážeme, jak bychom ze známého postupu řešení B efektivně našli řešení (libovolné instance) A . □

Nyní si ukážeme vhodnými převody, že oněch „nejobtížnějších“ (\mathcal{NP} -úplných) problémů je v teorii grafů mnoho, bohužel by se dalo říci většina. To ostatně ukazuje, proč jsme zatím v praxi tak **málo úspěšní při počítačovém řešení** mnohých praktických problémů – přesné a efektivní řešení \mathcal{NP} -úplných úloh se totiž všeobecně považuje za nemožné.

Problém 7.14. 3-SAT (splnitelnost logických formulí ve spec. verzi)

Následující problém je \mathcal{NP} -úplný:

Vstup: Logická formule Φ v konjunktivním normálním tvaru taková, že každá klauzule obsahuje nejvýše 3 literály.

Výstup: Existuje logické ohodnocení proměnných tak, aby výsledná hodnota Φ byla 1 (pravda)?

Problém 7.15. 3-COL (3-obarvení grafu)

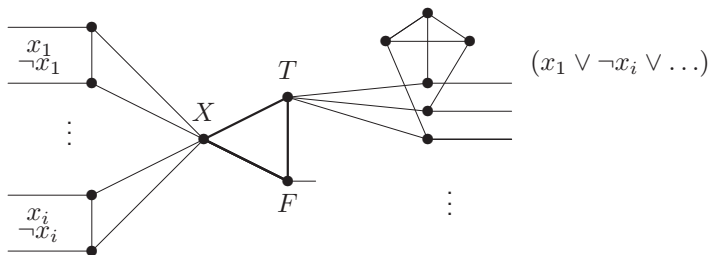
Následující problém je \mathcal{NP} -úplný:

Vstup: Graf G .

Výstup: Lze vrcholy G korektně obarvit 3 barvami?

Důkaz (náznak): Ukážeme si polynomiální převod z problému 3-SAT. \square

Sestrojíme graf G pro danou formuli Φ . Základem grafu je trojúhelník, jehož vrcholy označíme X, T, F . Každé proměnné x_i ve Φ přiřadíme dvojici vrcholů spojených s X . Každé klauzuli ve Φ přiřadíme podgraf na 6 vrcholech (z nichž tři jsou spojené s T), jako na obrázku. Nakonec volné "půlhrany" z obrázku pospojujeme dle toho, jaké literály vystupují v klauzulích.



Pak G má 3-obarvení právě když je Φ splnitelná, jak si lze ověřit na obrázku. \square

Problém 7.16. IS (nezávislá množina)

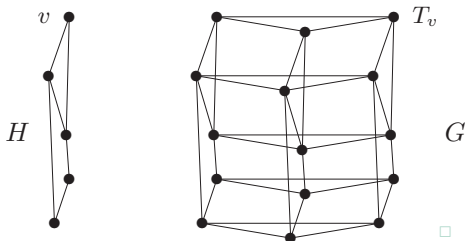
Následující problém je \mathcal{NP} -úplný:

Vstup: Graf G a přirozené číslo k .

Výstup: Lze v G najít nezávislou podmnožinu velikosti (aspoň) k ? \square

Důkaz: Ukážeme polynomiální převod z problému 3-COL.

Nechť H je graf na n vrcholech, který je za úkol obarvit třemi barvami. Položíme $k = n$ a graf G sestrojíme ze tří disjunktních kopií grafu H takto:



Pokud $c : V(H) \rightarrow \{1, 2, 3\}$ je obarvení H třemi barvami, v grafu G lze vybrat $k = n$ nezávislých vrcholů tak, že pro každý $v \in V(H)$ vezmeme $c(v)$ -tou kopii vrcholu v v grafu G . Naopak pokud I je nezávislá množina v grafu G o velikosti $k = n$, pak z každého trojúhelníku T_v , $v \in V(H)$ náleží do I právě jeden vrchol. Podle toho již určíme jednu ze tří barev pro vrchol v v H . \square

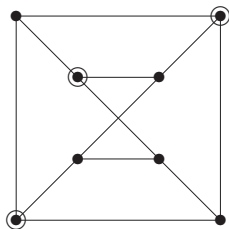
Problém 7.17. VC (vrcholové pokrytí)

Následující problém je \mathcal{NP} -úplný:

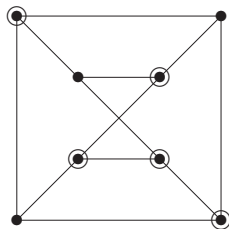
Vstup: Graf G a přirozené číslo k .

Výstup: Lze v G najít **vrcholové pokrytí**, tj. množinu $C \subseteq V(G)$ takovou, že každá hrana G má alespoň jeden konec v C , o velikosti nejvýše k ? \square

Důkaz: Ukážeme polynomiální převod z problému IS. Necht' G je graf na n vrcholech, v němž máme najít nezávislou množinu I velikosti ℓ . Všimněme si, že doplněk $C = V(G) \setminus I$ nezávislé množiny I je vlastně vrcholovým pokrytím. Takže v našem převodu stačí použít stejný graf G a $k = n - \ell$. \square



nezávislá množina



vrcholové pokrytí

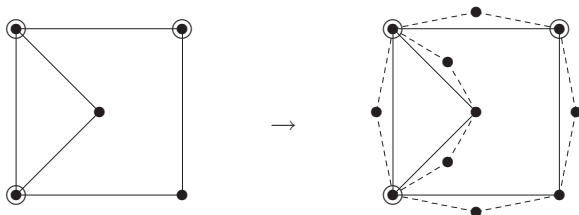
Problém 7.18. DOM (dominující množina)

Následující problém je \mathcal{NP} -úplný:

Vstup: Graf G a přirozené číslo k .

