

PB165 Grafy a sítě: Úvod k plánování a rozvrhování

- 1 **Problém rozvrhování:** vlastnosti stroje, omezení, optimalizace
- 2 **Precedenční omezení a disjunktivní grafová reprezentace:** korespondence mezi rozvrhem a grafem
- 3 **Plánování projektu (precedenční omezení):** kritická cesta, kompromisní heuristika
- 4 **Barvení grafu:** algoritmus saturace, problémy přiřazení místností, rezervační problém, plánování operátorů
- 5 **Plánování na počítačové síti:**
 - Transport: doba na dopravu, doba na nastavení
 - Plánování datových přenosů
 - Paralelní úlohy s komunikací
 - Plánování s komunikací a s precedencemi: plánování seznamem, heuristiky mapování, shlukovací heuristiky

Rozvrhování na FI: PA167 Rozvrhování, PA163 Omezující podmínky

Rozvrhování a plánování (scheduling)

● Zdroj/stroj

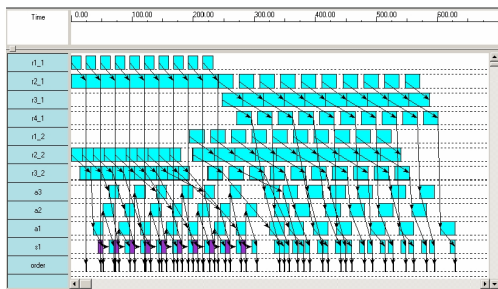
- kapacita
- dostupnost v čase
- rychlost

● Úloha/aktivita

- nejdřívejší startovní čas
- nejpozdější koncový čas
- doba trvání (na referenčním zdroji)
- počet zdrojů
- alternativní zdroje

● Rozvrhování

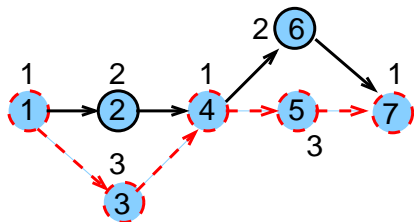
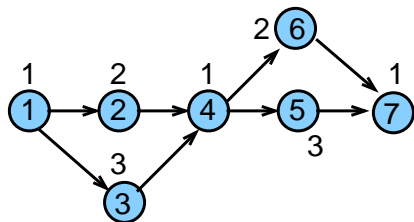
- optimální alokace/přirazení zdrojů v čase množině úloh
 - omezené množství zdrojů
 - maximalizace zisku za daných omezení



Visopt ShopFloor System

Příklad: rozvrhování s precedencemi

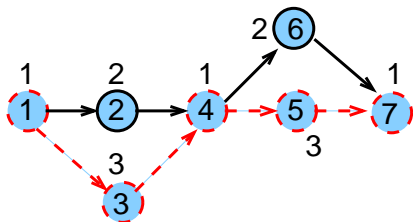
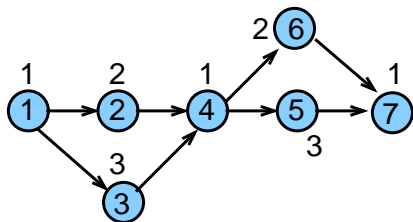
- Rozvrhování 7 úloh na 2 zdrojích
 - doba trvání úlohy + precedenční podmínky
 - nalezení rozvrhu tak, aby se minimalizovala doba nutná na realizaci všech úloh



kritická cesta

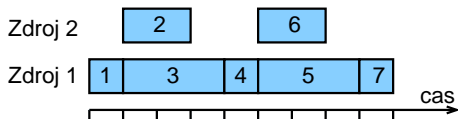
Příklad: rozvrhování s precedencemi

- Rozvrhování 7 úloh na 2 zdrojích
 - doba trvání úlohy + precedenční podmínky
 - nalezení rozvrhu tak, aby se minimalizovala doba nutná na realizaci všech úloh



kritická cesta

- Možný rozvrh
 - na kritické (nejdelší) cestě nesmí vzniknout zdržení



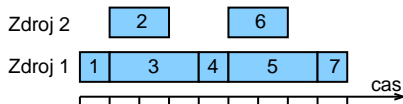
Úlohy, stroje

Stroje $i = 1, \dots, m$

Úlohy $j = 1, \dots, n$

Sekvenční úloha

- úloha je zpracovávána na jednom stroji
- př. 7 úloh na 2 strojích



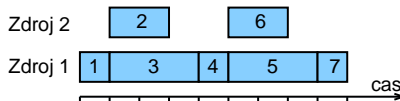
Úlohy, stroje

Stroje $i = 1, \dots, m$

Úlohy $j = 1, \dots, n$

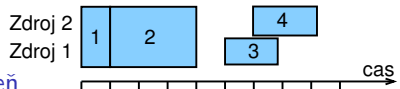
Sekvenční úloha

- úloha je zpracovávána na jednom stroji
- př. 7 úloh na 2 strojích



Paralelní úloha

- úloha je zpracovávána na několika strojích
- všechny operace úlohy zpracovávány **zároveň**
- úlohy 1 a 2 jsou paralelní, úlohy 3 a 4 jsou sekvenční



