

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Zpracování oběhů hnacích drážních vozidel
Českých drah, a. s.

Bc. Jan Rulíšek

Diplomová práce

2012

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Jan Rulišek
Osobní číslo: D10740
Studijní program: N3708 Dopravní inženýrství a spoje
Studijní obor: Technologie a řízení dopravy
Název tématu: Zpracování oběhů hnacích drážních vozidel Českých drah, a. s.
Zadávající katedra: Katedra technologie a řízení dopravy

Zásady pro vypracování:

Úvod

1. Analýza metod operačního výzkumu pro sestavu oběhů vozidel
2. Analýza současného stavu zpracování oběhů u Českých drah, a. s.
3. Návrh a zhodnocení nových možností zpracování oběhů

Závěr

Rozsah grafických prací: 3 - 4
Rozsah pracovní zprávy: 40 - 50
Forma zpracování diplomové práce: tištěná
Seznam odborné literatury:

1. Předpis ČD V1, Předpis pro organizaci provozu v depech kolejových vozidel
2. Předpis ČD V25, Předpis pro organizaci údržby elektrických a motorových hnacích vozidel vložených, přípojných a řídicích vozů
3. Škapa, P.: Provoz dep I, VŠB-TU Ostrava, skriptá 2004. ISBN 80-248-0540-5.
4. Janáček, J.: Optimalizace na dopravních sítích, Žilinská univerzita, 2002. ISBN 80-8070-031-1.

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Šourek, Ph.D.
Katedra technologie a řízení dopravy

Datum zadání diplomové práce: 1. února 2012
Termín odevzdání diplomové práce: 23. května 2012

prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.

doc. Ing. Pavel Drdla, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 1. února 2012

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/200 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Zábřeze dne 12. 4. 2012.

Bc. Jan Rulíšek

ANOTACE

Práce je zaměřena na problematiku zpracování sestav oběhů hnacích drážních vozidel u Českých drah, a. s. Součástí práce je teoretická část věnující se zpracování oběhů vozidel pomocí metod operačního výzkumu. Dále je zde zpracován rozbor současného stavu zpracování oběhů hnacích drážních vozidel u Českých drah, a. s. Cílem práce je navrhnout nové možnosti zpracování oběhů hnacích drážních vozidel v následujících letech.

KLÍČOVÁ SLOVA

oběh, hnací drážní vozidlo, turnusová skupina, České dráhy, Brno

TITLE

Processing of Rolling Stocks' Turnovers for České dráhy, a. s.

ANNOTATION

The diploma work is focused on processing of rolling stocks' turnovers for České dráhy, a. s. method. The diploma work includes the part of processing of rolling stocks' turnovers by operations researchs' methods. Next part of the work is analysis of current state of processing of rolling stocks' turnovers for České dráhy, a. s. The main task of this diploma work is to propose brand new possibilities for processing of rolling stocks' turnovers in the future.

KEYWORDS

Turnover, Rolling Stock, Engine Roster, České dráhy, Brno

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád vyjádřil své upřímné poděkování vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Šourkovi, Ph.D. za vynaložené úsilí a poskytnuté rady během konzultací.

Dále bych rád poděkoval vedoucímu provozu DKV Brno Ing. Aloisi Kotrbovi, Ph.D. za realizaci zadavatelské činnosti. Poděkování patří také konzultantům z DKV Brno, konkrétně Ing. Jaroslavu Bárovi, Ing. Jiřímu Kotasovi a p. Konstantinu Sýkorovi za jejich čas a cenné rady při odborných konzultacích této diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD	10
1 ANALÝZA METOD OPERAČNÍHO VÝZKUMU PRO SESTAVU OBĚHŮ VOZIDEL.....	11
1.1 Přehled pojmů.....	11
1.2 Typy úloh pro tvorbu turnusů	13
1.2.1 Úlohy dle časového určení spojů	13
1.2.2 Úlohy dle tvaru účelové funkce	13
1.3 Nákladové ohodnocení přechodu mezi spoji.....	14
1.3.1 Náklady přímé	15
1.3.2 Náklady nepřímé	17
1.4 Úlohy o optimálních turnusech.....	18
1.4.1 Minimalizace počtu použitých vozidel.....	18
1.4.2 Minimalizace provozních nákladů	19
1.4.3 Minimalizace celkových nákladů	19
1.5 Konstrukce turnusů z výsledného párování.....	21
1.6 Maďarská metoda	22
1.6.1 Algoritmus maďarské metody.....	22
1.6.2 Značkovácí metoda.....	23
1.7 Zhodnocení analýzy metod operačního výzkumu	24

