

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Sbírka teorie a příkladů

Teorie grafů

Jakub Adamec
Praha, 2026



Obsah

	Strana
1 Neorientované grafy	2
1.1 Základní pojmy a definice	2
1.1.1 Základní typy grafů	2
1.1.2 Sled, tah, cesta	2
1.1.3 Kružnice a cyklus	2
1.1.4 Stupně vrcholů	3
1.2 Skóre	3
1.3 Hledání grafu ke skóre	4
1.4 Příklad hledání grafu pro skóre	5
1.5 Další pojmy založené na stupních vrcholů	5
1.6 Tvrzení o podgrafech	5
1.7 Souvislý graf	6
1.8 Pojmy založené na vzdálenosti	6
1.8.1 Vzdálenost	6
1.8.2 Průměr	6
1.8.3 Excentricita	6
1.8.4 Centrum	6
1.8.5 Poloměr	7
2 Souvislé grafy	8
2.1 k -souvislost	8
2.2 Souvislost v grafu	8
2.3 Vrcholový řez	8
2.4 Vztah neúplnosti a vrcholového řezu	8
2.5 Věta o vztahu podgrafu a souvislosti	8
2.5.1 Pomocné lemma 1	9
2.5.2 Pomocné lemma 2	9
2.6 Artikulace	11
2.7 Operace nad 2-souvislými grafy	11
2.8 Tvrzení o 2-souvislých grafech a kružnicích	11
2.9 Věta o vrcholech na společné kružnici	11
2.10 Tvrzení o 2-souvislých grafech a $\%$ operaci	12
2.11 Algoritmus sestavení 2-souvislého grafu	13

2.12	Příklad sestrojení 2-souvislého grafu	13
2.13	Komponenty 2-souvislosti - blok	14
3	Hranově souvislé grafy	15
3.1	Hranový řez	15
3.2	Hranová souvislost	15
3.3	Most	15
3.4	Souvislost krajních vrcholů a mostů	15
3.5	Základní vlastnosti hranově souvislých grafů	15
3.6	Tvrzení o hranové a vrcholové souvislosti	16
3.6.1	Pomocné lemma 1	16
3.6.2	Pomocné lemma 2	16
4	Extremální teorie	17
4.1	Věta o souvislosti vrcholů a hran	17
4.2	Věta o souvislosti hran a úplném grafu	17
4.3	Turánovy grafy	18
4.4	Tvrzení počtu hran a Turánově grafu	18
5	Orientované grafy	20
5.1	Minimálně silně souvislý graf	20
5.2	Věta o minimálně silně souvislém grafu a jeho vrcholech	20
5.3	Algoritmus pro nalezení topologického očíslování	21
5.4	Tranzitivní uzávěr	21
5.5	Reflexivní a tranzitivní uzávěr	21
5.6	Tranzitivní redukce	21
5.7	Souvislost acyklických grafů a tranzitivní redukce	21
6	Hamiltonovské grafy	22
6.1	Cesta, kružnice, cyklus	22
6.2	(Ne)orientovaný graf	22
6.3	Chvátalova věta o Hamiltonovském grafu	22
6.4	Věta o skóre grafu a hamiltonovské kružnici	23
6.5	Turnaj	23
6.6	Vztah hamiltonovských cyklů a silné souvislosti	24
7	Toky v sítích	25
7.1	Síť	25

7.2	Tok v síti	25
7.3	Omezení toku	25
7.4	Různé vlastnosti sítí a toků	25
7.5	Řez oddělující zdroj od spotřebiče	25
7.6	Tvrzení o tocích a řezech	26
7.7	Tvrzení o přípustných tocích a řezech	27
7.8	Zlepšující cesta vůči toku f	27
7.9	Změna toku f	27
7.10	Změna toku podle zlepšující cesty je přípustný tok	27
7.11	Značková procedura	28
7.12	Tvrzení o výsledku značkové procedury	28
7.13	Věta o přípustném toku a maximálním přípustném toku	28
7.14	Přírůstková síť vzhledem k toku	28
7.15	Vrstvená síť	29
7.16	Cirkulace	29
7.17	Kapacita řezu	29
7.18	Souvislost přípustné cirkulace a řezu	29
8	Párování	30
8.1	Definice	30
8.2	Vrchol nasycený a volný v párování	30
8.3	Perfektní párování	30
8.4	Maximální párování	30
8.5	Střídavá cesta vůči párování P	30
8.6	Zlepšující cesta vůči párování P	31
8.7	Tvrzení o střídavé cestě	31
8.8	Věta o vrcholově disjunktních zlepšujících cestách	31
8.9	Souvislost perfektního párování a počtu komponent	32
8.10	Párování v bipartitních grafech	33
8.11	Věta o maximálním párování	34
8.12	Věta o nasycujícím párování	34
8.13	Tvrzení o vztahu stupňů vrcholů a nasycujícího párování	35
8.14	Tvrzení o existenci nasycujícího párování všech vrcholů	36
9	Pokrývání	37
9.1	Nezávislé množiny, nezávislost	37
9.2	Vrcholové pokrytí	37

9.3	Věta o vztahu vrcholového pokrytí a nezávislosti	37
9.4	Hranové pokrytí	38
9.5	Věta o vztahu hranového pokrytí a maximálního párování	38
10	Barvení	39
10.1	Hranové obarvení	39
10.2	Hranová barevnost	39
10.3	Věta o souvislosti hranové barevnosti a maximálním stupni grafu	39
10.4	Vrcholové obarvení	39
10.5	Barevnost grafu	39
10.6	Tvrzení o dvoubarevném grafu	39
10.7	Tvrzení o vztahu barevnosti grafu a nezávislosti grafu	40
10.8	Tvrzení o největším stupni vrcholu a barevnosti grafu	41
10.9	Příklad použití algoritmu sekvenčního barvení	41
10.10	Věta o souvislosti největšího stupně vrcholu a barevnosti grafu	42
11	Grafy a vektorové prostory	44
11.1	Těleso \mathbb{Z}_2	44
11.2	Symetrická diference	44
11.3	Charakteristická funkce očíslování	44
11.4	Tvrzení o isomorfnosti W_G	45
12	Kružnice a řezy	46
12.1	Řez	46
12.2	Věta o dvou různých řezech	46
12.3	Prostor řezů	47
12.4	Cutset	47
12.5	Tvrzení o souvislosti cutsetů	47
12.6	Tvrzení o řezu a kostrách	47
12.7	Prostor kružnic	48
12.8	Věta o prostoru kružnic a sudých stupních	48
12.9	Fundamentální systém kružnic	49
12.10	Tvrzení o nezávislosti fundamentálního systému kružnic	49
12.11	Fundamentální systém řezů	49
12.12	Tvrzení o nezávislosti fundamentálního systému řezů	49
12.13	Tvrzení o generování fundamentálních systémů grafu	49
12.14	Věta o sudém počtu společných hran a prostorech kružnic nebo řezů	50

Úvod

Tento text není psán jako učebnice, nýbrž jako soubor řešených příkladů, u kterých je vždy uveden celý korektní postup a případné poznámky řešitelů, které často nebývají formální, a tedy by neměly být používány při oficiálním řešení problémů, například při zkoušce. Jedná se pouze o pokus předat probíranou látku z různých úhlů pohledu, pokud by korektní matematický nebyl dostatečně výřečný.

Autor velmi ocení, pokud čtenáři zašlou své podněty, úpravy anebo připomínky k textu. Budu rád za všechnu konstruktivní kritiku a nápady na změny. Dejte mi také prosím vědět, pokud v textu objevíte překlepy, chyby a jiné.

Errata a aktuální verze textu bude na stránce <https://github.com/kned11k/XP01TGR>.

Poděkování. Rád bych poděkoval profesorce Marii Demlové nejen za zadání, okolo kterých je postavena celá sbírka, ale také za celý předmět Teorie grafů.

Text je vysázen makrem \LaTeX Leslieho Lamporta s využitím balíků `hyperref` Sebastiana Rahtze a Heiko Oberdiek. Grafy byly nakresleny pomocí maker `TikZ` Tilla Tantaua.

Stručné informace o textu

Všechny růžové texty jsou zároveň hypertextové odkazy.

U každého příkladu je pro ušetření místa a zpřehlednění sbírky řešení jednotlivých příkladů ihned pod zadáním.

1 Neorientované grafy

1.1 Základní pojmy a definice

Graf je soubor vrcholů, hran a vztahů incidence. Zapišeme jako $G = (V, E, \varepsilon)$, kde V je neprázdná množina vrcholů, E množina hran a ε říká „co hrany představují“, respektive

$$\varepsilon : E \rightarrow \{\{u, v\} \mid u, v \in V\}. \quad (1.1)$$

Jestliže pro dvě hrany $e_1, e_2 \in E$ platí, že $\varepsilon(e_1) = \varepsilon(e_2)$, pak se hrany e_1, e_2 nazývají *paralelní*. Pokud graf nemá paralelní hrany, nazýváme jej *prostý*. V takovém případě také stačí chápat graf jako dvojici $G = (V, E)$, kde hrany jsou neprázdné maximálně dvouprvkové podmnožiny V .

Smyčkou nazveme takovou hranu, která je $e \in E$ a pro $\varepsilon(e) = \{u, v\}$ platí $u = v$.

$\mathbb{S} \dots$ je množina všech neorientovaných prostých grafů bez smyček.

1.1.1 Základní typy grafů

Rozlišujeme 2 základní typy grafů, orientované a neorientované.

- (a) Orientovaný graf: $\varepsilon : E \rightarrow \{(u, v) \mid u, v \in V\}$; $u \in P_V(\varepsilon), v \in K_V(\varepsilon)$
- (b) Neorientovaný graf: $\varepsilon : E \rightarrow \{\{u, v\} \mid u, v \in V\}$; u, v jsou krajní vrcholy ε

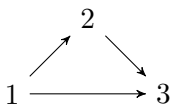
1.1.2 Sled, tah, cesta

- (a) Sled je taková posloupnost, která začíná a končí vrcholem a kde po každém vrcholu následuje hrana, tedy $v_1, e_1, v_2, e_2, \dots, v_k$.
V orientovaném případě vždy platí $P_V(e_1) = v_i, K_V(e_i) = v_{i+1}$. Neorientovaný pouze říká, že v_i a v_{i+1} jsou krajní vrcholy.
- (b) Tah je sled, ve kterém se nesmí opakovat hrany.
- (c) Cesta je sled, ve kterém se nesmí opakovat vrcholy, s výjimkou počátečního, ve kterém cesta může končit.

1.1.3 Kružnice a cyklus

Kružnice je uzavřená neorientovaná cesta v grafu, *cyklus* uzavřená orientovaná cesta.

Příklad kružnice:

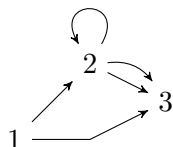


1.1.4 Stupně vrcholů

Pokud $G = (V, E, \varepsilon)$, pak

- vstupní stupeň v $d^-(v) = \|\{e \mid K_V(e) = v\}\|$
- výstupní stupeň v $d^+(v) = \|\{e \mid P_V(e) = v\}\|$
- stupeň v $d(v) = d^-(v) + d^+(v)$

Příklad



$$d^-(2) = 2$$

$$d^+(2) = 3$$

$$d(2) = 5$$

Pro $G = (V, E)$ je pouze $d(v) = \|\{e \mid v \text{ je krajní vrchol } e, \text{ smyčku počítáme } 2 \times\}\|$.

Z toho máme důsledek

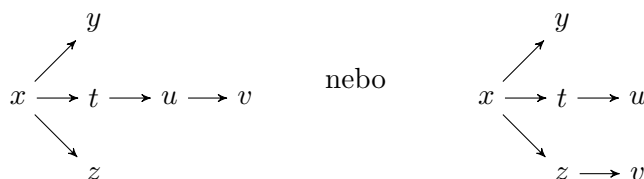
$$\sum_{v \in V} d(v) = 2\|E\| \quad (1.2)$$

Tedy každý graf má sudý počet vrcholů lichého stupně.

1.2 Skóre

Skóre grafu $(G \in \mathbb{S})$ je $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$, kde d_i je stupeň vrcholu v_i .
 $G=(V,E)$
 $\|V\|=d$

Mějme příklad skóre (1,1,1,2,2,3). Jak by mohl vypadat graf s takovým skóre?



Jak vidíme, skóre jednoznačně neurčuje graf. Můžeme ze skóre ale říct, jestli je takové skóre validním skóre nějakého grafu?

1.3 Hledání grafu ke skóre

Máme $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$, $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_n$.

Pak D je skóre některého grafu $G = (V, E)$ právě tehdy, když $D' = (d'_1, \dots, d'_{n-1})$ definovaná tak, že

$$d_i = \begin{cases} d_i & \text{pokud } i < n - d_n \\ d_i - 1 & \text{pokud } i \geq n - d_n \end{cases} \quad (1.3)$$

je skóre nějakého $G' \in \mathbb{S}$.

DŮKAZ.

\Leftarrow : Existuje G' pro D' . G vytvoříme tak, že k G' přidáme vrchol v_n a spojíme se všemi vrcholy $v_{n-d_n}, v_{n-d_n+1}, \dots, v_{n-1}$. Pak G má skóre D .

\Rightarrow : Máme G s $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$, kde d_1 je stupeň v_1 , d_2 je stupeň v_2 a tak dále.

Mějme $\mathcal{G} = \{G \mid G \text{ má } D\} \neq \emptyset$.

Cíl: Chceme dokázat, že mezi všemi grafy \mathcal{G} existuje jeden, který má vlastnost, že poslední vrchol je spojen hranami s d_n předcházejícími vrcholy.

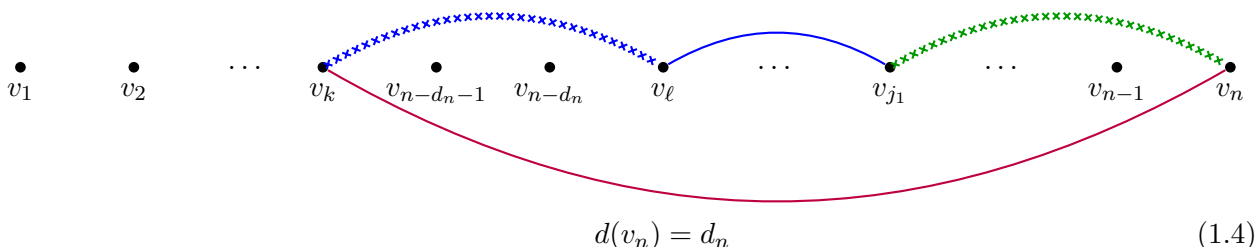
$\forall G \in \mathcal{G}$ mějme j_G , což bude největší index vrcholu, tak že $\{v_{j_G}, v_n\} \notin E$, tedy není mezi nimi hrana. To znamená, že pro ideální G chceme docílit $j_G = n - d_n - 1$.

Jako G_1 označíme ten $G_1 \in \mathcal{G}$, že j_{G_1} je nejmenší. (Může být j_{G_1} menší jak $n - d_n - 1$? Ne. v_n má stupeň d_n , a kdyby bylo j_{G_1} menší, tak by bylo vrcholů více, tzn. ne všechny by měly hranu s v_n .)

Označme $j_1 = j_{G_1}$.

Víme $j_1 \geq n - d_n - 1$. Teď nás ale zajímá, jestli $j_1 = n - d_n - 1$. Dokažme sporem.

Kdyby $j_1 > n - d_n - 1$, tak



Protože mezi d_n předcházejícími vrcholy je nějaký, který není spojen hranou s v_n , v našem případě v_{j_1} , nutně to znamená, že v_n musí mít hranu s nějakým vrcholem, řekněme v_k , který má ještě nižší index.

$$d(v_k) \leq d(v_{j_1}) \quad (1.5)$$

v_k je v pořadí dříve, než v_{j_1} , tudíž musí mít nutně menší roven stupeň. To ale nutně znamená, že v_{j_1} musí být spojen s alespoň jedním vrcholem, označme si ho v_ℓ , se kterým není spojen v_k , protože v_k je spojen s v_n , zatímco v_{j_1} není.

Vytvoříme

$$G_0 = (V_0, E_0)$$

$$V_0 = V_1 = V$$

$$E_0 = (E_1 \setminus \{\{v_n, v_k\}, \{v_\ell, v_{j_1}\}\}) \cup \{\{v_k, v_\ell\}, \{v_n, v_{j_1}\}\}$$

G_0 má skóre D a zároveň $j_{G_0} < j_1$. To ale znamená, že G_1 nebyl graf s nejmenším j_G , což je spor. A proto nejmenší j_G je $j_{G_0} = n - d_n - 1$.

Ověřili jsme, že takový graf určitě existuje, takže G' dostaneme z G_0 odstraněním v_n . G' pak má skóre D' .

■

1.4 Příklad hledání grafu pro skóre

Mějme $D = (1, 1, 2, 3, 3)$; $n = 5, d_n = 3; n - d_n = 2$.

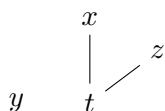
$D_1 = (1, 0, 1, 2) \xrightarrow{\text{uspo.}} (0, 1, 1, 2)$; $n_1 = 4, d_{n_1} = 2; n_1 - d_{n_1} = 2$.

$D_2 = (0, 0, 0) \dots$ tento graf je určitě existuje, jedná se o diskretní graf.

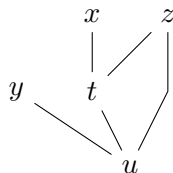
Kresleme postupně, začneme u D_2 .

$x \quad y \quad z$

Pak přidejme vrchol a hrany tak, aby skóre odpovídalo D_1 .



A nakonec tak, aby odpovídalo D .



1.5 Další pojmy založené na stupních vrcholů

Je dán neorientovaný prostý graf bez smyček. Pak definujeme

- $\delta(G) = \min \{d(v) \mid v \in V\}$ je minimální stupeň grafu G .
- $\Delta(G) = \max \{d(v) \mid v \in V\}$ je maximální stupeň grafu G .
- $d(G) = \frac{2|E|}{|V|} = \frac{\sum_{v \in V} d(v)}{|V|}$ je průměrný stupeň grafu G .
- $\varepsilon(G) = \frac{|E|}{|V|} = \frac{1}{2}d(G)$ je poměr počtu hran ku počtu vrcholů.