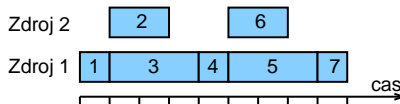
Úlohy, stroje

Stroje $i = 1, \dots, m$

Úlohy $j = 1, \dots, n$

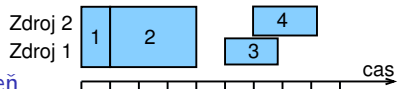
Sekvenční úloha

- úloha je zpracovávána na jednom stroji
- př. 7 úloh na 2 strojích



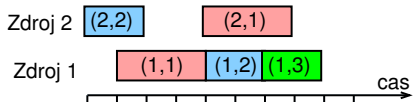
Paralelní úloha

- úloha je zpracovávána na několika strojích
- všechny operace úlohy zpracovávány **zároveň**
- úlohy 1 a 2 jsou paralelní, úlohy 3 a 4 jsou sekvenční



Operace (i,j) nebo provádění úlohy j na stroji i

- úloha se může skládat z několika operací
- typicky: operace úlohy zpracovány na strojích postupně **bez překrytí**
- př. úloha 1 s operacemi (1,1), (2,1)
úloha 2 s operacemi (1,2), (2,2)
úloha 3 s operací (1,3)



Statické parametry úlohy

- **doba trvání p_j (p_{ij}):** doba provádění úlohy j (na stroji i)
- **termín dostupnosti j (*release date*) r_j :**
nejdřívější čas, ve kterém může být úloha j prováděna
- **termín dokončení (*due date*) d_j :**
čas, do kdy musí být úloha j nejpozději dokončena
- **váha w_j :**
důležitost úlohy j relativně vzhledem k ostatním úlohám v systému

Statické parametry úlohy

- **doba trvání p_j (p_{ij}):** doba provádění úlohy j (na stroji i)
- **termín dostupnosti j (*release date*) r_j :**
nejdřívější čas, ve kterém může být úloha j prováděna
- **termín dokončení (*due date*) d_j :**
čas, do kdy musí být úloha j nejpozději dokončena
- **váha w_j :**
důležitost úlohy j relativně vzhledem k ostatním úlohám v systému

Dynamické parametry úlohy

- **čas startu úlohy (*start time*) S_j (S_{ij}):**
čas, kdy začne provádění úlohy j (na stroji i)
- **čas konce úlohy (*completion time*) C_j (C_{ij}):**
čas, kdy je dokončeno provádění úlohy j (na stroji i)

Grahamova klasifikace $\alpha|\beta|\gamma$

používá se pro popis rozvrhovacích problémů

- α : charakteristiky stroje
 - popisuje způsob alokace úloh na stroje
- β : charakteristiky úloh
 - popisuje omezení aplikovaná na úlohy
- γ : optimalizační kritéria

Grahamova klasifikace $\alpha|\beta|\gamma$

používá se pro popis rozvrhovacích problémů

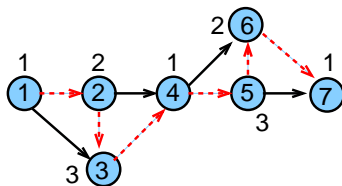
- α : charakteristiky stroje
 - popisuje způsob alokace úloh na stroje
- β : charakteristiky úloh
 - popisuje omezení aplikovaná na úlohy
- γ : optimalizační kritéria

<http://www.informatik.uni-osnabrueck.de/knust/class/>

- složitost a algoritmy pro jednotlivé rozvrhovací problémy

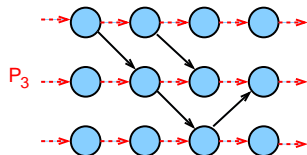
Jeden stroj 1: $1 | \dots | \dots$

- nejjednodušší varianta
- speciální případ dalších složitějších prostředí stroje



Identické paralelní stroje P_m

- m identických strojů zapojených paralelně (se stejnou rychlostí)
- úloha je dána jedinou operací
- úloha může být prováděna na libovolném z m strojů



Paralelní stroje s různou rychlostí Q_m

- doba trvání úlohy j na stroji i přímo závislá na jeho rychlosti v_i
- $p_{ij} = p_j / v_i$
- příklad:
několik počítačů s různou rychlostí procesoru

Paralelní stroje s různou rychlostí Q_m

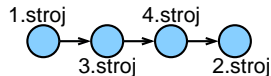
- doba trvání úlohy j na stroji i přímo závislá na jeho rychlosti v_i
- $p_{ij} = p_j / v_i$
- příklad:
několik počítačů s různou rychlostí procesoru

Nezávislé paralelní stroje s různou rychlostí R_m

- stroje mají různou rychlost pro různé úlohy
- stroj i zpracovává úlohu j rychlostí v_{ij}
- $p_{ij} = p_j / v_{ij}$
- příklad:
vektorový počítač počítá vektorové úlohy rychleji než klasické PC

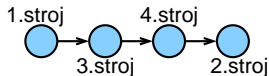
Multi-operační (*shop*) problémy

- jedna úloha je prováděna postupně na několika strojích
 - úloha j se skládá z několika operací (i, j)
 - operace (i, j) úlohy j je prováděna na stroji i po dobu p_{ij}
 - příklad: úloha j se 4 operacemi $(1, j), (2, j), (3, j), (4, j)$



Multi-operační (*shop*) problémy

- jedna úloha je prováděna postupně na několika strojích
 - úloha j se skládá z několika operací (i, j)
 - operace (i, j) úlohy j je prováděna na stroji i po dobu p_{ij}
 - příklad: úloha j se 4 operacemi $(1, j), (2, j), (3, j), (4, j)$

Open shop O_m

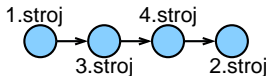
- multi-operační problém s m stroji (žádné nové vlastnosti)