ÚVOD

Aby železniční doprava mohla hrát významnou roli v dopravně-přepravním procesu, je nutné dbát na její spolehlivost a vysoký kvalitativní standard. Svým založením je železniční doprava složitým celkem. Při vytváření tohoto celku je nutné zohlednit mnoho technologických procesů. Pro zajištění spolehlivosti a vysokého standardu kvality, musí být tyto technologické procesy přesné a spolehlivé. Výsledek tohoto technologického procesu musí být suboptimálním řešením daného problému, nejlépe však optimálním řešením.

V zájmu každého železničního dopravce je provozovat drážní dopravu ekonomicky přijatelným způsobem tak, aby byla co nejméně ztrátová. Toho může dosáhnout různými způsoby na mnoha místech. Jedním z těchto míst jsou vlastní interní technologické procesy a jejich optimalizace.

Z pohledu železničních kolejových vozidel se pak jedná zejména o jejich provozní využití a údržbu, o kterou se stará jejich domovské depo kolejových vozidel (DKV). Snahou je minimalizovat náklady na údržbu kolejových vozidel a zároveň zajistit jejich maximální možné vytížení. Předpoklad zajištění tohoto stavu dává pravidelná a pečlivá údržba a dále vhodně navržené oběhy železničních vozidel.

Speciální skupinou vozidel jsou především hnací drážní vozidla (HDV). Svým složitějším technickým založením se odlišují od zbytku železničních kolejových vozidel a je proto nutné jim věnovat zvýšenou pozornost a péči. Aby však tato péče mohla být účinná, musí být podpořena vhodně navrženými oběhy. V neposlední řadě je nutné konstruovat tyto oběhy v souladu s platným grafikonem vlakové dopravy (GVD), neboť optimálně navržené oběhy HDV přispívají ke stabilitě jízdního řádu.

Z výše uvedených důvodů je tedy nutné se problematikou tvorby oběhů HDV zabývat. Toto téma bylo zvoleno na základě déle trvajícího autorova zájmu o danou problematiku a také na základě spolupráce s DKV Brno.

Cílem diplomové práce je navrhnout a zhodnotit nové možnosti v metodice zpracování oběhů HDV ve vazbě na předpis ČD V1, zejména jeho části zabývající se grafickou úpravou oběhů. Dále je cílem práce navržení nových metod pro konstrukci oběhů HDV.

1 ANALÝZA METOD OPERAČNÍHO VÝZKUMU PRO SESTAVU OBĚHŮ VOZIDEL

Při zpracování sestavy oběhů vozidel je možno vycházet z různých metod. Jako vhodné se jeví zejména metody operačního výzkumu a teorie dopravy. Tyto metody poskytují vhodný teoretický základ, na nějž lze dále aplikovat konkrétní typ problému z praxe. Je nutné dbát na zvolení správné metody tak, aby byly zajištěny vhodné postupy, které poskytnou předpoklad správných výsledků. Volba metody se musí odvíjet od předem stanovených předpokladů. Tyto předpoklady je nutné si stanovit na začátku samotného bádání. Je vhodné si vytyčit, jaký výsledek je od metody očekáván a zda je reálné tohoto výsledku zvolenou metodou dosáhnout. Dále je důležité uvědomit si, s jakými vstupními veličinami lze počítat a dále si stanovit, jaká účelová funkce bude při výpočtu uvažována. Na základě těchto předpokladů lze zvolit konkrétní typ úlohy (např. úlohu dle časového určení spojů, úlohu dle tvaru účelové funkce). Konkrétní metody budou popsány v dalších částech práce.

V první řadě je však vhodné představit několik pojmů z oblasti teorie dopravy.