Označme $n = |V|$ a $m = |E|$. Pak $d(G) = \frac{2m}{n}$ a $\varepsilon(G) = \frac{m}{n}$.

Zřejmě platí $\delta(G) \leq d(G) \leq \Delta(G)$.

1.6 Tvzení o podgrafech

Pro každý $G \in \mathbb{S}$ s $|E| \geq 1$ existuje podgraf H takový, že $\delta(H) > \varepsilon(H) \geq \varepsilon(G)$.

DŮKAZ. Máme dvě situace

1. Buď $\delta(G) > \varepsilon(G)$, pak $H = G$.
2. Nebo $\delta(G) \leq \varepsilon(G)$, tj. $v_1 \in V, d(v_1) = \delta(G) \leq \frac{m}{n}$.

Dokažme tedy ještě platnost pro 2.

Označme $G_1 := G \setminus v_1$. A tedy $m_1 = m - \delta(G)$ a $n_1 = n - 1$.

Chceme $\underbrace{\frac{m_1}{n_1}}_{\varepsilon(G_1)} \geq \underbrace{\frac{m}{n}}_{\varepsilon(G)}$.

$$\frac{m_1}{n_1} - \frac{m}{n} = \frac{m - \delta(G)}{n - 1} - \frac{m}{n} = \frac{nm - n\delta(G) - nm + m}{(n - 1)n} = \frac{m - n\delta(G)}{(n - 1)n}, \delta(G) \leq \frac{m}{n}, m \geq n\delta(G) \quad (1.6)$$

A tedy

$$m - n\delta(G) \geq 0 \quad (1.7)$$

$$n(n - 1) \geq 0 \quad (1.8)$$

Což dává

$$m \geq n\delta(G), \text{ tj. } \varepsilon(G_1) \geq \varepsilon(G) \quad (1.9)$$

Algoritmus dále pokračuje:

$$\text{Pokud } \begin{cases} \delta(G_1) > \varepsilon(G_1), & \text{tak } H := G_1, \\ \delta(G_1) \leq \varepsilon(G_1), & \text{tak } v_2 \in V \setminus \{v_1\}, d_{G_1}(v_2) = \delta(G_1). \end{cases} \quad (1.10)$$

A tedy $G_2 := G_1 \setminus v_2$, $\varepsilon(G_2) \geq \varepsilon(G_1)$. A takto postupně dále. Algoritmus končí a nikdy nedostaneme prázdný graf, díky předpokladu, že G mělo alespoň jednu hranu, tedy $\varepsilon(G) > 0$. ■

1.7 Souvislý graf

Graf nazýváme souvislým, jestliže každé jeho dva vrcholy jsou spojeny neorientovanou cestou.

1.8 Pojmy založené na vzdálenosti

1.8.1 Vzdálenost

Mějme $G \in \mathbb{S}$, $G = (V, E)$, $x, y \in V$. Vzdálenost x, y je $d_G(x, y)$, což značí počet hran v nejmenší početné cestě z x do y , když existuje cesta. Jinak $d_G(x, y) = \infty$.

1.8.2 Průměr

Ať G je **souvislý**. Průměr G je $\text{diam}(G) = \max \{d_G(x, y) \mid x, y \in V\}$.

1.8.3 Excentricita

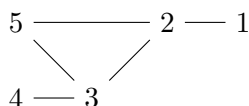
Ať G je **souvislý**. Excentricita vrcholu $v \in V$ je $\text{ex}(v) = \max \{d_G(v, x) \mid x \in V\}$.

1.8.4 Centrum

Ať $v \in V$ je centrální $\rightarrow \text{ex}(v)$ je nejmenší mezi $\text{ex}(x), x \in V$. Centrum (staře *střed*) grafu je $C(G) = \{v \mid v \text{ je centrální}\}$.

Uveďme si příklad.

Zde $C(G) = \{2, 3, 5\}$.



1.8.5 Poloměr

Poloměr G je $\text{rad}(G) = \max\{d_G(v, C(G)) \mid v \in V(G)\}$.

Platí $\text{rad}(G) \leq \underbrace{\text{diam}(G) \leq 2 \text{rad}(G)}_{\star}$.

Zdůvodnění \star . Chceme $d_G(x, y) \leq 2 \text{rad}(G) \forall x, y \in V$.

$$x \xrightarrow{P_1} v \xrightarrow{P_2} y$$

P_1, P_2 sled z x do y o $\leq 2 \text{rad}(G)$.

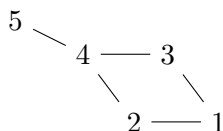
P_1, P_2 obsahuje cestu P z x do y o $\leq P_1, P_2 \leq 2 \text{rad}(G)$.

2 Souvislé grafy

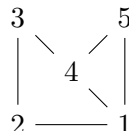
2.1 k -souvislost

$G = (V, E) \in \mathbb{S}$. Řekněme, že G je k -souvislý, pokud $|V| > k$ a pro každou $X \subseteq V$, $|X| = k - 1$ je $G \setminus X$ souvislý.

Mějme



Je souvislý, ale ne 2-souvislý.



Je 2-souvislý.

Každý graf je 0-souvislý, i nesouvislý graf je 0-souvislý.

1-souvislý je každý souvislý graf.

2.2 Souvislost v grafu

Souvislost v grafu G je největší k takové, že G je k -souvislý. Značíme $\kappa(G)$.

Úplný graf má $\kappa(G) = |V| - 1$.

2.3 Vrcholový řez

Vrcholový řez grafu $G \in \mathbb{S}$ je množina vrcholů $X \subsetneq V$, že $G \setminus X$ je nesouvislý.

2.4 Vztah neúplnosti a vrcholového řezu

Je-li $G \in \mathbb{S}$, G není úplný, pak $\kappa(G) = k$ právě tehdy, když nemá vrcholový řez o $k - 1$ vrcholech a má **vrcholový řez** o k vrcholech.

2.5 Věta o vztahu podgrafu a souvislosti

Mějme $G \in \mathbb{S}$, $G = (V, E)$, splňující $d(G) \geq 4k$. Pak G obsahuje podgraf, který je **k -souvislý**.

DŮKAZ.

- Pro $k = 0$ triviální. Všechny grafy jsou 0-souvislé.
- Pro $k = 1$: Pokud $\frac{2m}{n} \geq 4k$, tedy $m \geq 1$ (takže má hranu), tak sama hrana je 1-souvislý podgraf.
- Pro $k \geq 2$: tj. $\frac{2m}{n} \geq 4k$

$$2m \geq 4kn \quad (2.1)$$

$$m \geq 2kn \quad (2.2)$$

$$m \geq 4n \text{ (dosazeno } k \geq 2) \quad (2.3)$$

Průběh důkazu $d(G) \geq 4k, k \geq 2 \xrightarrow{\text{Lemma 1}} \text{(i), (ii)} \xrightarrow{\text{Lemma 2}} G \text{ má } \textbf{k-souvislost}$.

2.5.1 Pomocné lemma 1

Pokud $k \geq 2$ a $d(G) \geq 4k$, pak

- (i) $n \geq 2k - 1$
- (ii) $m \geq (2k - 3)(n - k + 1) + 1$

DŮKAZ. (i) Kdyby ne, tak $n < 2k - 1$.

$$n + 1 < 2k \quad (2.4)$$

$$\frac{n + 1}{2} < k \quad (2.5)$$

Teď použijme předpoklad $m \geq 2kn > (n + 1)n$. A to nejde, protože úplný neorientovaný graf bez smyček má $\frac{n(n-1)}{2}$ hran.

(ii) Mějme

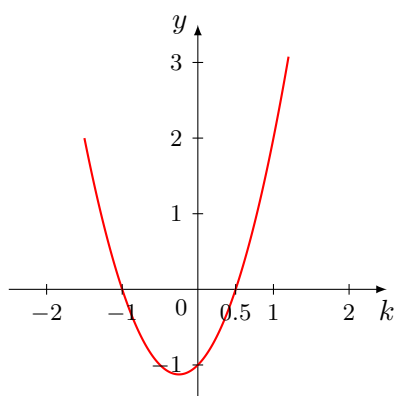
$$m \geq 2kn - ((2k - 3)(n - k + 1) + 1) = 2kn - (2kn - 2k^2 + 2k - 3n + 3k - 3 + 1) \quad (2.6)$$

$$= 2k^2 - 5k + 3n + 2 \quad (2.7)$$

Teď aplikujme již dokázané (i):

$$2k^2 - 5k + 3n + 2 \geq 2k^2 - 5k + 6k - 3 + 2 = 2k^2 + k - 1 \quad (2.8)$$

Vyšetřeme průběh funkce



Funkce je očividně konvexní, a protože nás zajímá průběh funkce na $k \geq 2$, můžeme prohlásit, že $2k^2 + k - 1 > 0$. ■

2.5.2 Pomocné lemma 2

Pokud G splňuje (i) a (ii), tak G má **k -souvislý** podgraf.

DŮKAZ. G není **k -souvislý**.

Indukcí podle $|V| = n$.

Základní krok: $n \stackrel{(i)}{=} 2k - 1$, $m \geq (2k - 3)(n - k + 1) + 1$.

Dosaďme $k = \frac{n+1}{2}$:

$$m \geq (n + 1 - 3) \left(n - \frac{n + 1}{2} + 1 \right) + 1 = \frac{(n - 2)(n + 1)}{2} + 1 = \frac{n(n - 1)}{2} \quad (2.9)$$

A tedy graf je úplný na n vrcholech. Teď potřebujeme $n > k$.

$$n = 2k - 1 = k + \underbrace{k - 1}_{\geq 1} \geq k + 1 \quad (2.10)$$

Indukční krok: Každý graf G' splňující (i) a (ii) s méně než n vrcholy (s alespoň $2k - 1$ vrcholy) má k -souvíslý podgraf.

Vezmeme G splňující (i) a (ii) s n vrcholy.

(a) Kdyby $\delta(G) \leq 2k - 3$, tak $v \in V$ s $d_G(v) \leq 2k - 3$.

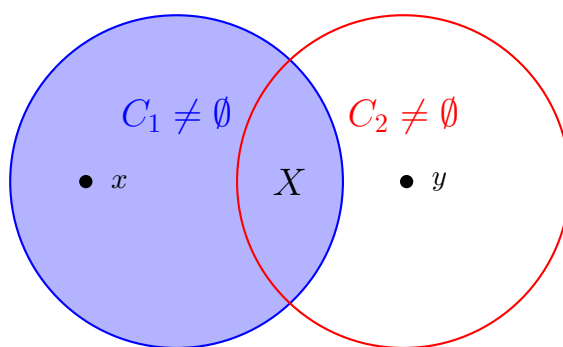
$G \setminus v = G_1$, $n_1 = n - 1$,

$$m_1 \geq m - (2k - 3) \geq (2k - 3)(n - k + 1) + 1 - (2k - 3) = (2k - 3)(\underbrace{n - 1 - k + 1}_{n_1}) + 1 \quad (2.11)$$

Tudíž G_1 má k -souvíslý podgraf, tedy i ho má G .

(b) Ať $\delta(G) > 2k - 3$, $\delta(G) \geq 2k - 2$; $\forall v \in G, d_G(v) \geq 2k - 2$.

G není k -souvíslý, tj. $X \subseteq V$, $|X| = k - 1$ a X je vrcholový řez.



$G \setminus X$ je nesouvíslý. Vsech je $(k - 1) + (k - 1) + 1$. $d_G(x) \geq 2k - 2$.

G_1 graf indukovaný C_1 v X má alespoň $2k - 1$ vrcholů.

Kdyby G_1 i G_2 nesplňovaly (ii), G_i má n_i vrcholů a m_i hran, $i = 1, 2$.

$$m_i \not\geq (2k - 3)(n_i - k + 1) + 1, \quad \text{tj. } m_i \leq (2k - 3)(n_i - k + 1) \quad (2.12)$$

$m_1 + m_2 \geq m$ víme. $n_1 + n_2 = n + (k - 1)$, počítali jsme vrcholy v X dvakrát.

$$m \leq n_1 + n_2 \leq (2k - 3)(n_1 - k + 1) + (2k - 3)(n_2 - k + 1) = (2k - 3)(n_1 + n_2 - 2k + 2) \quad (2.13)$$

$$= (2k - 3)(n + (k - 1) - 2k + 2) \quad (2.14)$$

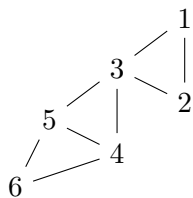
$$= (2k - 3)(n - k + 1) \quad (2.15)$$

Tedy spor s (ii). ■

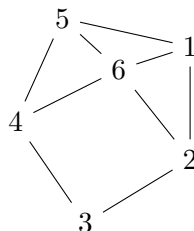
2.6 Artikulace

Vrchol v grafu G se nazývá artikulace, jestliže $G \setminus v$ má více komponent souvislosti, než G .

Platí. $G \in \mathbb{S}$ s alespoň 3 vrcholy je **2-souvislý** \iff je 1-souvislý a nemá artikulaci.



Není 2-souvislý.



Je 2-souvislý.

2.7 Operace nad 2-souvislými grafy

Mějme operace

- (a) $G \in \mathbb{S}$ a $e \in \{u, v\}$; $u, v \in V(G)$, $e \notin E(G)$, pak $G + e$ je graf s $V(G)$ a $E(G) \cup \{e\}$.
Je-li G **2-souvislý**, tak $G + e$ je 2-souvislý.
- (b) $G \in \mathbb{S}$, $G = (V, E)$, $e \in E$, pak $G \% e = (V \cup \{w\}, (E \setminus \{e\}) \cup \{e_1, e_2\})$.
„Do hrany e vložíme vrchol se stupněm 2.“

2.8 Tvzení o 2-souvislých grafech a kružnicích

Každý **2-souvislý** graf obsahuje **kružnici**.

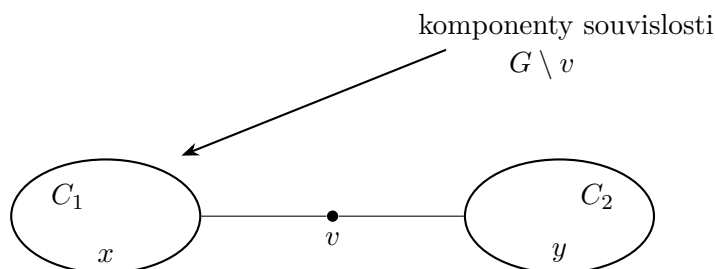
DŮKAZ. Každý 2-souvislý graf je **souvislý**. Kdyby souvislý neobsahoval kružnici, jedná se o strom. A každý strom s alespoň 3 vrcholy má **artikulaci**. Protože stromy nemohou být 2-souvislé, a zároveň všechny ostatní souvislé grafy obsahují kružnici, i každý 2-souvislý graf obsahuje kružnici. ■

2.9 Věta o vrcholech na společné kružnici

$G \in \mathbb{S}$, $G = (V, E)$ je **2-souvislý** právě tehdy, když každé 2 vrcholy $u \neq v$ leží na společné **kružnici**.

DŮKAZ.

\Leftarrow : Předpokládejme, že pro každé $u \neq v$ existuje kružnice K , která je obsahuje. To znamená, že graf je **souvislý**. Musíme ještě dokázat, že v něm neexistuje **artikulace**. Kdyby graf měl artikulaci v :



alespoň jeden vrchol
 $u \in C_1$ a C_2 .

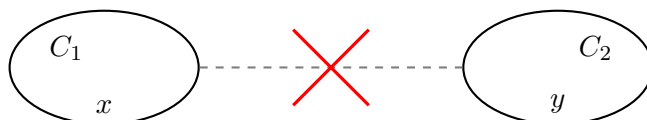
Znamenalo by to, že v jedné komponentě souvislosti by ležely alespoň 2 vrcholy (protože máme minimálně 3 vrcholy). Zároveň ale vrchol $x \in C_1$ a $y \in C_2$ rozhodně neleží na společné kružnici, tudíž graf nemůže mít artikulaci, takže G je 2-souvislý.

\Rightarrow : Předpokládejme, že G je **2-souvislý**. Dokažme indukcí podle vzdálenosti $d(u, v)$.

(a) Základní krok: u, v s $d(u, v) = 1$.

Budeme se snažit ukázat, že když zrušíme hranu, souvislost zůstane.

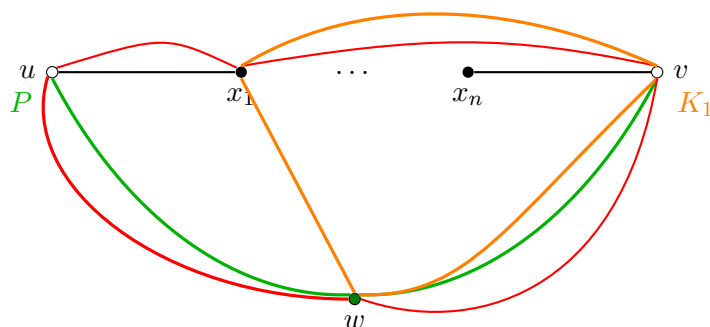
(1) $G \setminus e$ je souvislý. Kdyby ne, tak



Přitom G má alespoň 3 vrcholy, tedy v jedné komponentě leží alespoň 2 vrcholy. BÚNO existuje $x \in C_1$, $x \neq u$, tj. u je artikulace. Což je spor. Takže $G \setminus e$ je souvislý. Tedy existuje cesta P z u do v . Pak P je kružnice obsahující u, v .

(b) Indukční předpoklad: Pro každé x, y s $d(x, y) = n \geq 1$ existuje kružnice obsahující x, y .