Job shop J_m

- multi-operační problém s m stroji
- pořadí provádění operací pro každou úlohu je předem určeno
- $(i, j) \rightarrow (k, j)$ určuje, že úloha j má být prováděna na stroji i dříve než na stroji k
příklad: $(2, j) \rightarrow (1, j) \rightarrow (3, j) \rightarrow (4, j)$

Multi-operační (*shop*) problémy

- jedna úloha je prováděna postupně na několika strojích
 - úloha j se skládá z několika operací (i, j)
 - operace (i, j) úlohy j je prováděna na stroji i po dobu p_{ij}
 - příklad: úloha j se 4 operacemi $(1, j), (2, j), (3, j), (4, j)$

Open shop O_m

- multi-operační problém s m stroji (žádné nové vlastnosti)

Job shop J_m

- multi-operační problém s m stroji
- pořadí provádění operací pro každou úlohu je předem určeno
- $(i, j) \rightarrow (k, j)$ určuje, že úloha j má být prováděna na stroji i dříve než na stroji k
příklad: $(2, j) \rightarrow (1, j) \rightarrow (3, j) \rightarrow (4, j)$

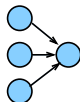
Multi-operační problémy = klasické detailně studované problémy
operačního výzkumu

- reálné problémy mnohem komplikovanější
- metody řešení lze použít jako základ pro řešení složitějších problémů
- př. automobilová výrobní linka

Precedenční podmínky

prec

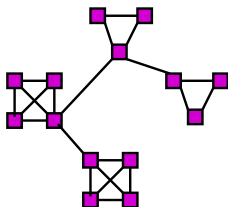
- úloha může být prováděna až po skončení další(ch) úloh
- pro úlohy a, b píšeme $a \rightarrow b$, což znamená $S_a + p_a \leq S_b$



Vhodnost stroje

M_j

- podmnožina strojů M_j , na níž lze provádět úlohu j
- př. úloha může být prováděna pouze na těch strojích v počítačové síti, kde jsou dostupná data

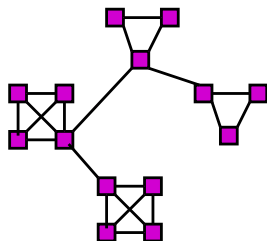


Doprava a komunikace

 t_{jkl}, t_{kl}, t_j

- doba nutná na přepravu úlohy j mezi dvěma zařízeními k a l
 - t_{jkl} doba na přepravu ze stroje k na stroj l pro úlohu j
 - t_{kl} doba nezávislá na úloze
 - t_j doba nezávislá na strojích
- omezení na přepravované/přenášené množství a možnou dobu přepravy
- omezení na propustnost (kapacitu) hrany/linky
- omezení na vzdálenost uzlů pro přepravu/přenos

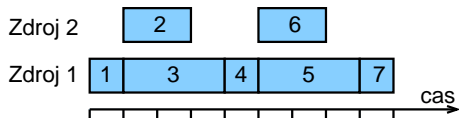
t_{kl} dáno vzdáleností uzlů v síti/grafu:



- **Makespan**: maximální čas konce úloh

$$C_{\max} = \max(C_1, \dots, C_n)$$

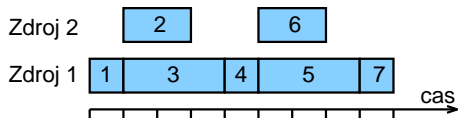
- Příklad: $C_{\max} = \max\{1, 3, 4, 5, 8, 7, 9\} = 9$



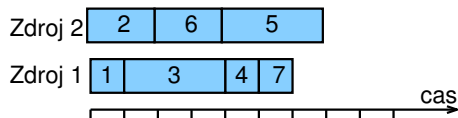
- **Makespan**: maximální čas konce úloh

$$C_{\max} = \max(C_1, \dots, C_n)$$

- Příklad: $C_{\max} = \max\{1, 3, 4, 5, 8, 7, 9\} = 9$



- Cíl: **minimalizace makespan** často
 - maximalizuje *výkon (throughput)*
 - zajišťuje *rovnoměrné zatížení strojů (load balancing)*
 - příklad: $C_{\max} = \max\{1, 2, 4, 5, 7, 4, 6\} = 7$

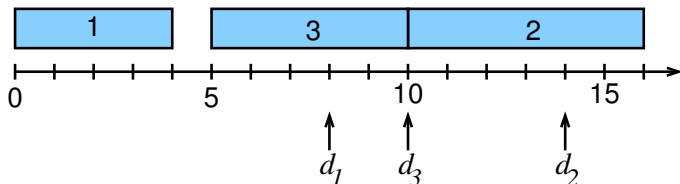


- Velmi často používané základní kritérium

- Zpoždění (*lateness*) úlohy j : $L_j = C_j - d_j$
- Maximální zpoždění

$$L_{\max} = \max(L_1, \dots, L_n)$$

- Cíl: minimalizace maximálního zpoždění
- Příklad:

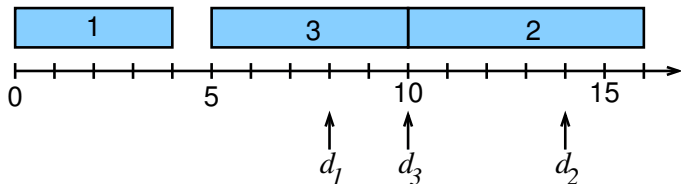


$$\begin{aligned}
 L_{\max} &= \max(L_1, L_2, L_3) = \\
 &= \max(C_1 - d_1, C_2 - d_2, C_3 - d_3) = \\
 &= \max(4 - 8, 16 - 14, 10 - 10) = \\
 &= \max(-4, 2, 0) = 2
 \end{aligned}$$