1.1 Přehled pojmů

V oblasti operačního výzkumu, potažmo v oblasti teorie dopravy, existuje mnoho odborných termínů. Není účelem představit zde všechny pojmy, ale pouze ty pojmy, které se řešenou problematikou souvisejí a budou se vyskytovat dále v textu.

Jako stěžejní je zde definice samotného turnusu (oběhu) náležitostí. Ten lze popsat jako posloupnost spojů, která určuje pohyb náležitosti. Obecně pak lze zařadit tuto náležitost i do různých kompletů. Dále je typická posloupnost přesunů a souvisejících činností určených v prostoru a čase, které má náležitost postupně zabezpečit.

Lze také specifikovat požadavky na turnus. Prvním požadavkem je periodicitu turnusu, tedy posloupnost spojů a přejezdů mezi spoji, realizovaná jednou náležitostí, která musí tvořit uzavřený sled. Dalším požadavkem je pak časová přípustnost posloupnosti spojů, neboť musí existovat dostatečný časový prostor pro přechod náležitostí mezi koncovým časem spoje a počátečním časem následujícího spoje. (1)

V Tab. 1 jsou uvedeny další pojmy z oblasti operačního výzkumu. Pro lepší přehlednost jsou pojmy uvedeny v abecedním pořadí.

Tab. 1: Pojmy z oblasti operačního výzkumu

Pojem	Definice
Doprava	Cílevědomý proces změny místa.
Dopravní uzel	Místo, ve kterém nastává alespoň jedna z těchto možností: <ul style="list-style-type: none"> ▪ elementy vstupují do systému, ▪ elementy vystupují ze systému, ▪ shromažďují se elementy, ▪ tvoří nebo ruší se komplety nebo je s nimi manipulováno.
Element	Objekt přemístění, v průběhu dopravního procesu se nedělí na menší části (např. železniční vůz).
Komplet	Objekt schopný samostatného pohybu.
Linka	Množina spojů na dané trase.
Náležitosti	Objekty, kterými je třeba doplnit soupravu, aby spolu s nimi vytvořila komplet (např. hnací vozidlo).
Oběh	Posloupnost spojů určující pohyb soupravy.
Relace	Uspořádaná dvojice uzlů, mezi kterými se dopravují neporušené komplety.
Souprava	Dávka vytvořená dle určitých pravidel tak, že po doplnění danými náležitostmi vytvoří komplet (např. vlaková souprava bez čety a hnacího vozidla).
Spoj	Dopravní spojení, které se pravidelně opakuje v určeném čase.
Turnus	Posloupnost spojů, která určuje pohyb některé náležitosti; obecně může být tato náležitost součástí různých kompletů.
Úsek	Spojnice (orientovaná) dvou uzlů, po níž se dopravují komplety (traťový úsek mezi dvěma železničními stanicemi).

Zdroj: (1)

Množina uvedených pojmů není konečná. Je ovšem postačující pro problematiku řešenou v dalších částech práce. Pokud vyvstane potřeba vysvětlit další pojem z řešené oblasti, bude tak učiněno již u konkrétní problematiky.

1.2 Typy úloh pro tvorbu turnusů

Problematiku tvorby turnusů lze řešit za pomoci mnoha úloh. Tyto úlohy lze rozdělit podle různých hledisek do několika skupin. Je možné rozeznat dvě základní skupiny. První skupinou jsou úlohy dle časového určení spojů. Druhou skupinu tvoří úlohy dle tvaru účelové funkce. Uvedené dvě skupiny úloh poskytují návod pro řešení základních problémů při tvorbě turnusů vozidel.

1.2.1 Úlohy dle časového určení spojů

Ve skupině úloh dle časového určení spojů lze definovat tři typy úloh. První z těchto úloh má rozdílné vstupní podmínky v podobě časové polohy spojů. Dále se zde promítají rozdílné charakteristiky jízdních dob.