(c) Indukční krok: Vezmeme libovolné u, v s $d(u, v) = n + 1$. Vyberme nejkratší cestu:



Použijme I.P.: tj. existuje kružnice K_1 obsahující x_1, v . x_1 není **artikulace**, tj. existuje cesta P z u do v neobsahující x_1 . w je prvním vrcholem cesty P , který leží na K_1 . Použijeme **cestu** P , abychom se dostali z u do w , následně se přes K_1 dostaneme do v . Dále po kružnici do x_1 , kde si musíme vybrat trasu, která nevede do w , tj. směrem do u . A tím uzavřeme **kružnici** obsahující u a v .

■

2.10 Tvrzení o 2-souvislých grafech a % operaci

$G \in \mathbb{S}$ je **2-souvislý** právě tehdy, když $G \% e$, $e \in E(G)$ je 2-souvislý.

DŮKAZ.

\Rightarrow : Předpokládejme, že G je 2-souvislý, tj. souvislý a nemá **artikulaci**.

Vrchol w , který vložíme do hrany e , není artikulace. A žádný jiný se nemohl stát artikulací, to by už musely být artikulací předtím, a tedy by se v prvé řadě nejednalo o 2-souvislý.

\Leftarrow : Předpokládejme, že $G \setminus e$ je **2-souvislý**, tj. každé 2 vrcholy leží na společné **kružnici**.

$$x, y \in V(G) \dots \text{existuje } K \text{ v } G \setminus e \text{ obsahující } x, y \left\{ \begin{array}{ll} K \text{ neobsahuje } e_1, e_2 & K \text{ je kružnice } G. \\ K \text{ obsahuje } e_1, e_2 & \text{odstraníme } e_1, e_2 \\ & \text{z } K, \text{ nahradíme } e \\ & \text{a máme } K'. \end{array} \right. \quad (2.16)$$

K' je kružnice v G .

■

2.11 Algoritmus sestrojení 2-souvislého grafu

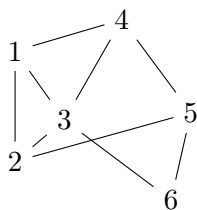
Každý 2-souvislý graf $G \in \mathbb{S}$, $G = (V, E)$ je možné sestrojit postupem:

$$G_0 := K \text{ je nějaká } \textbf{kružnice} \quad (2.17)$$

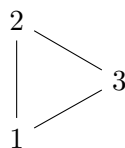
Máme-li G_i , že $G_i \neq G$, tak G_{i+1} je G_i , ke kterému přidáme **cestu** P (v G), která vede mezi 2 vrcholy z G_i a zároveň všechny vrcholy této cesty nejsou v G_i .

2.12 Příklad sestrojení 2-souvislého grafu

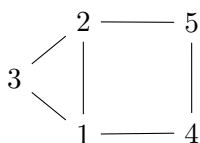
Mějme **2-souvislý** graf, tj. bez **artikulace**:



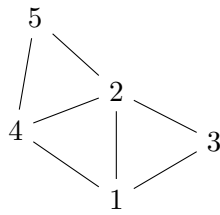
Začneme G_0 :



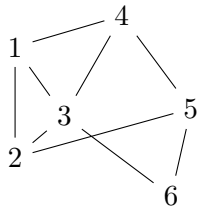
Přidáme cestu z 1 do 2, tedy G_1 :



Teď přidáme cestu z 3 do 4, G_2 :



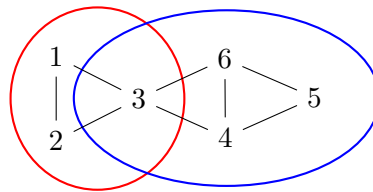
A posledně z 3 do 5, $G_3 = G$:



2.13 Komponenty 2-souvislosti - blok

Mějme $G \in \mathbb{S}$, $G = (V, E)$, pak $A \subseteq V(G)$ se nazývá *blok*, jestliže je maximální podmnožina taková, že jí indukovaný podgraf je **2-souvislý**.

Pozn. maximální v tomto kontextu neznamena nejpočetnější, nýbrž, že do takové podmnožiny již nelze přidat další vrchol.



Když nejsou jednotlivé bloky vzájemně disjunktní, tak jejich průnik je **artikulace**.

3 Hranově souvislé grafy

3.1 Hranový řez

Množině $F \subseteq E$, že $G \setminus F$ je **nesouvislá**, se říká hranový řez.

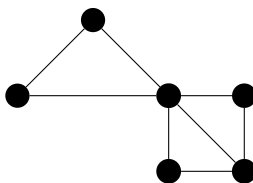
3.2 Hranová souvislost

Máme $G \in \mathbb{S}$, $G = (V, E)$, pak G je k -hranově souvislý, jestliže neexistuje $F \subseteq E$, $|F| \leq k - 1$, taková, že $G \setminus F$ je **nesouvislá**.

Hranová souvislost grafu G , značíme $\lambda(G)$, je největší k , že G je k -hranově souvislý.

*Pozn. největší znamená, že nemá **hranový řez** s $\lambda(G) - 1$ hranami, ale má s $\lambda(G)$ hranami.*

Mějme 2-hranově souvislý graf:



3.3 Most

Nazvěme most hranu $e \in E(G)$, že $\{e\}$ je **hranový řez**.

3.4 Souvislost krajních vrcholů a mostů

Každý most má alespoň jeden krajní vrchol, který je **artikulace**.

DŮKAZ. Nechť $e = \{u, v\}$ je most v souvislém grafu G , kde $|V(G)| \geq 3$. Dle definice mostu platí, že graf $G \setminus e$ není **souvislý** a skládá se ze dvou komponent souvislosti. Označme K_u komponentu obsahující vrchol u a K_v komponentu obsahující vrchol v .

Protože má graf G alespoň 3 vrcholy, musí alespoň jedna z komponent K_u nebo K_v obsahovat více než jeden vrchol. **BŮNO** předpokládejme, že $|V(K_u)| \geq 2$.

To znamená, že ve komponentě K_u existuje vrchol w různý od u (tj. $w \in V(K_u), w \neq u$). Protože e je **most**, jediná **cesta** v grafu G z vrcholu w do vrcholu v vede přes hranu e , a tedy nutně prochází vrcholem u .

Pokud z grafu G odstraníme vrchol u , neexistuje žádná cesta mezi w a v , protože jediná spojnice byla přerušena. Graf $G \setminus u$ tedy není souvislý (vrcholy w a v leží v různých komponentách).

Z toho plyne, že vrchol u je **artikulace**. ■

3.5 Základní vlastnosti hranově souvislých grafů

G je **0-hranově souvislý** pro každé G .

G je 1-hranově souvislý $\iff G$ je **souvislý**.

G je 2-hranově souvislý $\iff G$ je souvislý a nemá **most**.

3.6 Tvrzení o hranové a vrcholové souvislosti

Platí, že $\kappa(G) \leq \lambda(G)$.

DŮKAZ.

3.6.1 Pomocné lemma 1

Pro každý **prostý** graf G bez smyček a jeho libovolnou hranu e platí

$$\alpha(G) - 1 \leq \alpha(G \setminus e) \leq \alpha(G). \quad (3.1)$$

DŮKAZ. Jestliže hrana e leží v některém neméně početném **hranovém řezu** F , pak $F \setminus \{e\}$ je hranový řez grafu $G \setminus e$. V opačném případě mají grafy G a $G \setminus e$ stejnou **hranovou souvislost**.

3.6.2 Pomocné lemma 2

Pro každý **prostý** graf G bez smyček a jeho libovolnou hranu e platí

$$\kappa(G) - 1 \leq \kappa(G \setminus e) \leq \kappa(G). \quad (3.2)$$

DŮKAZ. Stačí dokázat trošku jiné tvrzení: Pro každý prostý graf H bez smyček platí

$$\kappa(H + e) \leq \kappa(H) + 1. \quad (3.3)$$

(Graf $H + e$ má stejnou množinou vrcholů a jednu hranu e navíc)

Uvažujme některý nejméně početný vrcholový řez A grafu H ; tj. $H \setminus A$ je **nesouvislý**; označme jeho komponenty souvislosti C_1, C_2, \dots, C_r . Navíc $\kappa(H) = |A|$.

Pak v následujících případech platí $\kappa(H + e) = \kappa(H)$:

- hrana e má alespoň jeden krajní vrchol v množině A ;
- hrana e leží uvnitř některé z komponent souvislosti C_1, C_2, \dots, C_r ;
- hrana e spojuje dvě komponenty souvislosti a $r > 2$.

Uvažujme případ $r = 2$ a alespoň jedna komponenta C_1 a C_2 je alespoň dvouprvková. Označme x vrchol incidentní s hranou e , který leží v komponentě s alespoň 2 vrcholy. Pak $A' = A \cup \{x\}$ je **vrcholový řez** grafu $H + e$ a $\kappa(H + e) \leq \kappa(H) + 1$.

Zbývá případ, kdy $H \setminus A$ obsahuje dvě komponenty, obě jsou jednoprvkové a hrana e je spojuje. Pak ale platí

$$\kappa(H + e) \leq |V| - 1 = |V| - 2 + 1 = |A| + 1 = \kappa(H) + 1. \quad (3.4)$$

Nyní se vraťme k důkazu 3.6.

Indukcí podle $m = |E(G)|$: Jestliže $m < |V(G)| - 1$, je G nesouvislý graf a $\kappa(G) = 0 = \lambda(G)$.

Předpokládejme, že $\lambda(G) > 0$ a předpokládejme, že tvrzení platí pro všechny grafy s méně než m hranami. Zvolme F některou nejméně početnou množinu hran takovou, že $G \setminus F$ je nesouvislý graf. Dále vyberme hranu e z F . Pak $G \setminus e$ má méně hran, proto splňuje nerovnost $\kappa(G \setminus e) \leq \lambda(G \setminus e)$. Odtud

$$\kappa(G) - 1 \leq \kappa(G \setminus e) \leq \lambda(G \setminus e) = \lambda(G) - 1. \quad (3.5)$$

■

4 Extremální teorie

4.1 Věta o souvislosti vrcholů a hran

Mantel. Máme $G \in \mathbb{S}$ s n vrcholy, m hranami, který nemá K_3 . Pak $m \leq \frac{n^2}{4}$.

DŮKAZ.

Pomocná definice. Množina A je nezávislá $A \subseteq V(G)$ pokud pro každou $e = \{u, v\}$, jestliže $u \in A$, platí $v \notin A$. Množina A je nezávislá právě tehdy, když v ní žádné dva vrcholy nejsou spojené hranou.

Ať A je nejpočetnější nezávislá množina a $B = V \setminus A$. G nemá K_3 : každá množina sousedů vrcholů $v \in V$ je nezávislá množina.

$$m \leq \sum_{N \in B} d(v) \leq \underbrace{(n-k)}_{|B|} \cdot \underbrace{k}_{|A|} \quad (4.1)$$

Každá hrana má alespoň 1 krajní vrchol v B . Pro které k je $(n-k)k$ největší?

$$f(x) = (n-x)x \quad (4.2)$$

$$f'(x) = n - 2x \implies f'(x) = 0 \iff x = \frac{n}{2} \quad (4.3)$$

$$f''(x) = -2 \quad (4.4)$$

Protože jsme v \mathbb{N} , tak $\lceil \frac{n}{2} \rceil \cdot \lfloor \frac{n}{2} \rfloor = \frac{n+1}{2} \frac{n-1}{2} = \frac{n^2-1}{4} \leq \frac{n^2}{4}$. ■

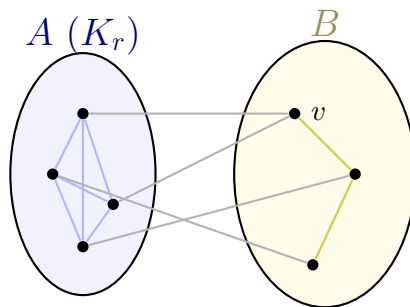
4.2 Věta o souvislosti hran a úplném grafu

Máme $G \in \mathbb{S}$, který neobsahuje K_{r+1} (úplný graf na $r+1$ vrcholech), $r \geq 2$. Pak

$$m \leq \frac{r-1}{r} \frac{n^2}{2}. \quad (4.5)$$

DŮKAZ. Vezměme graf G bez K_{r+1} s nejméně hranami (přidáním hrany by vznikl K_{r+1}). Tedy G má K_r . Ať A je množina vrcholů K_r a B je $V(G) \setminus A$, $|B| = n - r$. Každý vrchol $v \in B$ má max $r-1$ sousedů v A (jinak by $A \cup \{u\}$ tvořil K_{r+1}).

m rozdělíme na hrany v A (hrany úplného grafu), hrany mezi A a B a hrany v B :



$$m = m_A + m_{A-B} + m_B \leq \frac{r(r-1)}{2} + (n-r)(r-1) + m_B \quad (4.6)$$

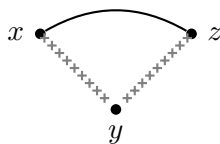
a graf indukovaný B neobsahuje K_{r+1} a má maximální počet hran.

$$m_B < m \quad (4.7)$$

$$n-r = |B| < n \quad (4.8)$$

Použijme tedy silnou indukci, dle počtu vrcholů $n = |V(G)|$.

2) $G'' = G \setminus \{x, y, z\}$. $m(G) \leq m(G') + d(x) + d(y) + d(z) - 1$ (-1 za hranu $\{x, z\}$).



G''' z G odstraníme hrany $\{x, t\}, t \in N(x)$ a $\{z, v\}, v \in N(z)$ a přidáme hrany $\{x, u\}, u \in N(y)$ a $\{z, u\}, u \in N(y)$.

$$m(G''') = m(G'') + 3d(y) > m(G'') + d(x) + d(y) + d(z) - 1 \geq m(G) \quad (4.17)$$

G'' nemá K_{r+1} , což je spor. ■

\mathbb{R} je tedy ekvivalence. Třídy ekvivalence \mathbb{R} jsou maximální množiny, že graf jimi indukovaný nemá hranu. G má nejvíce hran, tj. G má K_r , stran má r , je tedy úplný r -partitní graf.

Potřebujeme $||S_i| - |S_j|| \leq 1$. Dokažme sporem. Kdyby ne, tak $|S_1| \geq |S_2| + 2$. Označme $|S_1| = n_1$ a $|S_2| = n_2$.

Graf měl původně $n_1 \cdot n_2$ hran. Nově má

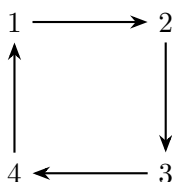
$$(n_1 - 1)(n_2 + 1) = n_1 n_2 \underbrace{- n_2 + n_1}_{\substack{\geq 2 \\ \geq 1}} - 1. \quad (4.18)$$

A to je **Turánův** graf. ■

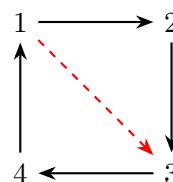
5 Orientované grafy

5.1 Minimálně silně souvislý graf

Silně **souvislý** graf se nazývá minimálně silně souvislý, jestliže $G \setminus \{e\}$ není silně souvislý pro každou hranu $e \in E(G)$.



Minimálně silně souvislý
(odebráním libovolné hrany se poruší)



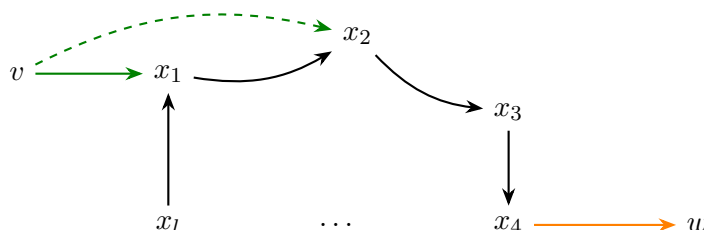
Není minimální
(bez červené hrany je stále silně souvislý)

5.2 Věta o minimálně silně souvislém grafu a jeho vrcholech

Každý minimálně silně souvislý graf G s alespoň 2 vrcholy má 2 vrcholy stupně 2.

DŮKAZ. Indukcí podle rozdílu $k = m - n$, kde m je počet hran a n počet vrcholů.

- Základní krok. $k = 0$, tj. $m = n$. Takže se jedná o **cyklus**. Všechny vrcholy cyklu mají stupeň 2.
- Indukční krok. Každý graf G (minimálně silně souvislý s $m(G) - n(G) < k$) má 2 vrcholy stupně 2.
Uvažujme G minimálně silně souvislý s $m - n = k > 0$. V G si vybereme cyklus C s největším počtem hran (tedy vrcholů). C má l vrcholů:



$\forall v \notin C$ existuje maximálně 1 hrana $(v, x_i), x_i \in C$.

$\forall w \notin C$ existuje maximálně 1 hrana $(x_j, w), x_j \in C$.

Vytvoříme G' , což bude G , ve kterém nahradíme cyklus C vrcholem v_C .

$$m(G') - n(G') = m - l - (n - l + 1) = m - n - 1 = k - 1 \quad (5.1)$$

G' má alespoň 2 vrcholy stupně 2, není-li ani jeden z nich v_C , jsou to vrcholy G stupně 2. Když G' bude mít pouze 2 vrcholy, v_C a x , stupně 2, tak musíme řešit 2 případy:

- 1) Když má cyklus alespoň 3 vrcholy ($l \geq 3$), pak v C existuje vrchol stupně 2.
- 2) Když C má jen 2 vrcholy, když se zkombinují orientované hrany do neorientovaných, tak se jedná o strom. A každý strom s alespoň 2 vrcholy má 2 listy, tj. vrcholy stupně 1. A to jsou přesně ty 2 vrcholy stupně 2, které hledáme.

5.3 Algoritmus pro nalezení topologického očíslování

Algoritmus pro nalezení topologického očíslování v acyklickém grafu.

Pozn.: Každý acyklický graf má alespoň 1 vrchol se stupněm 0.

- 1) Spočítáme vstupní stupně vrcholů. Do množiny M vložíme všechny v s $d^-(v) = 0$, $i = 1$.
- 2) Vybereme $v_i \in M$ a odstraníme. Pro každé $(v_i, w) \in E$: $d^-(w) := d^-(w) - 1$, if $d^-(w) = 0$, pak $M := M \cup \{w\}$. $i++$.
- 3) Algoritmus končí pokud $M = \emptyset$ a zároveň existuje alespoň jeden vrchol u s $d^-(u) > 0$, pak topologické očíslování neexistuje, nebo jsou všechny vrcholy topologicky očíslovány.