- **Nezáporné zpoždění (*tardiness*)** úlohy j : $T_j = \max(C_j - d_j, 0)$
- Cíl: **minimalizace celkového zpoždění**

$$\sum_{j=1}^n T_j \quad \text{celkové zpoždění}$$

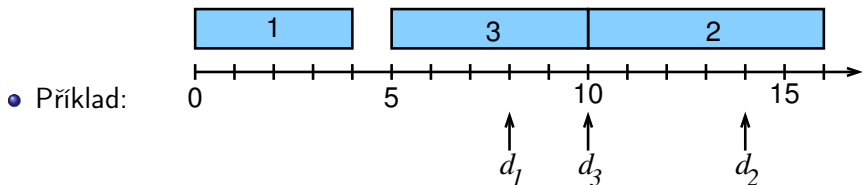
- Příklad:



$$T_1 + T_2 + T_3 = \max(C_1 - d_1, 0) + \max(C_2 - d_2, 0) + \max(C_3 - d_3, 0) = \max(4 - 8, 0) + \max(16 - 14, 0) + \max(10 - 10, 0) = 0 + 2 + 0 = 2$$

- **Nezáporné zpoždění (*tardiness*)** úlohy j : $T_j = \max(C_j - d_j, 0)$
- Cíl: **minimalizace celkového zpoždění**

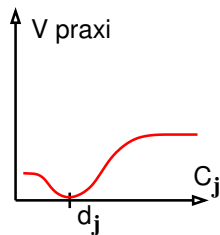
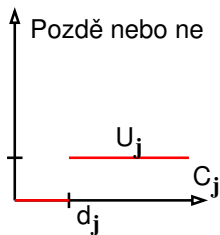
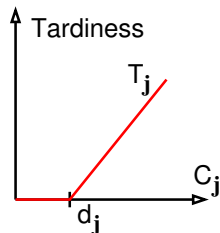
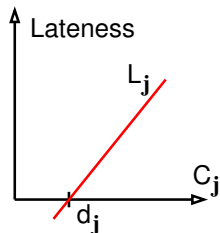
$$\sum_{j=1}^n T_j \quad \text{celkové zpoždění}$$



$$T_1 + T_2 + T_3 = \max(C_1 - d_1, 0) + \max(C_2 - d_2, 0) + \max(C_3 - d_3, 0) = \max(4 - 8, 0) + \max(16 - 14, 0) + \max(10 - 10, 0) = 0 + 2 + 0 = 2$$

- Cíl: **minimalizace celkového váženého zpoždění**

$$\sum_{j=1}^n w_j T_j \quad \text{celkové vážené zpoždění}$$



Vypočítejte makespan, maximální zpoždění (*lateness*) a celkové zpoždění (*tardiness*) a celkové vážené zpoždění pro daný rozvrh.

Úloha	1	2	3	4	5	6
Čas startu úlohy	0	10	1	12	5	8
Váha úlohy	1	2	1	1	2	1
Doba trvání	1	2	4	1	3	2
Termín dokončení	4	13	5	14	7	8

Uveďte odpovídající značení i vztahy pro jednotlivá optimalizační kritéria.

Cvičení: optimalizační kritéria a paralelní úlohy

Vypočítejte makespan, maximální zpoždění (*lateness*) a celkové zpoždění (*tardiness*) a celkové vážené zpoždění pro daný rozvrh.

Úloha	1	2	3	4	5	6
Stroj	1&2	1	2	1&2	1	1&2
Čas startu úlohy	0	10	1	12	3	8
Váha úlohy	1	2	1	2	1	3
Doba trvání	1	2	4	3	5	2
Termín dokončení	4	13	3	14	7	8

Uveďte odpovídající značení i vztahy pro jednotlivá optimalizační kritéria.

Příklady rozvrhovacích problému s Grahamovou klasifikací

- $1|prec|C_{max}$
 - plánování úloh provázaných precedencemi na jednom stroji s cílem minimalizovat makespan

Příklady rozvrhovacích problému s Grahamovou klasifikací

- $1|prec|C_{\max}$
 - plánování úloh provázaných precedencemi na jednom stroji s cílem minimalizovat makespan
- $Pm|r_j, M_j|\sum w_j T_j$
 - systém s m stroji zapojenými paralelně, kde
 - úloha j přijde v čase r_j a má být naplánována do času d_j
 - úloha j může být naplánována pouze na podmnožině strojů dané M_j a pokud není úloha j zpracována včas, tak je penalizována $w_j T_j$

Příklady rozvrhovacích problému s Grahamovou klasifikací

- $1|prec|C_{\max}$
 - plánování úloh provázaných precedencemi na jednom stroji s cílem minimalizovat makespan
- $Pm|r_j, M_j|\sum w_j T_j$
 - systém s m stroji zapojenými paralelně, kde
 - úloha j přijde v čase r_j a má být naplánována do času d_j
 - úloha j může být naplánována pouze na podmnožině strojů dané M_j a pokud není úloha j zpracována včas, tak je penalizována $w_j T_j$
- $Jm||C_{\max}$
 - job shop problém, kde je cílem minimalizovat makespan
 - velmi často studovaný a velmi známý typ job-shop problému