- **Úloha s neurčitými spoji:** V tomto typu úloh jsou spoje vnímány jako přepravní požadavky, jejichž časová poloha je určena intervalem. Úlohu je možné formulovat jako úlohu matematického programování. Řešení takovéto úlohy je však složité.
- **Úloha s pevně určenou časovou polohou spojů a deterministickými jízdními dobami:** Výhodou této úlohy je fakt, že se jedná o snadno řešitelnou úlohu. Nevýhodou je pak skutečnost, že některé požadavky na výslednou podobu turnusů v ní nelze zohlednit.
- **Úloha s pevně určenou časovou polohou spojů a stochastickými jízdními dobami:** Z pohledu stochastických jízdních dob je zde uvažováno se zpožděním spojů. Je tak nutné zohlednit náklady vznikající při zpoždění spojů. Tato skutečnost negativně ovlivňuje náročnost řešení. K tomu, aby bylo možné dohledat suboptimální řešení úlohy, je nutné použít tzv. heuristické metody. (1)

1.2.2 Úlohy dle tvaru účelové funkce

Podobně jako u úloh dle časového určení spojů, tak i úloh dle tvaru účelové funkce lze definovat tři typy úloh. Jedná se o úlohy minimalizační, lišící se předmětem minimalizace.

- **Úloha o minimalizaci provozních nákladů způsobených přejezdy vozidel mezi spoji:** Je zde stanoven přesný (neměnný) počet vozidel.

- **Úloha o minimalizaci počtu použitých vozidel:** Zde se jedná zejména o minimalizaci investičních nákladů spojených s vozovým parkem.
- **Úloha o minimalizaci celkových nákladů:** Celkovými náklady se rozumí provozní náklady a náklady na použití vozidel (např. odpisy). (1)

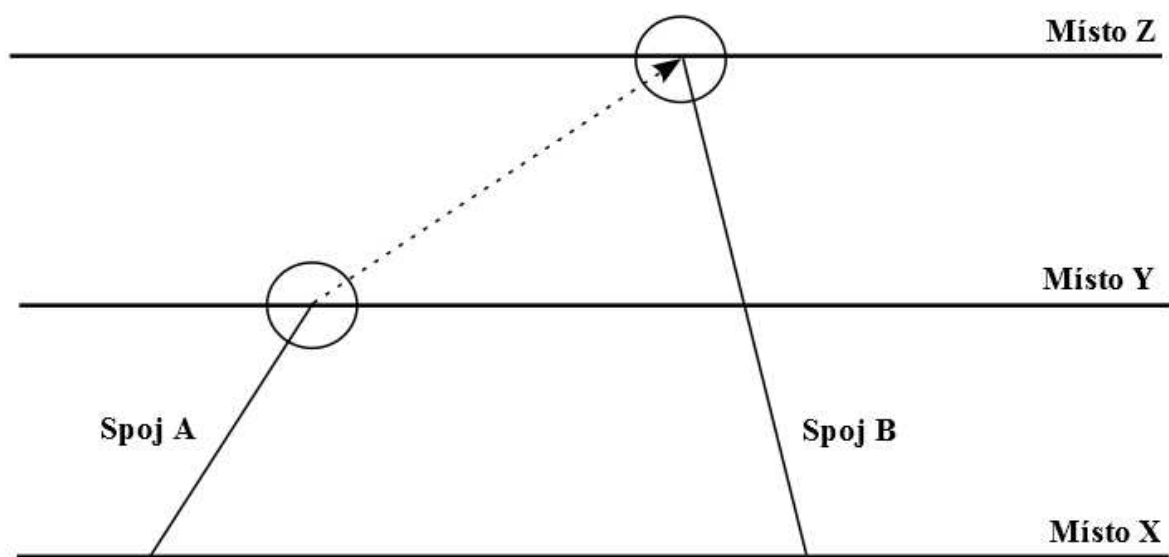
Na základě uvedených typových úloh je možné řešit problém sestavy turnusů vozidel. Jako možné úskalí se zde jeví složitost některých úloh, která je dána výchozími parametry řešeného systému.