5.4 Tranzitivní uzávěr

Mějme orientovaný graf G . G^t je tranzitivní uzávěr, když $G = (V, E)$, tak $G^t = (V, E^t)$, kde $(u, v) \in E^t$, právě tehdy, když existuje netriviální orientovaná cesta z u do v .

Platí, že G je silně souvislý $\iff G^t$ je úplný orientovaný graf se všemi smyčkami.

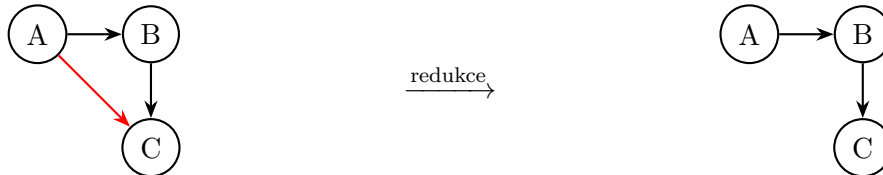
5.5 Reflexivní a tranzitivní uzávěr

G^* je reflexivní a tranzitivní uzávěr $G^* = (V, E^*)$, $E^* = E^t \cup \{(u, v) \mid u \in V\}$.

Lze také říct, že platí to samé, jako pro tranzitivní uzávěr, jen vyškrtneme **netriviální**.

5.6 Tranzitivní redukce

$G = (V, E)$ je orientovaný graf. Jeho podgraf $G' = (V, E')$ je tranzitivní redukce G pokud $G^t = (G')^t$, a žádný vlastní podgraf této redukce G'' již nemá tuto vlastnost.



5.7 Souvislost acyklických grafů a tranzitivní redukce

Je-li $G \in \mathbb{S}$ acyklický, pak má jedinou tranzitivní redukci.

DŮKAZ. Sporem. Mějme G acyklický, tedy má **topologické očíslování** vrcholů $v_1, v_2, \dots, v_{n-1}, v_n$.

Kdyby $G_1 = (V, E_1), G_2 = (V, E_2)$ byly 2 různé tranzitivní redukce, tak

$$(E_1 \setminus E_2) \cup (E_2 \setminus E_1) \neq \emptyset. \quad (5.2)$$

Vyberme z $(E_1 \setminus E_2) \cup (E_2 \setminus E_1)$ hranu $e = (v_i, v_j)$, $i < j$, která má nejmenší rozdíl $j - i$. **BŮNO**: $e \in (E_1 \setminus E_2)$, tedy $e \notin E_2$, ale $e \in E_2^t$. Tj. musí existovat v G_2 **cesta** z v_i do v_j , která má alespoň 2 hrany.

$$v_i, e_1, e_2, \dots, e_k, v_j, k \geq 2. \quad (5.3)$$

G_1 tam je z redukce, tak alespoň e_a , $a = 1, \dots, k$ není v E_1 .

$$e_a = (v_a, v_b), a < b. \quad (5.4)$$

$$i \leq a < b \leq j \quad (5.5)$$

Alespoň jedna z \leq je ve skutečnosti $<$, tedy $b - a < j - i$. Což je spor. ■

6 Hamiltonovské grafy

6.1 Cesta, kružnice, cyklus

Cesta (kružnice, cyklus) je hamiltonovská(ský), jestliže prochází všemi vrcholy.

6.2 (Ne)orientovaný graf

(Ne)orientovaný graf je Hamiltonovský, jestliže obsahuje hamiltonovský(skou) cyklus (kružnici).

6.3 Chvátalova věta o Hamiltonovském grafu

Máme $G \in \mathbb{S}$, $n \geq 3$, se **skóre** $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_n$, $n = |V|$. Jestliže pro nějaké $k < \frac{n}{2}$ platí $d_k \leq k$, a pak $d_{n-k} \geq n - k$, tak G je **Hamiltonovský**.

DŮKAZ. Sporem. Předpokládejme, že existuje $G \in \mathbb{S}$, $n \geq 3$, G splňuje $k < \frac{n}{2}$ platí $d_k \leq k$, a pak $d_{n-k} \geq n - k$ a G není Hamiltonovský.

Když ke G splňující Chvátalovu větu přidáme hranu, která v G není, tak nový graf stále splňuje Chvátalovu větu.

Zvolíme G s Chvátalovou podmínkou maximální bez **hamiltonovské kružnice**. Zvolme $x, y : \{x, y\} \notin E$, $d(x) + d(y)$ je největší mezi $\{u, v\} \notin E$, $d(x) \leq d(y)$. V G existuje Hamiltonovská cesta z x do y . Označme

$$S := \{i \mid \{x, v_{i+1}\} \in E\} \in 1, \quad (6.1)$$

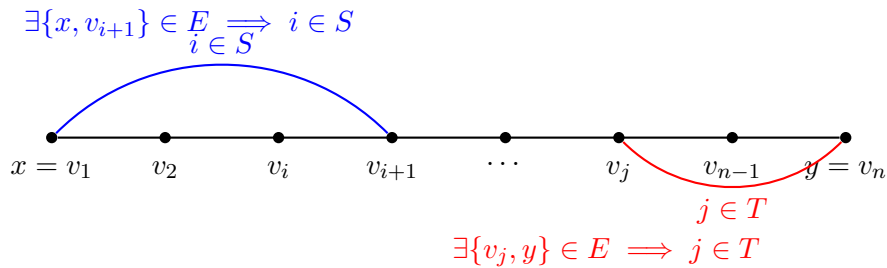
$$T := \{j \mid \{v_j, y\} \in E\} \ni n - 1, \quad (6.2)$$

kde $n \notin S$, $n \notin T$.

$$S \cup T \subset \{1, \dots, n - 1\} \quad (6.3)$$

$$|S| = d(x) \quad (6.4)$$

$$|T| = d(y) \quad (6.5)$$



Pomocný důkaz. Platí $S \cap T = \emptyset$.

DŮKAZ. Kdyby $i \in S \cap T$, tak se jedná o hamiltonovskou kružnici. Spor s velkým předpokladem. ■

Takže

$$|S \cup T| = |S| + |T| = d(x) + d(y) \leq n - 1. \quad (6.6)$$

Položme

$$k := d(x) \quad d(x) \leq d(y) \quad (6.7)$$

$$k < \frac{n}{2} \quad 2d(x) \leq d(x) + d(y) \leq n - 1 \quad (6.8)$$

A tedy $d(x) \leq \frac{n-1}{2} < \frac{n}{2}$.

Máme $d(x)$ vrcholů u , že $\{x, y\} \in E$.

$$u = v_l \quad (6.9)$$

$$\{v_{l-1}, y\} \notin E \quad (6.10)$$

$$d(v_{l-1}) + d(y) \leq d(x) + d(y) \quad (6.11)$$

$$d(v_{l-1}) \leq d(x) = k \quad (6.12)$$

Tj. máme k vrcholů v_{l-1} s $d(v_{l-1}) \leq k$. Platí $d_k \leq k$, protože máme alespoň k vrcholů stupně $\leq k$. Z Chvátalovy věty víme, že $d_{n-k} \geq n - k$, tj. existuje $k + 1$ vrcholů w s $d(w) \geq n - k$. Ale x má $d(x) = k$. Tedy existuje w s $d(w) = n - k$, že $\{x, w\} \notin E$.

$d(x) + d(w) = k + n - k = n$, což je spor s volbou x a y , protože $d(x) + d(y) \leq n - 1$. ■

6.4 Věta o skóre grafu a hamiltonovské kružnici

Jestliže posloupnost čísel

$$a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_n \text{ nesplňuje Chvátalovu větu,} \quad (6.13)$$

tak existuje

$$d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_n, a_i \leq d_i, \quad (6.14)$$

tak, že je **skóre** grafu, který nemá **hamiltonovskou kružnici**.

DŮKAZ. Jestliže posloupnost nesplňuje **Chvátalovu větu**, pak existuje číslo k tak, že $k \leq \frac{n}{2}$, $d_k \leq k$ a přitom $d_{n-k} \leq n - k - 1$.

Utvořme graf s množinou vrcholů $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ takto: $\{v_i, v_j\}$ je hrana G právě tehdy, když

- buď $1 \leq i \leq k$ a $n - k + 1 \leq j \leq n$,
- nebo $i \neq j$ a $k + 1 \leq i, j \leq n$.

Jinými slovy G se skládá z úplného bipartitního grafu se stranami $X = \{v_1, \dots, v_k\}$ a $Y = \{v_{n-k+1}, \dots, v_n\}$ a úplného grafu na množině vrcholů $\{v_{k+1}, v_{k+2}, \dots, v_n\}$.

Graf G má tedy

$$a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_k \leq a_{k+1} \leq \dots \leq a_{n-k} \leq a_{n-k+1} \leq \dots \leq a_n \quad (6.15)$$

$$\underbrace{d_1}_{\leq k} \leq \underbrace{d_2}_{\leq k} \leq \dots \leq \underbrace{d_k}_{\leq k} \leq \underbrace{d_{k+1}}_{\leq n-k+1} \leq \dots \leq \underbrace{d_{n-k}}_{\leq n-k+1} \leq \underbrace{d_{n-k+1}}_{\leq n-1} \leq \dots \leq \underbrace{d_n}_{\leq n-1} \quad (6.16)$$

a tedy majorizuje a_1, a_2, \dots, a_n . Není těžké nahlédnout, že v G neexistuje hamiltonovská kružnice. ■

6.5 Turnaj

Prostý orientovaný graf G bez smyček nazveme *turnajem*, jestliže pro každé dva různé vrcholy u, v buď (u, v) je hrana grafu G , nebo (v, u) je hrana G ; nikdy ale ne oboje.

Jinými slovy, zapomeneme-li na orientaci hran v grafu G , dostaneme úplný graf.

6.6 Vztah hamiltonovských cyklů a silné souvislosti

Je dán **turnaj** G s $n \geq 3$ vrcholy. Pak v G existuje **hamiltonovský cyklus** právě tehdy, když je G silně **souvislý**.

DŮKAZ.

\Rightarrow : Necht v G existuje hamiltonovský cyklus C . Pro libovolné dva vrcholy u, v existuje cesta z u do v vedená po hranách **cyklu** C . Graf G je tedy silně souvislý.

\Leftarrow : Necht $G = (V, E)$ je turnaj, který je silně souvislý. Ukážeme, že v G existuje cyklus délky k pro každé $3 \leq k \leq n$. Tím bude pro $k = n$ dokázáno, že je G hamiltonovský. Důkaz vedeme indukcí podle k .

- 1) *Základní krok $k = 3$.* Vezměme libovolný vrchol $v \in V$. Označme $N^+ = \{x \in V \mid \{v, x\} \in E\}$ a $N^- = \{y \in V \mid \{y, v\} \in E\}$. Protože je G silně souvislý, jsou obě množiny N^+ a N^- neprázdné. Navíc musí existovat hrana vedoucí z N^+ do N^- , tj. vrcholy $x \in N^+$ a $y \in N^-$ takové, že $\{x, y\} \in E$. (Kdyby taková hrana neexistovala, neexistovala by žádná **cesta** z N^+ do v , což by byl spor se silnou souvislostí). Trojice $\{v, x\}, \{x, y\}, \{y, v\}$ pak tvoří hledaný cyklus délky 3.
- 2) *Indukční předpoklad.* Předpokládejme, že máme zkonstruován cyklus C s vrcholy u_1, u_2, \dots, u_k , pro $3 \leq k < n$.
- 3) *Indukční krok.* Pro rozšíření cyklu definujme množiny:

$$S^+ = \{w \notin C \mid \exists i, \{u_i, w\} \in E\} \quad \text{a} \quad S^- = \{w \notin C \mid \exists j, \{w, u_j\} \in E\}. \quad (6.17)$$

Protože G je silně **souvislý** a $k < n$, jsou obě množiny neprázdné (vrcholy mimo cyklus nemohou být izolované od cyklu). Rozlišíme dva případy:

Případ A: $S^+ \cap S^- \neq \emptyset$. Existuje vrchol w mimo cyklus, do kterého vede hrana z cyklu a z něhož vede hrana do cyklu. Tedy existují i, j tak, že $\{u_i, w\} \in E$ a $\{w, u_j\} \in E$.

- Pokud $j = i + 1$ (vrcholy jsou na cyklu sousední), vložíme w mezi ně a máme cyklus $u_i \rightarrow w \rightarrow u_{i+1}$, jehož délka je $k + 1$.
- Pokud u_i a u_j nejsou sousední, uvažujme vrchol u_{i+1} . V **turnaji** musí existovat hrana mezi w a u_{i+1} .
 - * Je-li $\{w, u_{i+1}\} \in E$, našli jsme sousední dvojici u_i, u_{i+1} , mezi kterou vložíme w (nahradíme hranu $\{u_i, u_{i+1}\}$ cestou $u_i \rightarrow w \rightarrow u_{i+1}$).
 - * Je-li $\{u_{i+1}, w\} \in E$, pak máme novou dvojici $\{u_{i+1}, w\}$ a $\{w, u_j\}$, kde se vzdálenost indexů na cyklu zmenšila.

Opakováním tohoto postupu v konečně mnoha krocích nalezneme sousední vrcholy na **cyklu**, mezi které lze w vložit, a získáme cyklus délky $k + 1$.

Případ B: $S^+ \cap S^- = \emptyset$. Množiny jsou disjunktní. To v turnaji znamená, že pro každé $z \in S^+$ platí $\{u, z\} \in E$ pro všechny $u \in C$ (jinak by existovala hrana $\{z, u\}$, což by znamenalo $z \in S^-$). Analogicky pro $t \in S^-$ platí $\{t, u\} \in E$ pro všechny $u \in C$.

Protože je G silně souvislý, musí existovat hrana z množiny S^+ do množiny S^- (jinak by nebyla cesta z S^+ do S^-). Necht tedy existují $z \in S^+$ a $t \in S^-$ takové, že $\{z, t\} \in E$.

Vybereme na cyklu C tři po sobě jdoucí vrcholy, řekněme u_1, u_2, u_3 (kde u_3 následuje u_2 a u_2 následuje u_1). Víme, že existují hrany $\{u_1, z\}$ (protože $z \in S^+$) a $\{t, u_3\}$ (protože $t \in S^-$). V původním cyklu C nahradíme cestu délky 2 ($u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_3$) cestou délky 3 ($u_1 \rightarrow z \rightarrow t \rightarrow u_3$).

Tím jsme do cyklu přidali dva vrcholy (z, t) a jeden odebrali (u_2). Výsledný cyklus má délku $k - 1 + 2 = k + 1$.

■

7 Toky v sítích

7.1 Síť

Síť je prostý orientovaný graf bez smyček $G = (V, E)$. Máme zdroj s (source) a spotřebič t (target). Zapisujeme síť (G, l, c, s, t) .

7.2 Tok v síti

Tok v síti je $f : E \rightarrow \mathbb{Z}$, že pro každý $v \neq s, t$ platí

$$\sum_{e \in E^-(v)} f(e) = \sum_{e \in E^+(v)} f(e) \quad (\text{Kirchhoffův zákon}) \quad (7.1)$$

7.3 Omezení toku

Mějme $l, c : E \rightarrow \mathbb{Z}$, $l(e) \leq c(e)$; kde l je dolní omezení toku a c horní omezení (kapacita).

7.4 Různé vlastnosti sítí a toků

Tok f je přípustný pokud pro každou hranu $e \in E$ je $l(e) \leq f(e) \leq c(e)$. Přípustný tok obecně nemusí existovat; stačí například aby do některého vrcholu mohlo celkově přitéci méně, než z něho musí odtéci. Jestliže ale je **dolní omezení** v každé hraně nulové, tak přípustný tok vždy existuje.

Síť je *transparentní* pokud $l(e) = 0 \ \forall e \in E$.

Velikost přípustného toku od s do t je

$$\text{vel}(f) = \sum_{e \in E^+(s)} f(e) - \sum_{e \in E^-(s)} f(e). \quad (7.2)$$

Přípustný tok f se nazývá *maximální tok*, jestliže má největší velikost mezi všemi přípustnými toky.

7.5 Řez oddělující zdroj od spotřebiče

Je dána síť $G = (V, E)$ se zdrojem z , spotřebičem s , a **omezeními** l, c . Množinu vrcholů $A \subseteq V$ takovou, že $z \in A$, $s \notin A$ nazýváme *množina oddělující zdroj od spotřebiče*. Dále definujeme $W^+(A)$ jako množinu hran vycházejících z množiny A , a $W^-(A)$ jako množinu hran vcházejících do množiny A . Přesněji

$$W^+(A) = \{e \mid P_V(e) \in A, K_V(e) \notin A\}, \quad (7.3)$$

$$W^-(A) = \{e \mid P_V(e) \notin A, K_V(e) \in A\}. \quad (7.4)$$

Množina

$$W(A) = W^+(A) \cup W^-(A) \quad (7.5)$$

se nazývá *řez určený množinou A*.

Maximální řez je řez $W(A)$ s nejmenší možnou hodnotou $\text{cap}(W(A))$.

7.6 Tvrzení o tocích a řezech

Pro každý řez $W(A)$ a každý tok f platí

$$\text{vel}(f) = \sum_{e \in W^+(A)} f(e) - \sum_{e \in W^-(A)} f(e). \quad (7.6)$$

DŮKAZ.

- 1) *Základní krok.* Necht $k = 1$. Protože $s \in A$, musí platit, že $A = \{s\}$. V tomto případě je množina $W^+(A)$ tvořena všemi hranami vycházejícími ze zdroje s a množina $W^-(A)$ všemi hranami vcházejícími do zdroje s . Podle definice velikosti toku $\text{vel}(f)$ platí

$$\text{vel}(f) = \sum_{v \in V} f(s, v) - \sum_{v \in V} f(v, s). \quad (7.7)$$

Což přesně odpovídá definici:

$$\text{vel}(f) = \sum_{e \in W^+(\{s\})} f(e) - \sum_{e \in W^-(\{s\})} f(e) \quad (7.8)$$

Tvrzení tedy pro $k = 1$ platí.