Příklady rozvrhovacích problému s Grahamovou klasifikací

- $1|prec|C_{max}$
 - plánování úloh provázaných precedencemi na jednom stroji s cílem minimalizovat makespan
- $Pm|r_j, M_j|\sum w_j T_j$
 - systém s m stroji zapojenými paralelně, kde
 - úloha j přijde v čase r_j a má být naplánována do času d_j
 - úloha j může být naplánována pouze na podmnožině strojů dané M_j a pokud není úloha j zpracována včas, tak je penalizována $w_j T_j$
- $Jm||C_{max}$
 - job shop problém, kde je cílem minimalizovat makespan
 - velmi často studovaný a velmi známý typ job-shop problému
- $P_\infty|prec|C_{max}$
 - problém s neomezeným počtem strojů zapojených paralelně, kde jsou úlohy provázány precedenčními podmínkami a kde je cílem minimalizovat makespan
 - klasický problém plánování projektu

Cvičení: navrhňte různé rozvrhovací problémy pomocí Grahamovy klasifikace a popište je

Úvod k plánování a rozvrhování

1 Terminologie a klasifikace

- Úvod
- Vlastnosti stroje
- Omezení
- Optimalizace
- Příklady

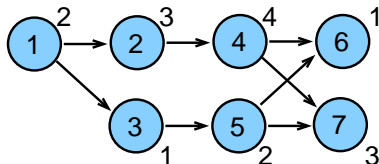
2 Grafová reprezentace pro:

- Precedenční omezení
- Disjunktivní grafová reprezentace

Precedenční omezení

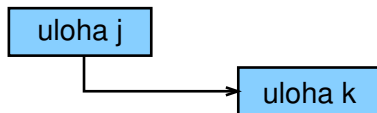
- Úloha může být prováděna až po skončení další(ch) úloh
 - úloha a před úlohou b : $a \rightarrow b : S_a + p_a \leq S_b$
- **Orientovaný acyklický vrcholově ohodnocený graf**
 - uzly reprezentují úlohy
 - hrany reprezentují precedenční podmínky
 - ohodnocení vrcholu reprezentuje dobu trvání
 - graf bez cyklů (pro cyklický graf neexistuje žádné řešení)

Úloha	Doba trvání	Předchůdci
1	2	–
2	3	1
3	1	1
4	4	2
5	2	3
6	1	4,5
7	3	4,5

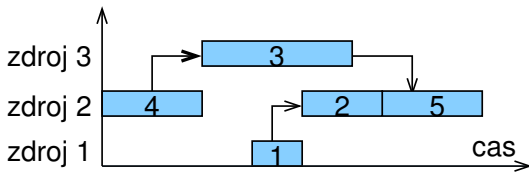


Úloha jako obdélník

- Úloha jako uzel lze převést na **úloha jako obdelník**



- Horizontální strany obdelníku použity jako časové osy odpovídající době provádění úlohy



- Příklad: zprostředkování, instalace a testování rozsáhlého počítačového systému
 - projekt zahrnuje
 - evaluace a výběr hardware, vývoj software, nábor a školení lidí, testování a ladění systému, ...
 - precedenční vztahy
 - některé úlohy mohou být prováděny paralelně
 - úloha musí být realizována až po dokončení jiných úloh
 - cíl: minimalizovat cenu a čas na realizaci celého projektu
 - čas na realizaci projektu (makespan) lze promítnout do ceny projektu

- Příklad: zprostředkování, instalace a testování rozsáhlého počítačového systému
 - projekt zahrnuje
 - evaluace a výběr hardware, vývoj software, nábor a školení lidí, testování a ladění systému, ...
 - precedenční vztahy
 - některé úlohy mohou být prováděny paralelně
 - úloha musí být realizována až po dokončení jiných úloh
 - cíl: minimalizovat cenu a čas na realizaci celého projektu
 - čas na realizaci projektu (makespan) lze promítnout do ceny projektu
- Obecně: problémy plánování projektu
 - příští přednáška
- Rozšíření: plánování workflows
 - 1 orientovaný acyklický graf pro provádění úloh na počítačové síti
 - 2 obecné rozšíření: cyklické grafy + podmínky vyhodnocení cyklů

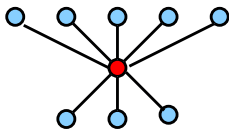
Disjunktivní grafová reprezentace a multi-operační rozvrhování

- n úloh
- m strojů
- Jedna úloha je prováděna postupně na několika strojích
- Operace (i, j) : provádění úlohy j na stroji i
- p_{ij} : trvání operace (i, j)
- Pořadí operací úlohy je předem stanoveno:
 - $(i, j) \rightarrow (k, j)$ specifikuje, že úloha j má být prováděna na stroji i dříve než na stroji k
- Cíl: rozvrhovat úlohy na strojích
 - bez překrytí na strojích
 - bez překrytí v rámci úlohy
 - minimalizace *makespan* C_{max}

tedy jedná se o job shop problém s minimalizací makespan $Jm||C_{max}$

- Rozdílné typy aut na montážní lince
 - dvou-dveřové kupé, čtyř-dveřový sedan, ...
 - rozdílné barvy
 - rozdílné vybavení: automatická vs. manuální převodovka, posuvná střech, ...