Z uvedeného výčtu úloh lze vysledovat, že stěžejní roli při tvorbě turnusů hrají především náklady. Z tohoto důvodu jsou dále rozvedeny v následující podkapitole. Samotné náklady však nejsou jedinou položkou, kterou je vhodné optimalizovat. Vystupují zde také jiné faktory. Jedná se zejména o počet vozidel. Snahou je minimalizace tohoto počtu. Zároveň je žádoucí dosáhnout maximálního možného vytížení všech vozidel. Minimalizace počtu vozidel však nesmí být upřednostňována na úkor provozní rezervy. Ta musí být pokaždé zachována. Další faktor, který může být minimalizací počtu vozidel negativně ovlivněn, jsou přechody vozidel mezi spoji. Obecně lze konstatovat, že čím méně vozidel je pro daný turnus vyčleněno (při zachování objemu výkonů), tím jsou kladeny větší nároky na přesné plnění navrženého oběhu, neboť na přechody s krátkým intervalem mezi spoji není možné nasadit další dodatečné vozidlo. V takových případech je nutné zvážit, zda je přijatelnější zvýšení nákladů o další vozidlo nebo zvýšení nákladů z případného zpoždění následného spoje. V neposlední řadě je nutné navrhovat turnusy vozidel tak, aby byla dodržena platná ustanovení pro údržbu vozidel. Dalším faktorem je tedy zachování kilometrických proběhů mezi periodickými opravami vozidel v daném turnuse.

1.3 Nákladové ohodnocení přechodu mezi spoji

Formulace konkrétní úlohy se neobejde bez nákladového ocenění jednotlivých přechodů náležitostí od spoje k následujícímu spoji. Z tohoto důvodu je vhodné zde zmínit jednotlivé druhy nákladů, se kterými je možné se setkat.

Samotným přechodem mezi spoji se rozumí časový úsek od ukončení obsluhy spoje A do začátku obsluhy spoje B. Podmínkou je, aby se náležitost (vozidlo) přesunula z místa cílové zastávky spoje A do místa výchozí zastávky spoje B nejpozději do doby jeho odjezdu stanoveného jízdním řádem. Tento technologický proces je znázorněn na Obr. 1.



Obr. 1: Grafická interpretace přechodu náležitosti mezi spoji
Zdroj: Autor

Při samotném přechodu vozidla vznikají náklady. Jedná se o náklady na vlastní přesun, tzn. náklady vázané na vzdálenost a čas. Obecně lze tyto náklady definovat tak, že čím větší je vzdálenost a čas pro přechod náležitosti, tím větší jsou náklady.

Dále se zde vyskytují náklady na prostoj, které vznikají, je-li celková doba na přesun vozidla menší, než interval mezi příjezdem vozidla na cílovou zastávku spoje A, a odjezdem vozidla z výchozí zastávky spoje B. Náklady na prostoj představují zejména mzdové ohodnocení personálu obsluhující dané vozidlo.

Jako poslední zde figurují náklady na dodatečnou potřebu vozidla. Tyto náklady vznikají v případě, že se vozidlo nepřemístí z cílové zastávky spoje A ke spoji B nejpozději do doby pravidelného odjezdu spoje B z výchozí zastávky. V takovém případě je nutné do oběhu zařadit další vozidlo navíc.

Celkové náklady na přechod vozidla mezi dvěma spoji je možné rozdělit do dvou skupin, a to na náklady přímé a náklady nepřímé tak, jak jsou uvedeny v (1).

1.3.1 Náklady přímé

Do přímých nákladů zahrnujeme přímé náklady závislé na vzdálenosti a také přímé náklady závislé na čase. Jednotlivé položky tvořící nákladovou funkci jsou pak pro každý druh nákladů rozdílné.

Přímé náklady závislé na vzdálenosti vznikají při fyzickém přechodu náležitosti z cílové zastávky spoje A na výchozí zastávku spoje B. Jedná se např. o spotřebu pohonných hmot, elektrické energie, maziv a provozních kapalin.

Čím větší je vzdálenost pro přechod náležitosti, tím větší jsou tyto náklady. Celkovou výši nákladů závislých na vzdálenosti lze vypočítat dle vztahu (1.1).

$$C_{km}^{ab} = n_{km} \cdot D^{ab} \quad [\text{Kč}] \quad (1.1)$$

kde:

C_{km}^{ab} - přímé náklady závislé na vzdálenosti [Kč];

n_{km} - náklady na ujetí jednoho kilometru [Kč];

D^{ab} - vzdálenost cílové zastávky spoje A od výchozí zastávky spoje B [km];