- 2) *Indukční předpoklad.* Předpokládejme, že tvrzení platí pro libovolnou množinu A velikosti k obsahující s a neobsahující t .
- 3) *Indukční krok.* Mějme množinu A' velikosti $k + 1$, která obsahuje s a neobsahuje t . Zvolme libovolný vrchol $v \in A'$ takový, že $v \neq s$. Takový vrchol jistě existuje, protože $|A'| \geq 2$. Položme $A = A' \setminus \{v\}$. Množina A má velikost k , obsahuje s a neobsahuje t , proto pro ni dle indukčního předpokladu platí vztah (7.6).

Nyní zkoumejme rozdíl mezi toky přes řezy určené množinami A a A' . Přidáním vrcholu v do množiny A se změni sumy následovně:

- Hrany z A do v , které byly původně v $W^+(A)$, se stanou vnitřními hranami A' , tedy ze sumy zmizí (odečteme tok vtékající do v z A).
- Hrany z v do A , které byly původně v $W^-(A)$, se stanou vnitřními, tedy ze sumy zmizí (přičteme tok vytékající z v do A , protože v W^- byl s minusem).
- Hrany z v do $V \setminus A'$, které dříve nebyly v řezu, se stanou součástí $W^+(A')$ (přičteme tok vytékající z v ven).
- Hrany z $V \setminus A'$ do v , které dříve nebyly v řezu, se stanou součástí $W^-(A')$ (odečteme tok vtékající do v zvenčí).

Matematicky vyjádřeno:

$$\begin{aligned} \sum_{e \in W^+(A')} f(e) - \sum_{e \in W^-(A')} f(e) &= \left(\sum_{e \in W^+(A)} f(e) - \sum_{u \in A} f(u, v) + \sum_{w \notin A'} f(v, w) \right) \\ &\quad - \left(\sum_{e \in W^-(A)} f(e) - \sum_{u \in A} f(v, u) + \sum_{w \notin A'} f(w, v) \right) \end{aligned} \quad (7.9)$$

Seskupíme-li členy odpovídající původnímu toku a členy týkající se vrcholu v , dostáváme:

$$\text{Tok}(A') = \text{vel}(f) + \underbrace{\left(\sum_{u \in A} f(v, u) + \sum_{w \notin A'} f(v, w) \right)}_{\text{celkový tok z } v} - \underbrace{\left(\sum_{u \in A} f(u, v) + \sum_{w \notin A'} f(w, v) \right)}_{\text{celkový tok do } v} \quad (7.10)$$

Jelikož $v \neq s$ a $v \neq t$ (protože $t \notin A'$), platí pro vrchol v Kirchhoffův zákon zachování toku:

$$\sum_{z \in V} f(v, z) - \sum_{z \in V} f(z, v) = 0. \quad (7.11)$$

Členy v závorkách výše pokrývají všechny hrany incidentní s v (buď vedou z/do A , anebo z/do $V \setminus A'$). Rozdíl v závorce je tedy roven nule. Proto platí:

$$\sum_{e \in W^+(A')} f(e) - \sum_{e \in W^-(A')} f(e) = \text{vel}(f). \quad (7.12)$$

■

7.7 Tvrzení o přípustných tocích a řezech

Pro každý **přípustný tok** f a **řez** $W(A)$ platí $\text{vel}(f) \leq \text{cap}(W(A))$.

DŮKAZ.

$$\text{vel}(f) = \sum_{e \in W^+(A)} f(e) - \sum_{e \in W^-(A)} f(e) \leq \sum_{e \in W^+(A)} c(e) - \sum_{e \in W^-(A)} l(e) = \text{cap}(W(A)) \quad (7.13)$$

Navíc každý přípustný tok splňuje $l(e) \leq f(e) \leq c(e)$.

■

7.8 Zlepšující cesta vůči toku f

Je dán **přípustný tok** f . Neorientovaná cesta v grafu G od zdroje z ke spotřebiči s se nazývá *zlepšující cesta vůči f* , jestliže

$$f(e) < c(e) \quad \text{pro každou hranu cesty vpřed,} \quad (7.14)$$

$$l(e) < f(e) \quad \text{pro každou hranu cesty vzad.} \quad (7.15)$$

Kapacita zlepšující cesty je

$$\text{cap}(C) = \min(\{c(e) - f(e) \mid e \in C \text{ vpřed}\} \cup \{f(e) - l(e) \mid e \in C \text{ vzad}\}) \quad (7.16)$$

7.9 Změna toku f

Změna **toku** f podél **zlepšující cesty** C s kapacitou d je tok f' definovaný

$$f'(e) = \begin{cases} f(e) + d & \text{pro hrany } e \text{ cesty vpřed} \\ f(e) - d & \text{pro hrany } e \text{ cesty vzad} \\ f(e) & \text{pro hrany } e \text{ neležící na cestě} \end{cases} \quad (7.17)$$

7.10 Změna toku podle zlepšující cesty je přípustný tok

Je-li C **zlepšující cesta** kapacity d vzhledem k **přípustnému toku** f , pak zlepšující tok f' je také přípustným tokem a $\text{vel}(f') = \text{vel}(f) + d$.

DŮKAZ. f' je tok, $v \in C$, $v \neq s, t$.

7.11 Značkovácí procedura

Vstup: přípustný tok f .

Výstup: zlepšující cesta C vůči f , nebo odpověď „ne“ a množina označovaných vrcholů A .

- 1) *Inicializace.* Označujeme zdroj s , ostatní vrcholy jsou bez značky.
- 2) *Test nalezení zlepšující cesty.* Jestliže byl označován t , zpětným postupem zkonstruuje zlepšující cestu, kterou vrátíme.
- 3) *Značkování dopředu.* Jestliže existuje hrana e taková, že $P_V(e)$ má značku, $K_V(e)$ nemá značku a $f(e) < c(e)$, označujeme $K_V(e)$; pro $K_V(e)$ si zapamatujeme e . **goto** 2)
- 4) *Značkování dozadu.* Jestliže existuje hrana e taková, že $K_V(e)$ má značku, $P_V(e)$ nemá značku a $l(e) < f(e)$, označujeme $P_V(e)$; pro $P_V(e)$ si zapamatujeme e . **goto** 2)
- 5) *Neexistuje zlepšující cesta.* Nemůžeme-li již značkovat a nebyl označován t , vrátíme odpověď „ne“ a množinu označovaných vrcholů A .

7.12 Tvrzení o výsledku značkovácí procedury

Jestliže značkovácí procedura skončila odpovědí „ne“ a vrátila množinu označovaných vrcholů A , pak

$$\text{vel}(f) = \text{cap}(W(A)). \quad (7.18)$$

To znamená, že tok f má maximální velikost a řez určený množinou A má nejmenší kapacitu.

DŮKAZ. Mějme množinu označovaných vrcholů A . $s \in A$ a $t \notin A$.

$$\text{vel}(f) = \sum_{e \in W^+(A)} f(e) - \sum_{e \in W^-(A)} f(e) \quad (7.19)$$

$$\vdots \quad (7.20)$$

$$\sum_{e \in W^+(A)} c(e) - \sum_{e \in W^-(A)} l(e) = \text{cap}(W(A)) \quad (7.21)$$

7.13 Věta o přípustném toku a maximálním přípustném toku

Ford-Fulkersonova věta. Jestliže v síti $G = (V, E)$, s omezeními l, c , zdrojem s a spotřebičem t existuje přípustný tok, pak existuje maximální přípustný tok f_{\max} a jeho velikost je rovna kapacitě minimálního řezu.

7.14 Přírůstková síť vzhledem k toku

Mějme přípustný tok f v $G = (V, E)$, s omezeními l, c , zdrojem s a spotřebičem t . Pak síť $G = (V, E_f)$ je přírůstková síť toku f , se zdrojem s , spotřebičem t , nulovým dolním omezením a kapacitou c_f , kde

$$(u, v) \in E_f \text{ a } c_f(u, v) = c(e) - f(e) \quad \text{jestliže pro } e \in E, e = (u, v) \text{ a platí } f(e) < c(e). \quad (7.22)$$

$$(u, v) \in E_f \text{ a } c_f(u, v) = f(e) - l(e) \quad \text{jestliže pro } e \in E, e = (u, v) \text{ a platí } l(e) < f(e). \quad (7.23)$$

Každá zlepšující cesta od zdroje s ke spotřebiči t je zlepšující cestou v G_f s tím, že všechny hrany cesty jsou hranami vpřed; tj. jedná se o orientovanou cestu v G_f .

7.15 Vrstvená síť

Mějme **přírůstkovou síť** G_f . Pak její podgraf, který obsahuje všechny hrany některé nejkratší (na počet hran v cestě) **zlepšující cesty** od s k t se nazývá *vrstvená síť*.

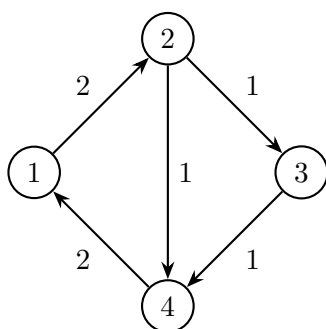
Sestrojit k dané přírůstkové síti vrstvenou síť je možné v čase úměrném počtu hran přírůstkového grafu G_f , a tudíž i původního grafu G .

Uvědomme si, že G_f má nejvýše dvakrát tolik hran jako G .

7.16 Cirkulace

Je dán orientovaný graf $G = (V, E)$ a omezení l, c . Zobrazení $f : E \rightarrow \mathbb{Z}$ se nazývá *cirkulace*, jestliže Kirchhoffův zákon platí pro všechny vrcholy $v \in V$.

Cirkulace se nazývá *přípustná*, jestliže navíc pro každou hranu $e \in E$ platí $l(e) \leq f(e) \leq c(e)$.



7.17 Kapacita řezu

Mějme síť $G = (V, E)$ s ohodnoceními l, c . Uvažujme neprázdnou množinu vrcholů $A \subset V$ takovou, že $A \neq V$. Pak kapacita řezu $W(A)$ je definovaná jako

$$\text{cap}(W(A)) = \sum_{e \in W^+(A)} c(e) - \sum_{e \in W^-(A)} l(e). \quad (7.24)$$

7.18 Souvislost přípustné cirkulace a řezu

V síti $G = (V, E)$ s ohodnoceními l, c existuje **přípustná cirkulace** právě tehdy, když neexistuje **řez záporné kapacity**.

*Přípustná cirkulace tedy existuje právě tehdy, když každá množina vrcholů A má tu vlastnost, že **tok**, který do ní povinně musí vtéci kvůli dolnímu omezení l na hranách z $W^-(A)$, může z této množiny také odtéci díky hornímu omezení c na hranách z $W^+(A)$.*

DŮKAZ. Existuje-li přípustná cirkulace f , pak pro každý řez platí

$$C(A) = \sum_{e \in W^+(A)} c(e) - \sum_{e \in W^-(A)} l(e) \geq \sum_{e \in W^+(A)} f(e) - \sum_{e \in W^-(A)} f(e) = 0. \quad (7.25)$$

Jestliže naopak přípustná cirkulace neexistuje, pak existence řezu se zápornou kapacitou vyplývá z algoritmu pro hledání přípustné cirkulace.

8 Párování

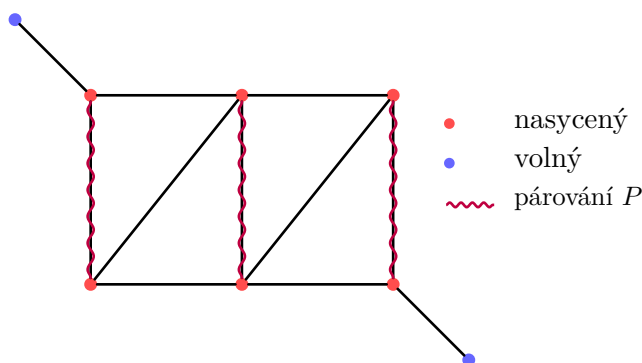
8.1 Definice

Je dán neorientovaný graf $G = (V, E, \varepsilon)$. Podmnožina hran $P \subseteq E$ se nazývá *párování*, jestliže v P neexistují 2 různé hrany se společným krajním vrcholem (takže vrchol má stupeň max. 1).

8.2 Vrchol nasycený a volný v párování

Mějme *párování* P . Vrchol v grafu nazvěme *nasycený* v P , pokud existuje hrana $e \in P$ incidentní s v .

V opačném případě říkáme, že vrchol v je *volný* v P .



8.3 Perfektní párování

Párování P v grafu G nazvěme *perfektní párování*, jestliže každý vrchol grafu je *nasycen* v P . To znamená, že P má $\frac{n}{2}$ hran, kde n je počet vrcholů grafu G .

8.4 Maximální párování

Párování P v grafu G nazvěme *maximální párování*, jestliže je nejpočetnější mezi všemi párováními v grafu G .

Perfektní párování je jistě maximální. Naopak to neplatí. Existují grafy, které perfektní párování nemají — stačí uvažovat grafy s lichým počtem vrcholů. Ovšem ani grafy se sudým počtem vrcholů nemusí perfektní párování obsahovat.

V každém grafu existuje maximální párování.

8.5 Střídavá cesta vůči párování P

Je dáno *párování* P v grafu G . *Cesta* $C = e_1, e_2, \dots, e_k$ v grafu G se nazývá *střídavá cesta vůči P* , jestliže platí následující dvě podmínky:

- 1) hrany z cesty C střídavě leží a neleží v párování P ,
- 2) jestliže krajní vrchol v cesty C je *nasycen* v P , pak C obsahuje i hranu párování P , která vrchol v nasycuje.

Komponenty souvislosti grafu (V, H) jsou buď izolované vrcholy (stupeň 0), nebo **kružnice**, nebo cesty. Jak v kružnicích, tak v cestách se střídají hrany z P a P_{\max} . Proto jsou kružnice sudé délky, cesty pak sudé či liché délky.

Mezi komponentami souvislosti nemůže existovat **cesta** liché délky, která by měla víc hran z P než z P_{\max} (byla by to totiž **zlepšující cesta** vůči P_{\max} a ta neexistuje). Každá cesta liché délky je proto zlepšující cestou vzhledem k párování P . Víme, že každá kružnice i každá cesta sudé délky má stejný počet hran z P a P_{\max} . Ukážeme-li tedy, že H obsahuje o k více hran z P_{\max} než z P , budeme mít dokázáno, že existuje k komponent grafu H , které jsou zlepšujícími cestami vůči P .

Máme

$$H = (P_{\max} \setminus P) \cup (P \setminus P_{\max}). \quad (8.3)$$

Platí

$$|P_{\max} \setminus P| = |P_{\max}| - |P \cap P_{\max}| = |P| + k - |P \cap P_{\max}| = |P \setminus P_{\max}| + k. \quad (8.4)$$

■

8.9 Souvislost perfektního párování a počtu komponent

Tutte. Je dán prostý graf $G = (V, E)$ bez smyček s alespoň třemi vrcholy. V grafu G existuje **perfektní párování** právě tehdy, když pro každou podmnožinu $S \subseteq V$ platí

$$g(G \setminus S) \leq |S|, \quad (8.5)$$

kde $g(G \setminus S)$ je počet komponent souvislosti grafu $G \setminus S$, které mají lichý počet vrcholů.

DŮKAZ.

\Rightarrow : Předpokládejme, že v grafu G existuje perfektní párování (tj. párování **nasycující** všechny vrcholy grafu G). Vezmeme libovolnou $S \subseteq V$. Protože v každé liché komponentě souvislosti grafu $G \setminus S$ je alespoň jeden vrchol, který není spárován uvnitř komponenty, musí být v perfektním párování spárován s nějakým vrcholem S . Proto nemůže být $|S|$ menší než počet lichých komponent.

\Leftarrow : Předpokládejme, že graf G splňuje $g(G \setminus S) \leq |S|$ pro každou $S \subseteq V$.

Nejprve si uvědomme, že pro $S = \emptyset$ podmínka zaručuje, že graf G má sudý počet vrcholů.

Dále si uvědomme, že splňuje-li G podmínku (8.5) a přidáme-li k němu hranu e mezi stávajícími vrcholy, pak graf $G + e$ také splňuje podmínku (8.5). Ano, graf $(G + e) \setminus S$ má buď stejně lichých komponent jako $G \setminus S$, nebo o dvě méně.

Předpokládejme, že by existoval graf G splňující (8.5), který nemá perfektní párování, tak vybereme jako G ten z nich, který nemá perfektní párování, ale přidáním libovolné hrany už **perfektní párování** mít bude.

Označme T množinu všech vrcholů stupně $n - 1$, kde $n = |V|$. Platí $T \subseteq V$ a proto pro ni musí platit podmínka (8.5). Nejprve dokážeme, že každá komponenta souvislosti grafu $G \setminus T$ je úplný graf.

Kdyby existovala komponenta souvislosti C grafu $G \setminus T$, která není úplným grafem, pak by v C existovaly vrcholy x, y, z takové, že $\{x, y\}, \{y, z\} \in E$ a $\{x, z\} \notin E$. Navíc vrchol z neleží v T , proto existuje vrchol $w \notin T$ takový, že $\{z, w\} \in E$.