- **Kritická místa** (*bottlenecks*)



- výkon stroje ovlivňuje tempo výroby
 - např. lakování (změna barvy vyžaduje časově náročné čištění)
- Cíl
 - maximalizace výkonnosti vhodným seřazením automobilů,
 - rovnoměrná pracovní zátěž na jednotlivých výrobních místech

Příklad: job shop problém

Data:

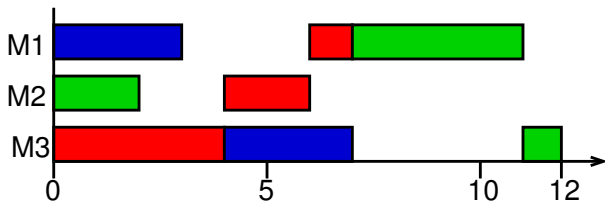
- stroje: $M1, M2, M3$
- úlohy: $J1 : (3, 1) \rightarrow (2, 1) \rightarrow (1, 1)$
 $J2 : (1, 2) \rightarrow (3, 2)$
 $J3 : (2, 3) \rightarrow (1, 3) \rightarrow (3, 3)$
- doby trvání: $p_{31} = 4, p_{21} = 2, p_{11} = 1$
 $p_{12} = 3, p_{32} = 3$
 $p_{23} = 2, p_{13} = 4, p_{33} = 1$

Příklad: job shop problém

Data:

- stroje: $M1, M2, M3$
- úlohy: $J1 : (3, 1) \rightarrow (2, 1) \rightarrow (1, 1)$
 $J2 : (1, 2) \rightarrow (3, 2)$
 $J3 : (2, 3) \rightarrow (1, 3) \rightarrow (3, 3)$
- doby trvání: $p_{31} = 4, p_{21} = 2, p_{11} = 1$
 $p_{12} = 3, p_{32} = 3$
 $p_{23} = 2, p_{13} = 4, p_{33} = 1$

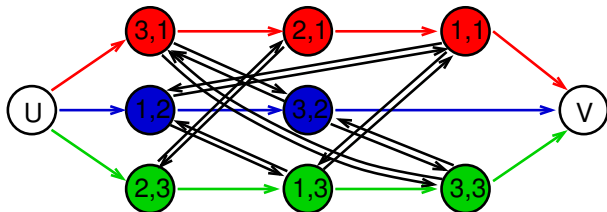
Řešení:



Disjunktivní grafová reprezentace

Graf $G = (N, A \cup B \cup P)$

- uzly odpovídají operacím $N = \{(i, j) | (i, j) \text{ je operace}\} \cup \{U, V\}$
- dva pomocné uzly U a V reprezentující zdroj a stok
- **konjunktivní hrany** A reprezentují pořadí operací úlohy
 - $(i, j) \rightarrow (k, j) \in A \iff$ operace (i, j) předchází (k, j)
- **disjunktivní hrany** B reprezentují konflikty na strojích
 - dvě operace (i, j) a (i, l) jsou spojeny dvěma opačně orientovanými hranami
- **pomocné hrany** P
 - hrany z U ke všem prvním operacím úlohy
 - hrany ze všech posledních operací úlohy do V



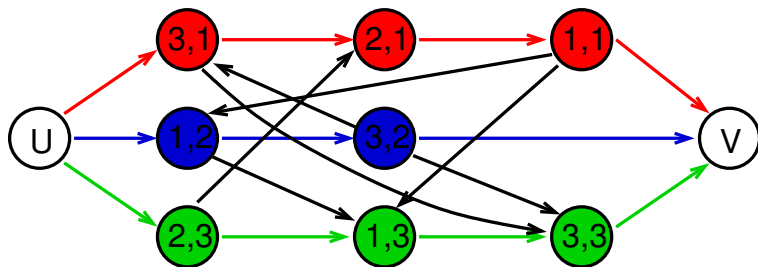
Pojmy:

- Podmnožina $D \subset B$ je nazývána **výběr**, jestliže obsahuje z každého páru disjunktivních hran právě jednu
- Výběr D je **splnitelný**, jestliže výsledný orientovaný graf $G(D) = (N, A \cup D \cup P)$ je acyklický
 - jedná se o graf s pomocnými, konjunktivními hranami a vybranými diskjunktivními hranami

Poznámky:

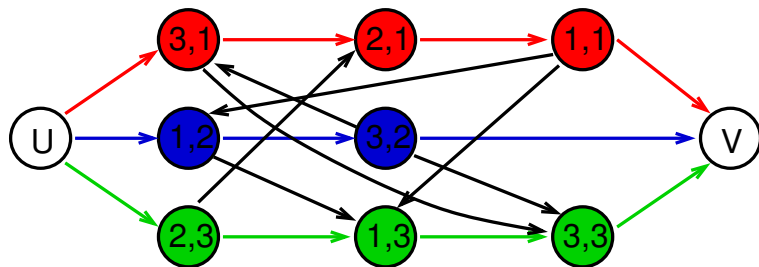
- splnitelný výběr určuje posloupnost, ve které jsou operace prováděny na strojích
- každý (konzistentní) rozvrh jednoznačně určuje splnitelný výběr
- každý splnitelný výběr jednoznačně určuje (konzistentní) rozvrh

Příklad: **nesplnitelný** výběr



V grafu existuje v důsledku nevhodného výběru hran cyklus:

Příklad: *nesplnitelný* výběr



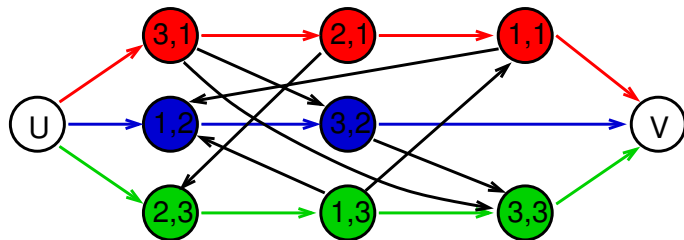
V grafu existuje v důsledku nevhodného výběru hran cyklus:

- $(1, 2) \rightarrow (3, 2)$
- $(3, 2) \rightarrow (3, 1) \rightarrow (2, 1) \rightarrow (1, 1) \rightarrow (1, 2)$

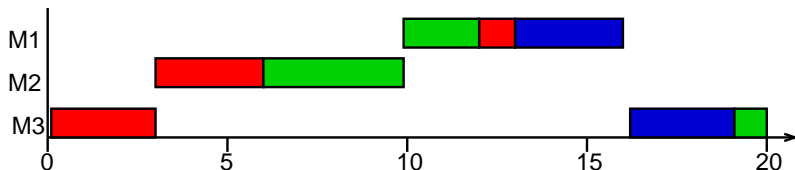
\Rightarrow nelze splnit (k tomuto výběru neexistuje rozvrh)

Příklad: splnitelný výběr

Jakým způsobem nalézt rozvrh pro daný splnitelný výběr?



Tedy: jakým způsobem lze nalézt tento odpovídající rozvrh:



Výpočet rozvrhu pro výběr

Metoda: výpočet nejdelších cest z U do dalších uzlů v $G(D)$

Technický popis:

- uzly (i, j) mají ohodnocení p_{ij} , uzel U má ohodnocení 0
- délka cesty i_1, i_2, \dots, i_r : součet ohodnocení uzlů i_1, i_2, \dots, i_{r-1}
- spočítej délku l_{ij} nejdelší cesty z U do (i, j) a V

Výpočet rozvrhu pro výběr

Metoda: výpočet nejdelších cest z U do dalších uzlů v $G(D)$

Technický popis:

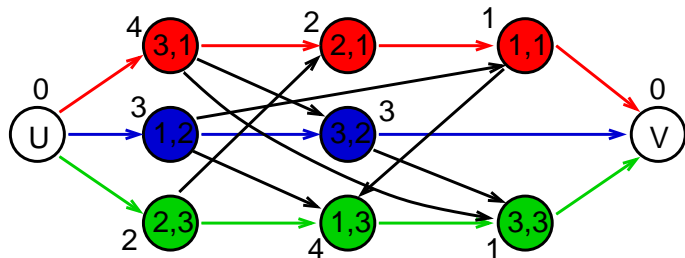
- uzly (i, j) mají ohodnocení p_{ij} , uzel U má ohodnocení 0
- délka cesty i_1, i_2, \dots, i_r : součet ohodnocení uzlů i_1, i_2, \dots, i_{r-1}
- spočítej délku l_{ij} nejdelší cesty z U do (i, j) a V
 - 1 $l_U = 0$ a pro každý uzel (i, j) s jediným předchůdcem U : $l_{ij} = 0$
 - 2 vypočítej postupně pro všechny zbývající uzly (i, j) (a pro uzel V):

$$l_{ij} = \max_{\forall (k,l):(k,l) \rightarrow (i,j)} (l_{kl} + p_{kl})$$

tj. projdeme všechny předchůdce (k, l) uzlu (i, j)
délka cesty do (i, j) přes (k, l) je $l_{kl} + p_{kl}$

- zahaj operaci (i, j) v čase l_{ij}
- délka nejdelší cesty z U do V je rovna *makespan*
 - tato cesta je kritická cesta

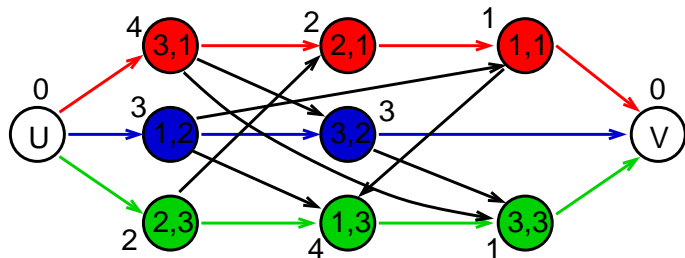
Příklad: výpočet rozvrhu pro výběr



Výpočet l_{ij} :

uzel	(3,1)	(1,2)	(2,3)	(2,1)	(3,2)	(1,1)	(1,3)	(3,3)	V
délka									

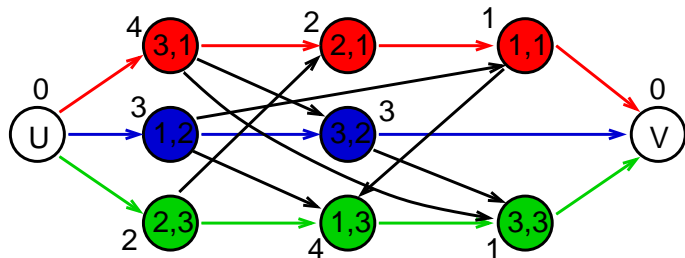
Příklad: výpočet rozvrhu pro výběr



Výpočet l_{ij} :

uzel	(3,1)	(1,2)	(2,3)	(2,1)	(3,2)	(1,1)	(1,3)	(3,3)	V
délka	0	0	0						

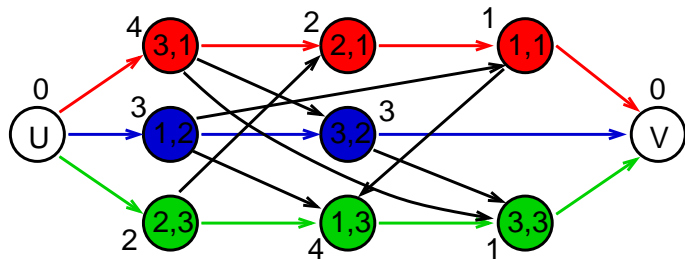
Příklad: výpočet rozvrhu pro výběr



Výpočet l_{ij} :