Přímé náklady závislé na délce trvání přechodu ze spoje A na spoj B jsou závislé na mzdovém ohodnocení personálu obsluhujícího vozidlo. Je ovšem nezbytné zmínit, že v těchto nákladech figuruje pouze vlastní přechod vozidla. Již se zde nezapočítávají mzdové náklady při prostoji vozidla. Celkovou výši nákladů závislých na čase lze vypočítat dle vztahu (1.2).

$$C_{hod}^{ab} = n_{hod} \cdot T^{kv} \quad [\text{Kč}] \quad (1.2)$$

kde:

C_{hod}^{ab} - přímé náklady závislé na čase [Kč];

n_{hod} - náklady na jednotku času [Kč];

T^{ab} - doba přechodu z cílové zastávky spoje A do výchozí zastávky spoje B [min];

Otázka zahrnutí délky trvání prostoje vozidla do přímých nákladů je komplikovaná. Jako problém se jeví fakt, že v momentě ohodnocování jednotlivých přechodů není zatím známa konečná podoba turnusu, tudíž nelze určit, co se s vozidlem bude dít v průběhu celého turnusu. Není tak možné určit, jak bude prostoj vozidla vypadat. Vozidlo může být odstaveno ve vozovně (depu) nebo bude ve vozidle po celou dobu prostoje také personál, který tak bude pobírat mzdu (vozidlo na výchozí zastávce). Z tohoto důvodu je těžké vyjádřit náklady na prostoj, neboť nelze jednoznačně definovat, že nastane jedna z uvedených možností.

1.3.2 Náklady nepřímé

Do skupiny nepřímých nákladů na přechod ze spoje A na spoj B se řadí vše, co souvisí s držním náležitosti v evidenci (odpisy, náklady na údržbu a opravy, pojištění, atd.). Nepřímé náklady se přepočítávají na jednu periodu, zpravidla jeden den. Celkovou výši nepřímých nákladů lze vypočítat dle vztahu (1.3).

$$c_{voz}^{ab} = n_{voz} \cdot P^{ab} \quad [\text{Kč}] \quad (1.3)$$

kde:

c_{voz}^{ab} - nepřímé náklady [Kč];

n_{voz} - nepřímé náklady za použití jednoho vozidla v jedné periodě [Kč];

P^{ab} - koeficient vyjadřující dodatečný počet vozidel potřebný k zajištění přechodu [-];

Ke vztahu (1.3) je vhodné doplnit způsob určení potřebného dodatečného počtu vozidel. Samotné číslo P^{ab} vyjadřuje skutečnost, zda je možné obsloužit spoje A a B v rámci jediné periody ($P^{ab} = 0$), dvou period ($P^{ab} = 1$), tří period ($P^{ab} = 2$), atd. Koeficient P^{ab} lze chápat jako vznik dodatečné potřeby vozidla (vozidlo je přechodem vázáno po dobu P^{ab} period).

Jestliže jsou A, B dva spoje, mezi nimiž má proběhnout přechod, určí se koeficient P^{ab} podle vztahu (1.4).

$$t_a^{odj} + t_a^j + t_a^{kon} + d_{ab} \leq t_b^{odj} + n \cdot 1440 \quad (1.4)$$

kde:

t_a^{odj} - čas odjezdu spoje A (od začátku dne) [min];

t_b^{odj} - čas odjezdu spoje B (od začátku dne) [min];

t_a^j - doba jízdy spoje A [min];

t_a^{kon} - minimální doba strávená spojem A na cílové zastávce [min];

d_{ab} - doba potřebná na přejezd z cílové zastávky spoje A na výchozí zastávku spoje B [min];

Koeficient P^{ab} je roven minimálnímu celému nezápornému číslu n , které splňuje uvedenou nerovnost. (1)

Výše zmíněné přímé a nepřímé náklady vystupují přímo v úlohách o optimálních turnusech, které poskytují návod k minimalizaci těchto nákladů.