Označme P_1 perfektní párování v grafu $G + \{x, y\}$ a P_2 perfektní párování v grafu $G + \{z, w\}$. Dále označme H symetrickou diferenci párování $P_1 \oplus P_2$. Platí $\{x, y\}, \{z, w\} \in H$. Rozebereme nyní dva případy:

- (a) Hrany $\{x, y\}, \{z, w\}$ leží v různých komponentách souvislosti A, B v H , $\{x, y\} \in A$, $\{z, w\} \in B$. Pak párování P , které obsahuje hrany P_2 komponenty A jinak hrany P_1 , je perfektní párování v grafu G . Což je spor s faktem, že G nemá perfektní párování.
- (b) Hrany $\{x, y\}, \{z, w\}$ leží ve stejné komponentě souvislosti A grafu H . Komponenta A je **kružnice** sudé délky, která střídavě obsahuje hrany z P_1 a P_2 . Označme K_1 tu část A , která začíná ve vrcholu z , pokračuje z P_1 a po hraně z P_2 poprvé navštíví jeden z vrcholů x, y . **BÚNO** předpokládejme, že je to vrchol y . Dále označme K_2 zbylou část kružnice A , ze které jsme odstranili hranu $\{x, y\}$. Definujme P takto: P obsahuje
- $K_1 \cap P_2$,
 - $K_2 \cap P_1$,
 - $\{x, z\}$.

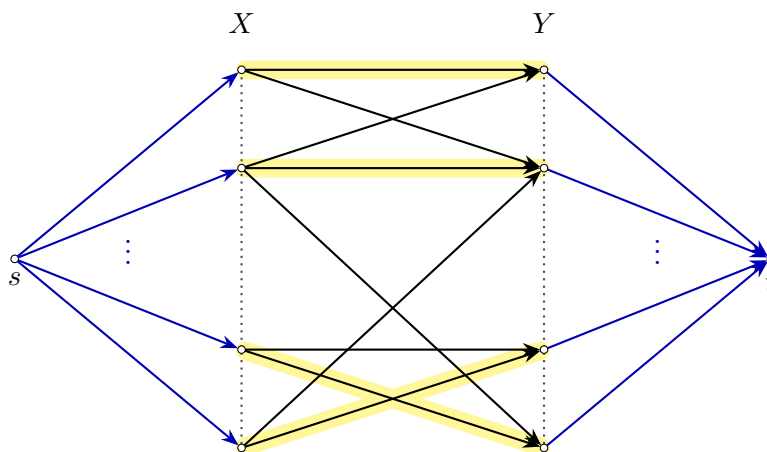
Tím jsme získali perfektní párování v grafu G ; opět spor.

Víme tedy, že všechny komponenty souvislosti grafu $G \setminus T$ jsou úplné grafy. Definujme **párování** P takto: *V každé komponentě souvislosti grafu $G \setminus T$ o sudém počtu vrcholů vybereme libovolné **perfektní párování**; v komponentě souvislosti $G \setminus T$ o lichém počtu vrcholů spárujeme libovolně všechny vrcholy až na jeden, který spárujeme s některým vrcholem T .* Protože lichých komponent $G \setminus T$ je nejvýše tolik jako $|T|$, můžeme to udělat. Navíc je počet vrcholů sudý, takže nám z množiny T zbyde sudý počet nespárovaných vrcholů, jedná se ovšem o vrcholy, které jsou spojeny s každým vrcholem grafu, můžeme proto zbylé vrcholy mezi sebou libovolně spárovat. Zase jsme ukázali, že v G existuje perfektní párování.

■

8.10 Párování v bipartitních grafech

Je dán bipartitní graf G se stranami X a Y . K němu je možné vytvořit **sít** takovou, že každému **párování** P v grafu G odpovídá **přípustný tok** f , a naopak každému přípustnému toku f v síti odpovídá párování P v G ; a to tak, že $\text{vel}(f) = |P|$.



Vytvořme síť G' s **omezeními** l, c , zdrojem s , spotřebičem t a hranami

$$E' : (s, x) \forall x \in X \quad (8.6)$$

$$(y, t) \forall y \in Y. \quad (8.7)$$

A dále zorientujme: $\forall \{x, y\} \in E(G)$, $x \in X$, $y \in Y$ E' obsahuje (x, y) . Pak omezení takové sítě $l(e) = 0$, $c(e) = 1$, $\forall e \in E'$.

Pro párování uděláme přípustný tok f_p , že

$$\{x, y\} \in P : f_p((x, y)) = 1. \quad (8.8)$$

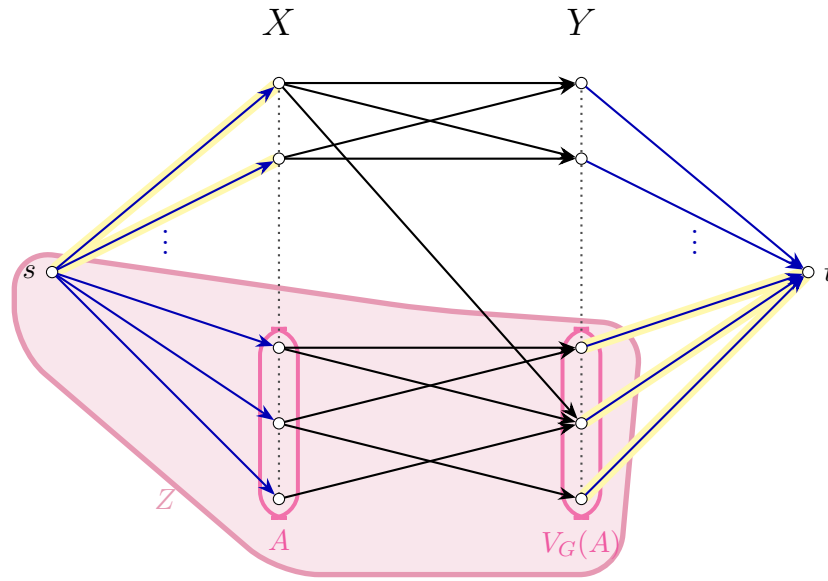
Takže $|P| = \text{vel}(f_p)$; „projde tolik jedniček, kolik je hran párování“.

No a $\{x, y\} \in P_f$ právě tehdy, když $f((x, y)) = 1$. Tedy $\text{vel}(f) = |P_f|$.

8.11 Věta o maximálním párování

König. Je dán bipartitní graf G se stranami X a Y . Označme P_{\max} **maximální párování** v G . Pak platí

$$|P_{\max}| = \min_{A \subseteq X} (|X \setminus A| + |V_G(A)|). \quad (8.9)$$



$$Z = \{s\} \cup A \cup V_G(A), \quad t \notin Z.$$

$$W^+(Z) = \{(s, x) \mid x \notin A\} \cup \{(y, t) \mid y \in V_G(A)\} = |\{(s, x) \mid x \notin A\}| + |\{(y, t) \mid y \in V_G(A)\}| \quad (8.10)$$

$$\text{cap}(W(Z)) = \sum_{e \in W^+(Z)} c(e) \quad (8.11)$$

A určuje **řez** $W(Z)$ s $\text{cap}(W(Z)) = |X - A| + |V_G(A)|$.

Minimální řez má tvar $Z_0 = \{s\} \cup A_0 \cup V_G(A_0)$ pro vhodné $A_0 \subseteq X$, kde Z_0 je množina označkových vrcholů a $A_0 = Z_0 \cap X$.

Musíme ukázat, že $Z_0 \cap Y = V_G(A_0)$.

$$Z_0 \cup Y \subseteq V_G(A_0) \quad (8.12)$$

$$Z_0 \cup Y \supseteq V_G(A_0) \quad (8.13)$$

8.12 Věta o nasycujícím párování

Hall. Je dán bipartitní graf G se stranami X a Y . Pak v G existuje párování nasycující stranu X právě tehdy, když pro každou množinu $A \subseteq X$ platí

$$|A| \leq |V_G(A)| = |\{y \mid y \in Y \wedge \{x, y\} \in E\}|. \quad (8.14)$$

DŮKAZ.

\Leftarrow : Víme, že $|P_{\max}| = |X \setminus A_0| + |V_G(A)|$ pro nějakou $A_0 \subseteq X$ (z **Königovy věty**).

Sporem. Kdyby P_{\max} nenasycovalo X . Tak $|P_{\max}| < |X|$. Takže

$$|X \setminus A_0| + |V_G(A)| < |X| \quad (8.15)$$

$$|X| - |A_0| + |V_G(A)| < |X| \quad (8.16)$$

$$|V_G(A)| < |A_0| \quad (8.17)$$

Což je spor.

\Rightarrow : Jestliže v grafu G existuje párování nasycující stranu X , pak G podmínku věty splňuje (párování každému vrcholu z množiny A „přiřazuje“ vrchol z $V_G(A)$, a tudíž vrcholů v $V_G(A)$ musí být alespoň tolik, kolik je vrcholů v A .)

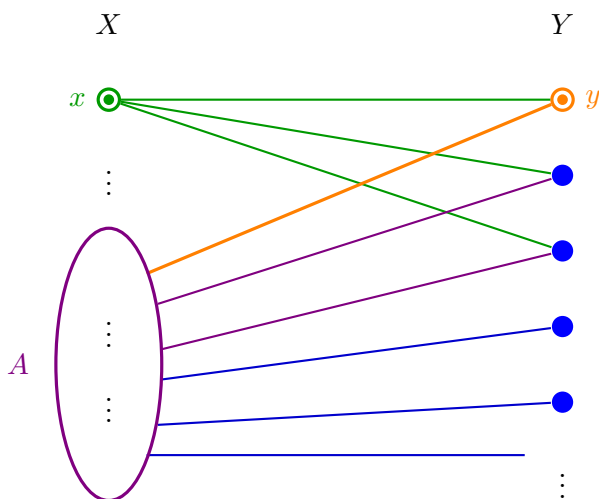
■

8.13 Tvrzení o vztahu stupňů vrcholů a nasycujícího párování

Je dán bipartitní graf G se stranami X a Y . Jestliže pro každý vrchol $x \in X$ a každý vrchol $y \in Y$ platí

$$d(x) \geq d(y), \quad (8.18)$$

pak v G existuje párování nasycující stranu X .



DŮKAZ. Označme $d_X = \min \{d(x) \mid x \in X\}$ a $d_Y = \max \{d(y) \mid y \in Y\}$. Z předpokladu víme

$$d_X \geq d_Y. \quad (8.19)$$

Použijme **Hallovu větu**. Vezměme libovolnou množinu $A \subseteq X$.

$$W(A) \subseteq W(V_G(A)) \quad (8.20)$$

$$\text{a } |W(A)| \geq d_X|A|, \quad |W(V_G(A))| \leq d_Y|V_G(A)| \quad (8.21)$$

Takže

$$d_X|A| \leq |W(A)| \leq |W(V_G(A))| \leq d_Y|V_G(A)| \quad (8.22)$$

a současně $d_X \geq d_Y$.

Může být $|A| > |V_G(A)|$? Kdyby ano, tak

$$d_X|A| > d_Y|V_G(A)|. \quad (8.23)$$

Což neplatí, takže

$$|A| \leq |V_G(A)|. \quad (8.24)$$

A tedy **Hallova věta** říká, že existuje párování nasycující X .

■

8.14 Tvrzení o existenci nasycujícího párování všech vrcholů

Je dán bipartitní graf G se stranami X a Y . Pak existuje párování, které nasycuje všechny vrcholy nejvyššího stupně.

DŮSLEDEK. Je dán bipartitní graf $G = (V, E)$ se stranami X a Y . Označme $\Delta(G)$ nejvyšší stupeň, který některý vrchol grafu má. Pak množinu hran E je možno rozdělit na $\Delta(G)$ hranově disjunktních párování.

DŮKAZ. Vytvořme G' , že k němu přidáme hrany a vrchol tak, aby

$$\Delta(G) = d_{G'}(x) = d_{G'}(y) \quad \forall x \in X, \forall y \in Y. \quad (8.25)$$

V novém grafu G' , protože

$$d_{G'}(x) \geq d_{G'}(y) \quad \forall x \in X, \forall y \in Y, \quad (8.26)$$

existuje párování nasycující X .

Vybrali jsme maximální párování P_{\max} . Odstraníme všechny hrany neležící v G .

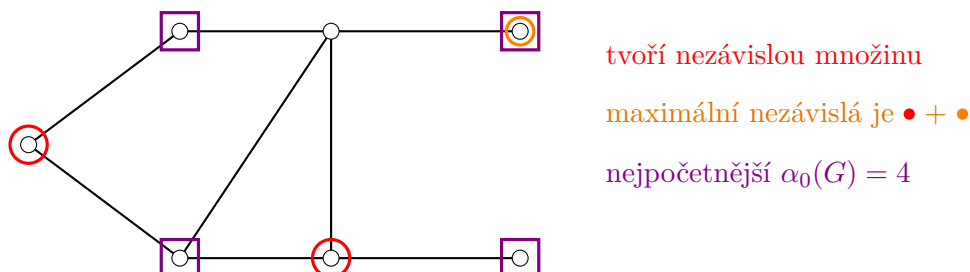
Musí zůstat nasyceny ty vrcholy, které měly největší stupeň. Tím dostaneme párování P nasycující vrcholy nejvyššího stupně. ■

9 Pokrývání

9.1 Nezávislé množiny, nezávislost

Mějme graf $G = (V, E) \in \mathbb{S}$. Množinu vrcholů $A \subseteq V$ nazveme *nezávislou množinou*, jestliže v grafu neexistuje hrana s oběma krajními vrcholy v A .

Nezávislost grafu, značíme ji $\alpha_0(G)$, je rovna počtu vrcholů v nejpočetnější nezávislé množině v G .

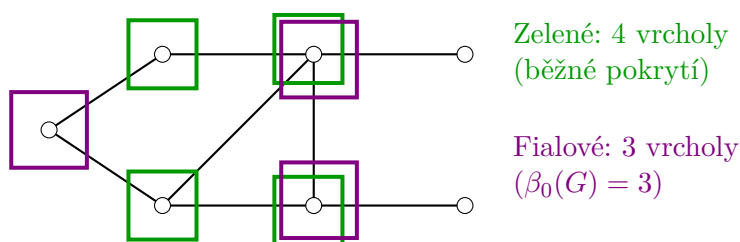


9.2 Vrcholové pokrytí

Je dán prostý neorientovaný $G = (V, E) \in \mathbb{S}$. Množina vrcholů $K \subseteq V$ se nazývá *vrcholové pokrytí*, jestliže každá hrana $e \in E$ má alespoň jeden krajní vrchol v K .

Počet vrcholů v nejméně početném vrcholovém pokrytí v grafu G značíme $\beta_0(G)$.

Jestliže K je vrcholové pokrytí a $K \subseteq K'$, tak K' je také vrcholové pokrytí.



9.3 Věta o vztahu vrcholového pokrytí a nezávislosti

Je dán prostý neorientovaný graf $G = (V, E)$ bez smyček s n vrcholy. Platí

$$\alpha_0(G) + \beta_0(G) = n. \quad (9.1)$$

DŮKAZ. Máme $G = (V, E) \in \mathbb{S}$. $|V| = n$.

„ \geq “: Uvažujme N nezávislou, $|N| = \alpha_0(G)$. Pak $V \setminus N$ je **vrcholové pokrytí**. Což znamená

$$|V \setminus N| = n - \alpha_0(G) \geq \beta_0(G). \quad (9.2)$$

Takže

$$n \geq \alpha_0(G) + \beta_0(G). \quad (9.3)$$

„ \leq “: Uvažujme vrcholové pokrytí K s $|K| = \beta_0(G)$. Pak $V \setminus K$ je **nezávislá** množina. A

$$|V \setminus K| = n - \beta_0(G) \leq \alpha_0(G). \quad (9.4)$$

Tudíž

$$n \leq \alpha_0(G) + \beta_0(G). \quad (9.5)$$

Dostáváme tedy

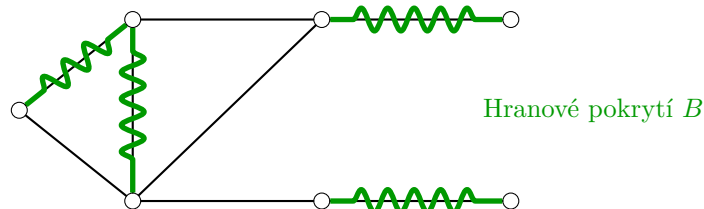
$$n = \alpha_0(G) + \beta_0(G). \quad (9.6)$$



9.4 Hranové pokrytí

Je dán prostý neorientovaný graf $G = (V, E)$ bez smyček a izolovaných vrcholů. Množina hran $B \subseteq E$ se nazývá *hranové pokrytí*, jestliže každý vrchol je krajním vrcholem alespoň jedné hrany z B .

Definujme $\beta_1(G)$ jako počet hran v nejmeně početném hranovém pokrytí.



9.5 Věta o vztahu hranového pokrytí a maximálního párování

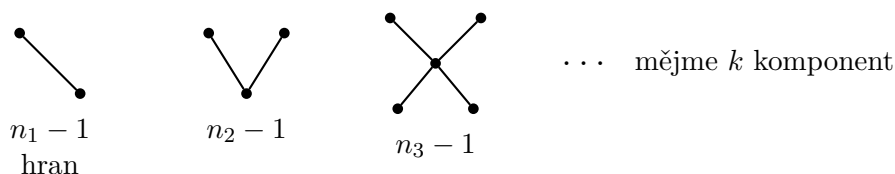
Je dán prostý neorientovaný graf $G = (V, E) \in \mathbb{S}$ bez izolovaných vrcholů s n vrcholy. Pak platí

$$\alpha_1(G) + \beta_1(G) = n, \quad (9.7)$$

kde α_1 je počet hran v maximálním párování grafu G (tj. $\alpha_1(G) = P_{\max}$).

DŮKAZ.

„ \leq “: Vezmeme nejmeně početné **hranové pokrytí** $B \subseteq E$. Jaké jsou komponenty souvislosti (U, B) ?