uzel	(3,1)	(1,2)	(2,3)	(2,1)	(3,2)	(1,1)	(1,3)	(3,3)	V
délka	0	0	0	4	4				

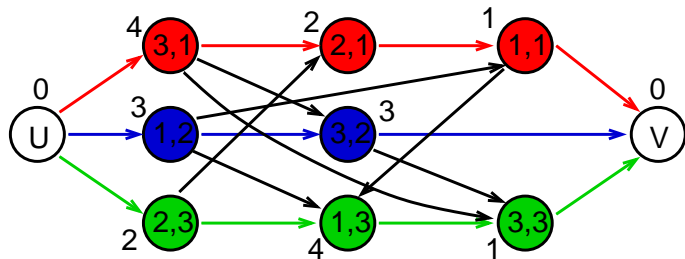
Příklad: výpočet rozvrhu pro výběr



Výpočet l_{ij} :

uzel	(3,1)	(1,2)	(2,3)	(2,1)	(3,2)	(1,1)	(1,3)	(3,3)	V
délka	0	0	0	4	4	6			

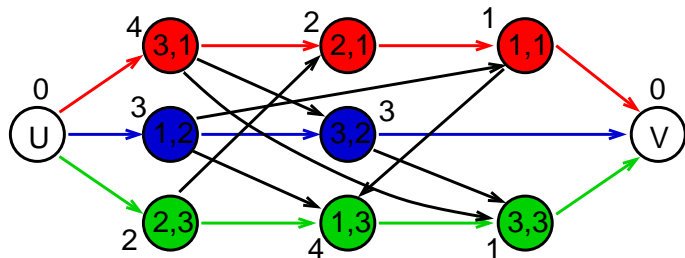
Příklad: výpočet rozvrhu pro výběr



Výpočet l_{ij} :

uzel	(3,1)	(1,2)	(2,3)	(2,1)	(3,2)	(1,1)	(1,3)	(3,3)	V
délka	0	0	0	4	4	6	7		

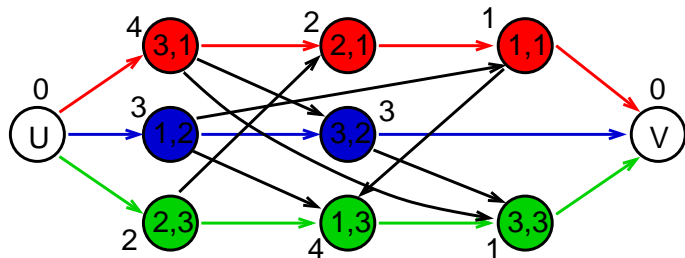
Příklad: výpočet rozvrhu pro výběr



Výpočet l_{ij} :

uzel	(3,1)	(1,2)	(2,3)	(2,1)	(3,2)	(1,1)	(1,3)	(3,3)	V
délka	0	0	0	4	4	6	7	11	

Příklad: výpočet rozvrhu pro výběr

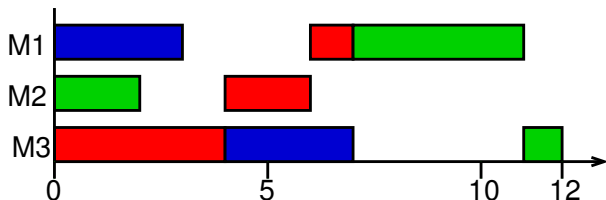


Výpočet l_{ij} :

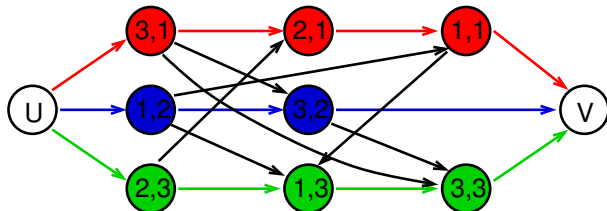
uzel	(3,1)	(1,2)	(2,3)	(2,1)	(3,2)	(1,1)	(1,3)	(3,3)	V
délka	0	0	0	4	4	6	7	11	12

Konstrukce výběru pro daný rozvrh

Nalezněte výběr hran pro daný rozvrh:



Konstrukce odpovídajícího výběru: vybereme disjunktivní hrany, které odpovídají uspořádání operací úlohy v rozvrhu



Uveďte grafovou reprezentaci pro zadaný *job shop* problém a ukažte na něm příklad *splnitelného výběru* a *nesplnitelného výběru*. Pro Vámi vytvořený splnitelný výběr nalezněte odpovídající rozvrh.

Zadání problému je následující:

- máme 3 stroje
- máme 3 úlohy s následujícími precedencemi:

$$J1: (2, 1) \rightarrow (1, 1) \rightarrow (3, 1)$$

$$J2: (3, 2) \rightarrow (2, 2) \rightarrow (1, 2)$$

$$J3: (1, 3) \rightarrow (3, 3),$$

- doby trvání operací jsou:

$$p_{21} = 2, p_{11} = 4, p_{31} = 1,$$

$$p_{32} = 4, p_{22} = 2, p_{12} = 1,$$

$$p_{13} = 3, p_{33} = 3.$$