1.4 Úlohy o optimálních turnusech

Jednotlivé úlohy se zaměřují na konkrétní optimalizační kritérium. Při řešení těchto úloh se využívá aparát teorie grafů a matematického programování. Úlohy jsou zdařile aplikovatelné do praxe. Problém s aplikací výsledků nastává u úloh řešených pomocí přiřazovacího problému. Jejich výsledky nejsou přímo využitelné. Tyto výsledky je nutné upravit za pomoci dalších metod, což je způsobeno skutečností, že nelze při formulaci této úlohy zohlednit všechny omezující podmínky. Tento problém bude v dalších částech práce podrobněji rozveden. Úlohy jsou popsány na základě (1).

1.4.1 Minimalizace počtu použitých vozidel

Existují dvě disjunktní množiny vrcholů M a N . Jednotlivé množiny představují soubor všech spojů, které se nacházejí na konkrétních místech. Pro množinu M se jedná o soubor spojů, které se nacházejí na konečných zastávkách v okamžiku ukončení své jízdy. Množina N představuje soubor stejných spojů, které se nalézají na výchozí zastávce v okamžiku svého počátku.

Kapacita všech hran sítě je rovna jedné, tzn. $C(h) = 1$. Orientované hrany sítě mezi prvky množiny M a N se zavedou tam, kde je spoj n časově dostupný ze spoje m . V takovém případě je pak koeficient P^{mn} roven nule. Dolní omezení toku je nulové, tzn. $L(h) = 0$.

Optimálním oběhem se rozumí takový oběh, kde bude zajištěn maximální celočíselný tok, což vyplývá z faktu, že každá jednotka toku představuje vozidlo, které je možno ušetřit. S tím souvisí skutečnost, že se budou realizovat pouze ty přechody mezi spoji m a n , které odpovídají hranám s velikostí toků rovnou jedné. (1)

Potřebný počet vozidel lze vypočítat dle vztahu (1.5).

$$X = Y - K(h) \quad [-] \tag{1.5}$$

kde:

X – potřebný počet vozidel [-];

Y – počet spojů [-];

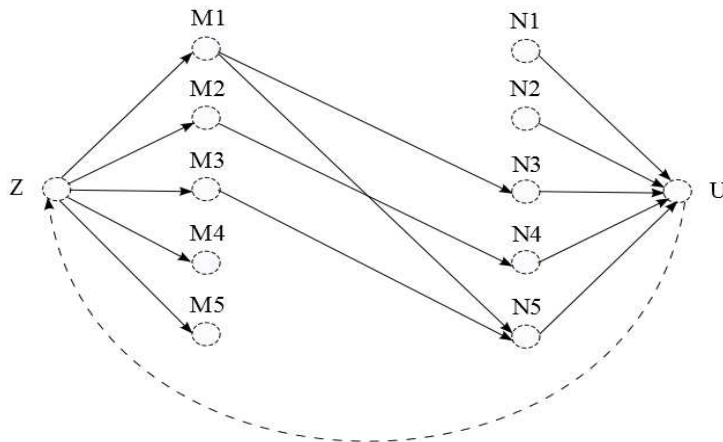
$K(h)$ – velikost toku [-];

1.4.2 Minimalizace provozních nákladů

V těchto úlohách je uvažováno s pevně daným počtem vozidel. Dopravní síť je konstruována podobně jako u úloh v části 1.4.1, tedy tak, že hrany jsou zřízeny tam, kde je spoj n časově dostupný ze spoje m . Je zde navíc zavedena cena toku $P(h)$. Cena toku je navzájem odlišná pro dvě skupiny hran. Hrany vycházející ze zdroje a hrany vstupující do ústí mají cenu toku $P(h)=0$. Naopak hrany mezi m a n mají cenu toku $P(h)=T_{mn}$ (cena toku je rovna nákladům na přechod mezi m a n).

Další odlišností od předchozí skupiny úloh je zavedení fiktivní návratové hrany z ústí do zdroje, jak dokládá Obr. 2. Cena toku na této hraně je $P(h)=0$. Nastavení dolního a horního omezení toku je koncipováno tak, aby bylo nutné použít právě požadovaný počet vozidel. Tato skutečnost vychází z podmínky pevně daného počtu vozidel.