Výstup: Lze v G najít dominující množinu, tj. množinu $D \subseteq V(G)$ takovou, že každý vrchol G má některého souseda v D , o velikosti nejvýše k ? \square

Důkaz (náznak): Problém dominující množiny jasně patří do \mathcal{NP} a jeho úplnost je dokázána následujícím schematickým polynomiálním převodem.



Graf H vytvoříme z grafu G přidáním, pro každou hranu $e \in E(G)$, nového vrcholu v_e spojeného hranami do obou koncových vrcholů hrany e . (Tak se vlastně z každé hrany stane trojúhelník s třetím novým vrcholem, viz naznačený obrázek.) Číselný parametr k zůstane tentokrát nezměněn. Nyní zbývá dokázat, že G má vrcholové pokrytí velikosti k , právě když H má dominující množinu velikosti právě k , což není obtížné. \square

Problém 7.19. HC (Hamiltonovský cyklus)

Následující problém je \mathcal{NP} -úplný:

Vstup: Orientovaný graf G .

Výstup: Lze v G najít orientovanou kružnici (cyklus) procházející všemi vrcholy? \square

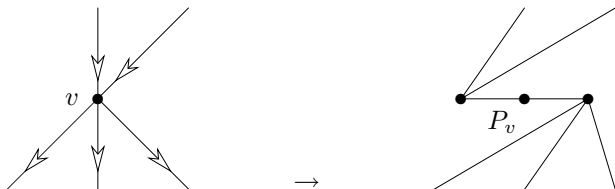
Problém 7.20. HK (Hamiltonovská kružnice)

Následující problém je \mathcal{NP} -úplný:

Vstup: Graf G .

Výstup: Lze v G najít kružnici procházející všemi vrcholy? \square

Důkaz:



Použijeme snadný převod z předchozího problému HC. Každý vrchol v orientovaného grafu H nahradíme třemi vrcholy tvořícími cestu P_v délky 2 v grafu G . Orientované hrany grafu H přicházející do v pak přivedeme do prvního vrcholu cesty P_v , hrany odcházející z v naopak vedeme z posledního vrcholu cesty P_v . \square

7.4 Příběh problému vrcholového pokrytí

Bylo nebylo, jednou se dva slovní inženýři (při surfování na moři?) začali zabývat otázkou, proč dva tak „podobné“ problémy jako vrcholové pokrytí a dominující množina mají (přestože oba \mathcal{NP} -úplné) tak rozdílné algoritmické chování. . .

Ale dost pohádek, více konkrétních informací čtenář najde v [R. Downey, M. Fellows, Parametrized complexity, Springer 1999]. Mimo jiné se dozví, že tato zdánlivě okrajová otázka dala vzniknout zcela novému pohledu na výpočetní složitost problémů, který jde „jaksi mimo“ klasickou polynomiální hierarchii a umožňuje docela rozumně řešit i některé problémy, které jsou jinak \mathcal{NP} -těžké. □

Takže v čem spočívá zásadní rozdíl v našich znalostech o řešení problémů dominující množiny a vrcholového pokrytí?

- Pokud se v analýze zaměříme na hodnotu parametru k vstupu, tak dominující množinu velikosti k stejně nedokážeme nalézt rychleji než probráním **prakticky všech k -tic** vrcholů grafu G .

To je i pro malé fixní hodnoty k , třeba $k = 10, 20$ v praxi neproveditelné. □

- Avšak vrcholové pokrytí velikosti k dokážeme nalézt jednoduchým algoritmem v čase $O(2^k \cdot n)$, což pro malé fixní hodnoty k dává skvěle **použitelný lineární algoritmus!**

Algoritmus 7.21. k -VC (vrcholové pokrytí)

Pro **fixní** k vyřešíme následující problém.

Vstup: Graf G .

Výstup: Lze v G najít vrcholové pokrytí o velikosti nejvýše k ? \square

Pro inicializaci položíme $C = \emptyset$ a $F = E(G)$.

- Pokud $F = \emptyset$, vrátíme C jako vrcholové pokrytí.
Jinak pokud $|C| \geq k$, vrátíme odpověď NE.
- Vybereme libovolnou hranu $f = uv \in F$ a pro oba její konce $x = u, v$ uděláme:
 - $C' = C \cup \{x\}$ a F' vytvoříme z F odebráním všech hran vycházejících z vrcholu x v G .
 - Rekurzivně zavoláme tento algoritmus pro G, C' a F' . \square

Kolik tento algoritmus provede rekurzivních volání celkem? Každý průchod generuje dvě další volání, ale jen do **fixní hloubky** k , takže ve výsledku bude čas výpočtu jen $O(2^k \cdot n)$.

Poznámka: Dnes je již známo, že faktor 2^k lze promyšlenějším přístupem „vylepšit“ na mnohem menší základ mocniny. (2006: 1.2738^k)