Takže

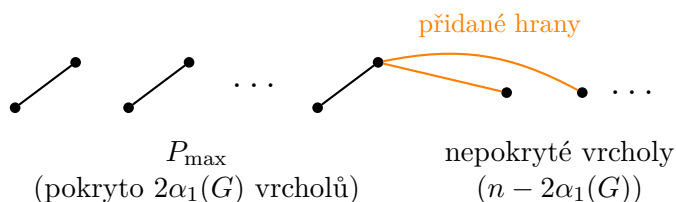
$$\beta_1 = |B| = \underbrace{n_1 + n_2 + \dots + n_k}_n - k = n - k. \quad (9.8)$$

Mějme párování P , kde z každé komponenty souvislosti vezmeme jednu libovolnou hranu, takže $|P| = k$. Tedy máme $b_1(G) = n - k$ a $|P| = k \leq \alpha_1(G)$.

$$n = \beta_1(G) + k \leq \beta_1(G) + \alpha_1(G) \quad (9.9)$$

$$n \leq \alpha_1(G) + \beta_1(G) \quad (9.10)$$

„ \geq “: Mějme P_{\max} , párování s $|P_{\max}| = \alpha_1(G)$.



$$B = P_{\max} \cup \{e \mid e \text{ je přidaná}\}.$$

$$|B| = \alpha_1(G) + n - 2\alpha_1(G) = n - \alpha_1(G) \geq \beta_1(G) \quad (9.11)$$

$$n \geq \alpha_1(G) + \beta_1(G) \quad (9.12)$$

Dostáváme tedy

$$n = \alpha_1(G) + \beta_1(G). \quad (9.13)$$

■

10 Barvení

10.1 Hranové obarvení

Je dán graf bez smyček $G = (V, E, \varepsilon)$ a konečná množina C tzv. barev. *Hranové obarvení* G je přiřazení $c : E \rightarrow C$, že žádné dvě hrany se společným krajním vrcholem nemají stejnou barvu.

Lze také říci, že se snažíme graf pokrýt vzájemně disjunktními **párováními**.

10.2 Hranová barevnost

Hranová barevnost, též *chromatický index*, grafu G je nejmenší počet barev, kterými lze **hranově obarvit** graf G , značíme ji $\chi'(G)$.

Nutně platí, že

$$\chi'(G) \geq \Delta(G). \quad (10.1)$$

10.3 Věta o souvislosti hranové barevnosti a maximálním stupni grafu

Vizing. Je dán graf bez smyček $G = (V, E, \varepsilon)$. Pak

$$\Delta(G) \leq \chi'(G) \leq \Delta(G) + 1. \quad (10.2)$$

Bez důkazu.

10.4 Vrcholové obarvení

Je dán prostý neorientovaný graf $G = (V, E)$ bez smyček a konečná množina B (nazývaná též množina barev). *Obarvení vrcholů* grafu (též *vrcholové obarvení* grafu) je $b : V \rightarrow B$, že žádné dva vrcholy spojené hranou nemají stejnou barvu.

G nazveme k -barevný, jestliže se dá obarvit k barvami.

10.5 Barevnost grafu

Barevnost grafu G , též *chromatické číslo* grafu G , je nejmenší k takové, že G je k -barevný, značíme ji $\chi(G)$.

10.6 Tvrzení o dvoubarevném grafu

Graf G je dvoubarevný právě tehdy, když G neobsahuje **kružnici** liché délky, tedy G je bipartitní.

DŮKAZ. Ať $G = (V, E)$, $V = A \cup B$, tak, že:

$$v \in A \iff \text{má barvu 1}$$

$$v \in B \iff \text{má barvu 2}$$

Stačí ukázat, že nemá-li G kružnici liché délky, dá se obarvit 2 barvami.

Dokažme algoritmem barvení. Vyberme si počáteční vrchol v . Následně aplikujme algoritmus BFS (breadth-first-search), kterým graf rozdělíme do několika úrovní. Každé úrovni přiřadíme barvu tak,

že

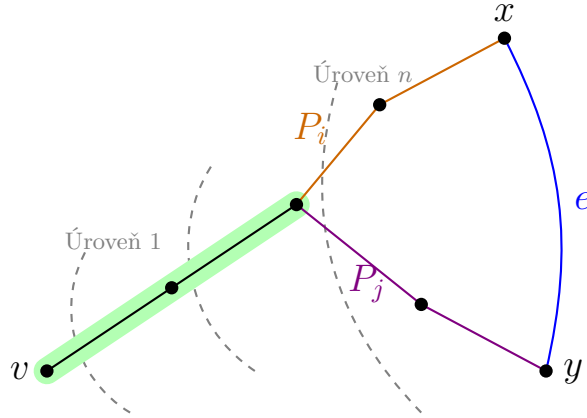
$$b(v) = \begin{cases} 1 & \iff v \in H_{2i}, \\ 2 & \iff v \in H_{2i+1}, \text{ pro } i \in \mathbb{N}. \end{cases} \quad (10.3)$$

Kdyby b nebylo obarvení; existuje $\{x, y\} \in E$, kde $x \in H_i$ a $y \in H_j$ tak, že $i + j = 2k$, $k \in \mathbb{N}$.

V našem grafu existuje **cesta** P_i z v do x o i hranách, a zároveň existuje cesta P_j z v do y o j hranách.

Když vezmeme P_i , $\{x, y\}$, P_j (pozpátku), jedná se o **uzavřený sled** o $i + j + 1 = 2k + 1$ hranách.

Dále máme kružnici o $i + j + 1 - 2\ell$ hranách, kde ℓ je počet hran ve **společném úseku** P_i, P_j .



■

10.7 Tvrzení o vztahu barevnosti grafu a nezávislosti grafu

Pro každý neorientovaný graf G bez smyček o n vrcholech a m hranách platí

$$(a) \quad \alpha_0(G) + \chi(G) \leq n + 1;$$

$$(b) \quad \chi(G) \cdot \alpha_0(G) \leq n;$$

$$(c) \quad \chi(G) \leq \frac{1}{2} + \sqrt{2m + \frac{1}{4}};$$

kde $\alpha_0(G)$ je počet $|N|$ tak, že N je nejpočetnější **nezávislá**.

DŮKAZ.

(a) Ať b je optimální **obarvení**. To rozděluje G na nezávislé množiny dle barev. A všech vrcholů v množině je nejvýše $\alpha_0(G)$, protože to je ta nejpočetnější. Sjednocením těchto množin pak dostaneme $\chi(G) \cdot \alpha_0(G) \leq n$. ■

(b) Ať

$$v \in N \quad \dots \quad b(n) = 1, \quad (10.4)$$

$$\left. \begin{array}{l} x_1 \\ \vdots \\ x_{n-\alpha_0(G)} \end{array} \right\} b(x_i) = i + 1. \quad (10.5)$$

Má tedy $1 + n - \alpha_0(G)$ barev. Upravme

$$1 + n - \alpha_0(G) \geq \chi(G) \quad (10.6)$$

$$\alpha_0(G) + \chi(G) \leq n + 1 \quad (10.7)$$

■

- (c) Ať b je optimální obarvení. Mějme množiny A_1, A_2, \dots, A_k , kde $k = \chi(G)$. Mezi každými 2 množinami je alespoň jedna hrana, tj.

$$m \geq \frac{k(k-1)}{2}. \quad (10.8)$$

Upravme:

$$2m \geq k^2 - k \quad (10.9)$$

$$0 \geq 2k^2 - k - 2m \quad (10.10)$$

Určeme kvadratické kořeny:

$$k_{1,2} = \frac{1 \pm \sqrt{1 + 8m}}{2} = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} + 2m} \quad (10.11)$$

A po analýze funkce víme, že

$$\chi(G) \leq \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + 2m}. \quad (10.12)$$

■

10.8 Tvrzení o největším stupni vrcholu a barevnosti grafu

Označme Δ největší stupeň vrcholu grafu $G \in \mathbb{S}$. Pak

$$\chi(G) \leq \Delta + 1. \quad (10.13)$$

DŮKAZ. Algoritmem sekvenčního barvení.

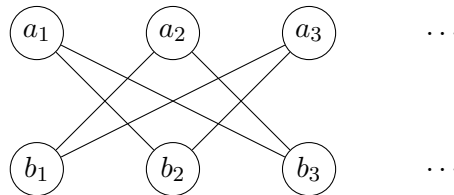
Označme $B = \{1, 2, \dots, \Delta, \Delta + 1\}$. Iterujme:

- 1) Očíslujeme vrcholy grafu G , tj. v_1, v_2, \dots, v_n .
- 2) Barvíme vrcholy v tomto pořadí, že $b(v_i) = j \iff j$ je nejmenší barva, kterou nemá žádný z již obarvených sousedů.

■

10.9 Příklad použití algoritmu sekvenčního barvení

Příklad. Mějme graf na $2m$ vrcholech, kde $\{a_i, b_j\} \in E \iff i \neq j$.



Pokud zvolíme nepříjemné uspořádání vrcholů „na střídačku“

$$a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3, \dots, a_n, b_n$$

dostaneme obarvení:

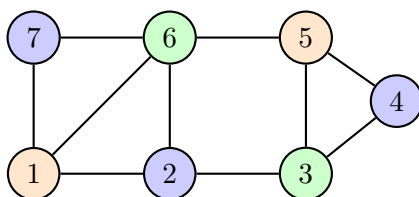
- a_1 nemá obarvené sousedy \rightarrow barva 1
- b_1 není spojen s a_1 (jediný obarvený), nemá jiné sousedy \rightarrow barva 1
- a_2 spojen s b_1 (barva 1) \rightarrow barva 2
- b_2 spojen s a_1 (barva 1), není spojen s $a_2 \rightarrow$ barva 2
- \vdots
- a_k, b_k vidí barvy $1, \dots, k-1$ na předchozích vrcholech \rightarrow barva k

Spotřebujeme tedy n barev (pro $2n$ vrcholů), ačkoliv graf je bipartitní a $\chi(G) = 2$.

To se nám oprávněně může zdát jako mnoho. V praxi se osvědčilo, pokud nám vyjde zbytečně mnoho barev, vrcholy *náhodně přeházet* a spustit algoritmus znovu. Toto stačí provést např. $3\times$ a obvykle dostaneme velmi rozumný počet barev.

Příklad. Mějme graf o 7 vrcholech a zvolme uspořádání 6, 1, 2, 3, 5, 7, 4.

Postupně barvěme



Konkrétní postup barvení:

Vrchol	Sousedé (již obarvení)	Barva
6	–	1
1	6 (1)	2
2	1 (2), 6 (1)	3
3	2 (3)	1
5	6 (1), 3 (1)	2
7	6 (1), 1 (2)	3
4	3 (1), 5 (2)	3

Výsledkem je platné obarvení pomocí 3 barev.

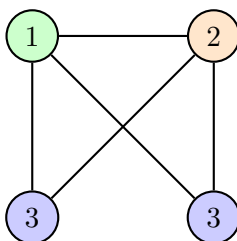
10.10 Věta o souvislosti největšího stupně vrcholu a barevnosti grafu

Brooks. Necht G je prostý **souvislý** graf bez smyček, který není ani úplný ani **kružnice** liché délky. Pak

$$\chi(G) \leq \Delta(G). \quad (10.14)$$

DŮKAZ. Omezme se na $\Delta(G) \geq 3$. Indukcí podle $|V| = n$.

(a) *Základní krok, $n = 4$.*



(b) *Indukční předpoklad.* Předpokládejme, že každý souvislý $G' \in \mathbb{S}$, $|V'| = n$, který není K_n a má $\Delta(G') \geq 3$ se dá obarvit $\Delta(G')$ barvami.

(c) *Indukční krok.* $G = (V, E)$, $|V| = n + 1$. Zvolme $u_0 \in V$, pak $G \setminus u_0 = H$ je graf o n vrcholech.

Protože H má n vrcholů a zřejmě $\Delta(H) \leq \Delta(G)$, podle indukčního předpokladu existuje obarvení b grafu H pomocí $\Delta(G)$ barev. Nyní se pokusíme rozšířit toto obarvení na vrchol u_0 .

Předpokládejme pro spor, že rozšíření obarvení není možné, tzn. že G vyžaduje $\Delta(G) + 1$ barev.

- 1) Vrchol u_0 musí mít v grafu G právě $\Delta(G)$ sousedů. Kdyby měl méně, zbylo by v sadě $\Delta(G)$ barev alespoň jedno volné místo pro u_0 . Označme sousedy u_0 jako $v_1, v_2, \dots, v_\Delta$, kde $\Delta = \Delta(G)$.
- 2) Všichni sousedé v_1, \dots, v_Δ musí mít v obarvení b navzájem různé barvy. Pokud by dva sousedé měli stejnou barvu, uvolnila by se jedna barva pro u_0 . Bez újmy na obecnosti předpokládejme, že v_i má barvu i (pro $i = 1, \dots, \Delta$).
- 3) Označme $H_{i,j}$ podgraf grafu H indukovaný vrcholy s barvami i a j . Vrcholy v_i a v_j musí ležet ve stejné komponentě souvislosti grafu $H_{i,j}$.

Důvod: Kdyby ležely v různých komponentách, mohli bychom v komponentě obsahující v_i prohodit barvy i a j . Tím by v_i získal barvu j , soused v_j by zůstal j , a pro u_0 by se uvolnila barva i , což je spor.

Označme tuto komponentu (cestu) spojující v_i a v_j jako $C_{i,j}$.

- 4) Komponenty $C_{i,j}$ jsou jednoduché cesty mezi v_i a v_j . Vrcholy uvnitř těchto cest nemohou mít v $H_{i,j}$ stupeň větší než 2 (jinak bychom našli vrchol, který můžeme přebarvit třetí barvou a narušit souvislost nutnou pro spor).
- 5) Dvě cesty $C_{i,k}$ a $C_{k,j}$ (kde i, j, k jsou různé barvy) mají společný pouze vrchol v_k .
- 6) **Závěrečný spor:** Protože G není úplný graf, existují dva sousedé vrcholu u_0 , kteří nejsou spojeni hranou. Necht' jsou to v_1 a v_2 . Cesta $C_{1,2}$ (z bodu 3) tedy musí mít délku alespoň 2 (vede přes další vrcholy). Označme y souseda vrcholu v_1 na cestě $C_{1,2}$. Vrchol y má nutně barvu 2. Nyní provedeme výměnu barev 1 a 3 na cestě $C_{1,3}$. Tím vznikne nové platné obarvení b' grafu H . V tomto novém obarvení:

- v_1 má barvu 3.
- y má stále barvu 2 (neleží na $C_{1,3}$, viz bod 5).
- v_2 má stále barvu 2.

Vrchol u_0 má nyní sousedy v_1 (barva 3) a v_2 (barva 2). Podle bodu 3 musí existovat cesta $C'_{2,3}$ spojující v_1 a v_2 tvořená pouze barvami 2 a 3. Protože y je soused v_1 s barvou 2, musí tato cesta vést přes y . To ale znamená, že y leží na cestě $C_{1,2}$ (původní) a po přebarvení se stává součástí cesty barev 2 a 3 vycházející z v_1 . To je ve sporu se strukturálními vlastnostmi (bod 5, Brooksův teorém detailněji rozebírá, že se y stane uzlovým bodem pro cesty, což nelze).

Tím jsme došli ke sporu s předpokladem, že G nelze obarvit. Graf G tedy lze obarvit $\Delta(G)$ barvami.

■

11 Grafy a vektorové prostory

11.1 Těleso \mathbb{Z}_2

$(\mathbb{Z}_2, +, \cdot)$ se skládá ze dvou prvků, tj. $\mathbb{Z}_2 = \{0, 1\}$, a na této množině jsou definovány dvě operace:

$$\begin{array}{c} \text{sčítání } + \end{array} \quad \begin{array}{c|cc} & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{násobení } \cdot \end{array} \quad \begin{array}{c|cc} & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{array}$$

11.2 Symetrická difference

Mějme neorientovaný graf $G = (V, E, \varepsilon)$, $W_G = P(E) = \{x \mid x \subseteq E\}$ je množina všech podmnožin množin hran E (P je potenční množina). Na W_G definujeme *symetrickou difference*, značíme \oplus , tak, že

$$X \oplus Y = (X \setminus Y) \cup (Y \setminus X) = (X \cup Y) \setminus (X \cap Y). \quad (11.1)$$

Platí

- (a) *Komutativita.* $X \oplus Y = Y \oplus X$.
- (b) *Inverz.* $X \oplus X = \emptyset$. Každý prvek je inverz sám k sobě.
- (c) *Neutrálnost.* $X \oplus \emptyset = X$.
- (d) *Asociativita.* $X \oplus (Y \oplus Z) = (X \oplus Y) \oplus Z$

Když (W_G, \oplus, \emptyset) , pak se jedná o *komutativní grupu* s neutrálním prvkem \emptyset , kde $X \oplus X = \emptyset$, tj. prvek X je opačný sám k sobě.

Definujme násobení \star prvků z W_G skaláry 0 a 1 takto

$$1 \star X = X, \quad 0 \star X = \emptyset. \quad (11.2)$$

(W_G, \emptyset, \star) tvoří vektorový prostor nad **tělesem** \mathbb{Z}_2 .

11.3 Charakteristická funkce očíslování

Zvolme libovolné (pevné) očíslování hran E grafu G , že $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$. Pak každá podmnožina $X \subseteq E$ odpovídá své charakteristické funkci, tj. funkci $\chi_X : \{1, 2, \dots, m\} \rightarrow \{0, 1\}$ definované

$$\chi_X(i) = \begin{cases} 0, & e_i \notin X \\ 1, & e_i \in X \end{cases} \quad (11.3)$$

Funkci f_X si můžeme představit jako m -členný vektor

$$(a_1, a_2, \dots, a_m).$$

Přiřazení, které každé podmnožině $X \subseteq E$ přiřazuje charakteristickou funkci χ_X je vzájemně jednoznačné. Navíc platí

$$\emptyset \rightsquigarrow (0, 0, \dots, 0) \quad (11.4)$$

$$E \rightsquigarrow (1, 1, \dots, 1) \quad (11.5)$$

$$Y \rightsquigarrow (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (11.6)$$

$$X \oplus Y \rightsquigarrow (a_1 + b_1, a_2 + b_2, \dots, a_m + b_m), \text{ kde } + \text{ je z } \mathbb{Z}_2 \quad (11.7)$$

11.4 Tvrzení o isomorfnosti W_G

(W_G, \oplus, \cdot) je isomorfní s \mathbb{Z}_2^m , kde m je počet hran grafu G .

DŮKAZ. Tvrzení nám říká

$$(W_G, \oplus, \cdot) \simeq (\mathbb{Z}_2^m, +, \cdot). \quad (11.8)$$

A z **charakteristické funkce očíslování** víme, že to znamená

$$(a_1, \dots, a_m) + (b_1, \dots, b_m) = (a_1 + b_1, \dots, a_m + b_m). \quad (11.9)$$

■

12 Kružnice a řezy

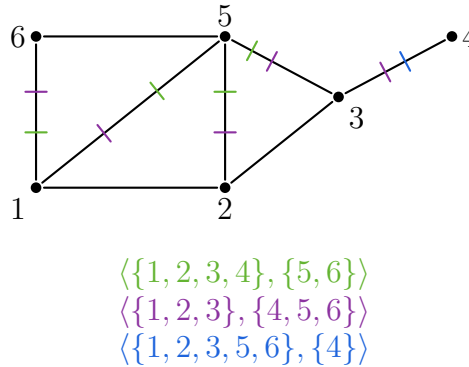
12.1 Řez

At G je **souvislý** graf. Množina hran $S \subseteq E$ je **řez**, jestliže existuje rozklad V na dvě neprázdné množiny V_1, V_2 takové, že

$$S = \{e \mid e = \{u, v\}, u \in V_1, v \in V_2\}. \quad (12.1)$$

S značíme $\langle V_1, V_2 \rangle$.

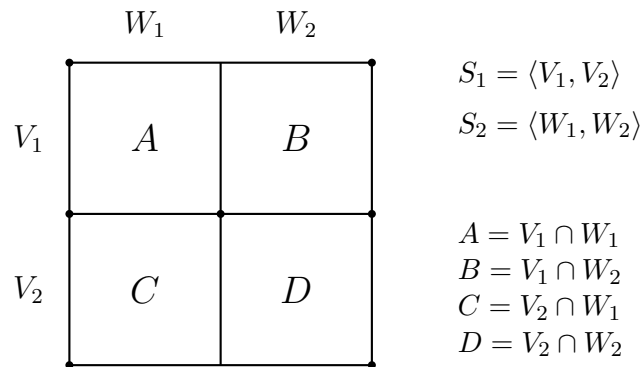
Příklady řezů v grafu



12.2 Věta o dvou různých řezech

Jsou dány dva různé **řezy** $S_1 = \langle V_1, V_2 \rangle$, $S_2 = \langle W_1, W_2 \rangle$ **souvislého** neorientovaného grafu G . Pak $S_1 \oplus S_2$ je také řez grafu G .

DŮKAZ.



A víme

$$A \cup B \neq \emptyset \quad (12.2)$$

$$A \cup C \neq \emptyset \quad (12.3)$$

$$B \cup D \neq \emptyset \quad (12.4)$$

$$C \cup D \neq \emptyset \quad (12.5)$$

Označme: $X, Y \in \{A, B, C, D\}$. $[X, Y] = \{e = \{u, v\} \mid u \in X, v \in Y\}$.

$$\langle V_1, V_2 \rangle = [A, C] \cup [A, D] \cup [B, C] \cup [B, D] \quad (12.6)$$

A protože jsou disjunktní, namísto \cup můžeme psát \oplus .

$$\langle W_1, W_2 \rangle = [A, B] \oplus [A, D] \oplus [C, B] \oplus [C, D] \quad (12.7)$$

$$\langle V_1, V_2 \rangle \oplus \langle W_1, W_2 \rangle = [A, B] \oplus [A, C] \oplus [B, D] \oplus [C, D] \quad (12.8)$$

$$\langle V_1, V_2 \rangle \oplus \langle W_1, W_2 \rangle = \langle A \cup D, B \cup C \rangle \quad (12.9)$$

Ověřme $A \cup D \neq \emptyset \neq B \cup C$. To by muselo platit $V_1 = W_2$ a $V_2 = W_1$, což neplatí. ■

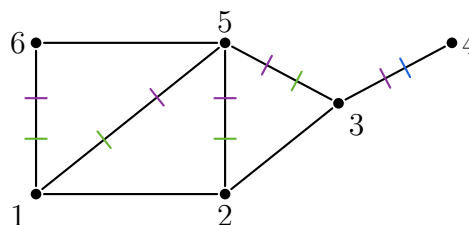
12.3 Prostor řezů

Je dán **souvislý** graf $G = (V, E)$. *Prostor řezů* je vektorový podprostor generovaný množinou všech **řezů** grafu G . Značíme ho $(W_R, \oplus, \emptyset, \cdot)$.

Jinými slovy $W_R = \{S \mid S \text{ je řez}\} \cup \{\emptyset\}$.

12.4 Cutset

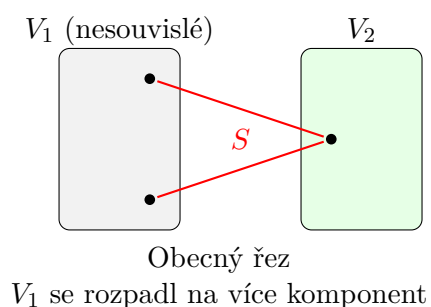
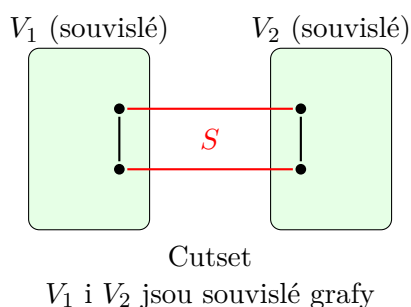
Je dán **souvislý** graf $G = (V, E)$. *Cutset* (min-řez) je minimální (ne nejmenší, ale minimální) množina $S \subseteq E$ taková, že $G \setminus S$ je nesouvislý graf.



cutset (separuje $\{5, 6\}$)
 cutset (separuje $\{4\}$)
 sjednocení dvou cutsetů

12.5 Tvrzení o souvislosti cutsetů

Je dán **řez** $S = \langle V_1, V_2 \rangle$ souvislého neorientovaného grafu G . Pak S je **cutsetem** právě tehdy, když podgrafy indukované množinami V_1 a V_2 jsou **souvislé**.



12.6 Tvrzení o řezu a kostrách

Množina hran $S \subseteq E$ je **řez** právě tehdy, když má s každou kostrou T grafu G neprázdný průnik, tj. $S \cap T \neq \emptyset$.

DŮKAZ.

\Rightarrow : $S \subseteq E$ je řez. Tzn. $G \setminus S$ je **nesouvislý**. Mějme libovolnou kostru T . Kdyby $T \cap S = \emptyset$, tak v $G \setminus S$ existují hrany T . Tj. $G \setminus S$ je souvislý. Což je spor.

\Leftarrow : Předpokládejme, že $T \cap S \neq \emptyset \forall T$.

Kdyby $G \setminus S$ bylo souvislé, tak existuje kostra T_1 grafu $G \setminus S$. Vrcholy jsou stejné, takže T_1 je kostra G . To ale znamená $S \cap T_1 = \emptyset$. Takže $G \setminus S$ musí být nesouvislé. Což je spor. ■

12.7 Prostor kružnic

Je dán **souvislý** graf $G = (V, E)$. *Prostor kružnic* je vektorový prostor generovaný množinou všech **kružnic** grafu G . Značíme ho $(W_K, \oplus, \emptyset, \cdot)$.

12.8 Věta o prostoru kružnic a sudých stupních

Podmnožina $K \subseteq E$ patří do **prostoru kružnic** W_K právě tehdy, když v grafu (V, K) má každý vrchol sudý stupeň.

DŮKAZ.

\Rightarrow : Podmnožina $K \subseteq E$ patří do prostoru kružnic W_K . Pokud K je kružnice, pak v grafu (V, K) má každý vrchol sudý stupeň.

Ukažme, že pokud A, B splňují podmínku sudosti stupňů, tj. každý vrchol má sudý stupeň, tak $A \oplus B$ také splňuje podmínku.

$$A \oplus B = (A \cup B) \setminus (A \cap B) \quad (12.10)$$

Vyberme libovolný vrchol $v \in V$. Spočítejme $d_{A \oplus B}(v)$. Hrany, které zbydou v $A \oplus B$ jsou hrany $(A' \setminus B') \cup B' \setminus A' = K_v$.

$$|K'_v| = |(A' \cup B') \setminus (A' \cap B')| = (|A'| + |B'|) - |A' \cap B'| - |A' \cap B'| \quad (12.11)$$

$$= \underbrace{|A'|}_{d_A(v)} + \underbrace{|B'|}_{d_B(v)} - 2 \underbrace{|A' \cap B'|}_l \quad (12.12)$$

Máme tedy

$$d_{A \oplus B}(v) = d_A(v) + d_B(v) - 2, \quad (12.13)$$

kde l je počet hran incidentních s v , které leží jak v A , tak v B , tedy opět sudé číslo. Rozdíl sudých čísel je také sudé číslo.

\Leftarrow : Předpokládejme, že množina hran A splňuje podmínku sudosti stupňů; tj. $d_A(v)$ je sudé pro každý vrchol $v \in V$.

Jestliže každý vrchol v má v A nulový stupeň, pak $A = \emptyset$ a A leží v prostoru kružnic W_K ; ano, $\emptyset = 0 \cdot K$ pro libovolnou kružnici K .

Předpokládejme, že některý vrchol v má stupeň větší než 0. Pak $d_A(v) \geq 2$. Generujme náhodně tah z vrcholu v . Protože každý vrchol, do kterého se dostaneme má vždy ještě alespoň jednu nepoužitou hranu, jednou se vrátíme do vrcholu, ve kterém tah již byl. Tím jsme uzavřeli kružnici, označme ji K_1 . Vytvoříme $A \oplus K_1 = A \setminus K_1$. Protože každý vrchol měl v kružnici K_1 sudý stupeň, má sudý stupeň i v $A \setminus K_1$. Nyní buď $A_1 = A \setminus K_1$ je prázdná množina, nebo postup opakujeme pro množinu $A \setminus K_1$. Po konečně mnoha krocích dostaneme kružnice K_1, K_2, \dots, K_l takové, že

$$(\dots (A \setminus K_1) \dots K_l) = \emptyset, \text{ proto } A = K_1 \cup \dots \cup K_l = K_1 \oplus \dots \oplus K_l. \quad (12.14)$$

Tedy $A \in W_K$. ■

12.9 Fundamentální systém kružnic

Je dán **souvislý** graf G a jeho kostra T . Označme $T = \{b_1, \dots, b_{n-1}\}$ a $E \setminus T = \{c_1, \dots, c_{m-n+1}\}$ (pozn. b jako *branches*, c jako *chords*).

Fundamentální systém kružnic je $K_{c_1}, K_{c_2}, \dots, K_{c_{m-n+1}}$ vzhledem ke kostře T .

$T \cup \{c_i\}$ obsahuje přesně jednu kružnici K_{c_i} .

12.10 Tvrzení o nezávislosti fundamentálního systému kružnic

Fundamentální systém kružnic $K_{c_1}, K_{c_2}, \dots, K_{c_{m-n+1}}$ (vzhledem k pevně zvolené kostře) je lineárně nezávislá množina vektorového prostoru (W_K, \oplus, \star) .

DŮKAZ. Každá z **kružnic** $K_{c_1}, K_{c_2}, \dots, K_{c_{m-n+1}}$ obsahuje vždy jednu hranu neležící v kostře (to je hrana c_i pro kružnici K_{c_i}) a hrany z kostry T . Proto žádnou kružnici K_{c_i} nemůžeme dostat jako lineární kombinaci ostatních. ■

12.11 Fundamentální systém řezů

Je dán **souvislý** neorientovaný graf G a jeho kostra T . Označme opět $T = \{b_1, b_2, \dots, b_{n-1}\}$ a množinu $E \setminus T = \{c_1, c_2, \dots, c_{m-n+1}\}$.

Odstraníme-li libovolnou hranu b_j z kostry T , rozpadne se nám graf (V, T) na dvě komponenty souvislosti. Označme je V_1^j a V_2^j . Dále označme S_{b_j} řez $\langle V_1^j, V_2^j \rangle$ grafu G . Řezy $S_{b_1}, S_{b_2}, \dots, S_{b_{n-1}}$ tvoří *fundamentální systém řezů* vzhledem ke kostře T .

12.12 Tvrzení o nezávislosti fundamentálního systému řezů

Fundamentální systém řezů $S_{b_1}, S_{b_2}, \dots, S_{b_{n-1}}$ (vzhledem k pevně zvolené kostře) je lineárně nezávislá množina vektorového prostoru (W_R, \oplus, \star) .

DŮKAZ. Každý z **řezů** $S_{b_1}, S_{b_2}, \dots, S_{b_{n-1}}$ obsahuje vždy jednu hranu ležící v kostře (to je hrana b_j pro řez S_{b_j}) a hrany neležící v kostře T . Proto žádný řez S_{b_j} nemůžeme dostat jako lineární kombinaci ostatních řezů z fundamentálního systému řezů. ■

12.13 Tvrzení o generování fundamentálních systémů grafu

Je dán **souvislý** neorientovaný graf G a jeho kostra T . Pak

- prostor **kružnic** (W_K, \oplus, \star) je generován množinou **fundamentálních kružnic** (vzhledem k T);
- prostor **řezů** (W_R, \oplus, \star) je generován množinou **fundamentálních řezů** (vzhledem k T).

DŮKAZ. Dokažme první tvrzení, druhé se dokáže analogicky. Víme, že prostor kružnic W_K je generován množinou všech kružnic grafu G . Stačí proto dokázat, že každá kružnice K v G je součtem některých fundamentálních kružnic.

Uvažujme libovolnou kostru T a kružnici K . Pak K není podmnožinou kostry T . Označme c_1, c_2, \dots, c_r všechny hrany kružnice K , které neleží v T . Označme $K_{c_1}, K_{c_2}, \dots, K_{c_r}$ fundamentální kružnice odpovídající hranám c_1, c_2, \dots, c_r . Utvoříme

$$C = K_{c_1} \oplus K_{c_2} \oplus \dots \oplus K_{c_r}. \quad (12.15)$$

Množina $K \oplus C$ leží v prostoru kružnic a je proto součtem hranově disjunktních kružnic. Navíc platí, že $K \oplus C \subseteq T$. To je ale možné pouze pro $K \oplus C = \emptyset$. Takže dostáváme $K = C$, tudíž K je součtem fundamentálních kružnic $K_{c_1}, K_{c_2}, \dots, K_{c_r}$. ■

12.14 Věta o sudém počtu společných hran a prostorech kružnic nebo řezů

Je dán souvislý neorientovaný graf G s množinou hran E . Pak platí

- 1) $A \subseteq E$ je prvek prostoru **kružnic** grafu G právě tehdy, když má sudý počet společných hran s libovolným **řezem** S grafu G .
- 2) $B \subseteq E$ je prvek prostoru řezů grafu G právě tehdy, když má sudý počet společných hran s libovolným prvkem prostoru kružnic W_K grafu G .

DŮKAZ. Dokažme pouze pro 1). Pro 2) je důkaz analogický.

„ \Rightarrow “: Ať K je kružnice. $S = \langle V_1, V_2 \rangle$. Pak mohou nastat tři možnosti

- (a) $K \not\subseteq E$ (tj. graf indukovaný V_1). To znamená $S \cap K = \emptyset$
- (b) $K \subseteq E$ (tj. graf indukovaný V_2). To znamená $S \cap K = \emptyset$
- (c) $e \in K$, $e = \{x, y\}$, $x \in V_1$, $y \in V_2$. Pak musí $|S \cap K|$ být sudý.

Označme K_1, K_2 a máme pro všechna S řez $|K_1 \cap S| = 2a$, $|K_2 \cap S| = 2b$, $a, b \in \mathbb{N}_0$. Rozepíšme

$$|(K_1 \oplus K_2) \cap S| = |(K_1 \cap S) \oplus (K_2 \cap S)| \quad (12.16)$$

$$= |(K_1 \cap S) \cup (K_2 \cap S)| - |(K_1 \cap S) \cap (K_2 \cap S)| \quad (12.17)$$

$$= \underbrace{|K_1 \cap S|}_{2a} + \underbrace{|K_2 \cap S|}_{2b} - \underbrace{2|(K_1 \cap S) \cap (K_2 \cap S)|}_{2\dots} \quad (12.18)$$

Výsledek musí být očividně sudý.

„ \Leftarrow “: Mějme množinu hran $A \subseteq E$, která má s každým řezem sudý počet společných hran. Je-li A prázdná množina, tak A patří do prostoru kružnic. Předpokládejme, že $A \neq \emptyset$. Ukážeme, že v tomto případě je množina A součtem **fundamentálních kružnic**, a proto prvkem prostoru kružnic W_K , dle 12.10.

Nechť T je některá kostra grafu G , označme $T = \{b_1, b_2, \dots, b_{n-1}\}$, $E \setminus T = \{c_1, c_2, \dots, c_{m-n+1}\}$. Dále nechť $K_{c_1}, K_{c_2}, \dots, K_{c_{m-n+1}}$ je **systém fundamentálních kružnic** vzhledem ke kostře T . Uvažujeme všechny hrany množiny $A \cap (E \setminus T)$. **BŮNO** můžeme předpokládat, že to jsou hrany c_1, \dots, c_r . Množina

$$C = K_{c_1} \oplus K_{c_2} \oplus \dots \oplus K_{c_r}$$

je prvek prostoru **kružnic** a má proto s každým **řezem** sudý počet společných hran. Utvořme množinu $A \oplus C$. Protože A i C měly sudý počet hran s libovolným řezem, má tuto vlastnosti i množina hran $A \oplus C$. Navíc, množina $A \oplus C$ neobsahuje hrany mimo kostru, proto $A \oplus C \subseteq T$.

Sporem ukážeme, že $A \oplus C = \emptyset$. Kdyby pro nějaké $b_i \in T$ platilo $b_i \in A \oplus C$, pak by průnik množiny $A \oplus C$ s **fundamentálním řezem** S_b byl tvořen jedinou hranou, a to b_i , což je ve sporu s faktem, že průnik $A \oplus C$ s libovolným řezem má sudý počet hran. ■