Optimální oběh, tedy ten, který generuje minimální provozní náklady, zde koresponduje s nejlevnější celočíselnou cirkulací. Cirkulace toku v síti je zajištěna doplněním již dříve zmíněné fiktivní návratové hrany do dopravní sítě. (1)



Obr. 2: Minimalizace nákladů s daným počtem vozidel jako úloha o nejlevnější cirkulaci
Zdroj: (1); zpracoval autor

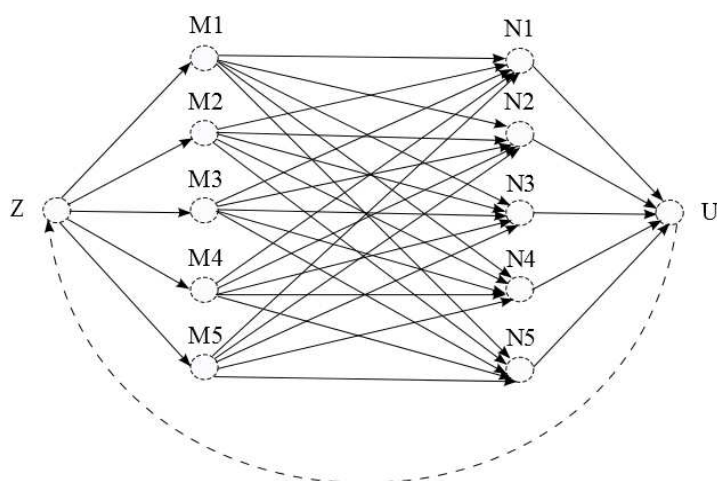
1.4.3 Minimalizace celkových nákladů

Jednotlivé hrany, které vystupují ze zdroje a které vstupují do ústí, jsou v tomto případě zatíženy trojicí ohodnocení, a to $(L(h), C(h), P(h)) = (1, 1, 0)$. Velikost toku na těchto hranách má nulovou toleranci, což znamená, že každou hranou musí procházet právě jedna jednotka toku. Z každého vrcholu M vede hrana do každého vrcholu N a je ohodnocena $(0, 1, T_{mn})$.

Díky této podmínce je zajištěna skutečnost, že každý jednotlivý přechod mezi M a N se buď nemusí uskutečnit vůbec, anebo právě jednou.

Oproti předchozím případům jsou hranou spojeny i ty dvojice spojů, které nejsou časově dostupné v rámci jedné periody, jak dokládá Obr. 3. Je tedy nutné zahrnout do nákladů T_{mn} také nepřímé náklady.

Na základě skutečnosti, že velikost toku na každé hraně ze zdroje do vrcholu M a také z vrcholu N do ústí je rovna právě jedné, je zajištěna taková vlastnost zkoumaného systému, že z každého spoje m bude náležitost přecházet právě na jeden spoj z množiny N a na každý spoj n přejde právě jedna náležitost ze spoje z množiny M. Návratová hrana může být ohodnocena tak, aby neomezovala tok. Nejlevnější celočíselná cirkulace odpovídá oběhům s minimálními náklady. (1)



Obr. 3: Minimalizace celkových nákladů turnusů jako úloha o nejlevnější cirkulaci
Zdroj: (1); zpracoval autor

Uvedenou úlohu lze také řešit tzv. přiřazovacím problémem. Jedná se o nalezení nejlevnějšího perfektního párování v úplném bipartitním grafu. Tento problém je tak možné formulovat matematickým programováním. Na řešení přiřazovacího problému lze aplikovat tzv. maďarskou metodu určenou na hledání nejlevnějšího perfektního párování v úplném bipartitním grafu. (1)

1.5 Konstrukce turnusů z výsledného párování

Výsledné párování získané jako výsledek přiřazovacího problému je perfektní, což znamená, že pro každý spoj je možné určit, který spoj mu v turnuse bude předcházet a který bude následovat. Každý turnus je tak uzavřenou posloupností.

Ve výsledném párování je možné určit konkrétní uzavřené posloupnosti následujícím způsobem. Libovolný spoj A , nepatřící dosud do žádného jiného turnusu, je možné prohlásit za počátek turnusu a vyhledat posloupnost spojů, které následují. Na začátek turnusu je vhodné konstruovat takový spoj n , na který vznikají při přechodu ze spoje m nepřímé náklady. V takovém případě se jedná o první spoj v daném dni. K ukončení turnusu dochází ve chvíli, kdy je opět započata realizace spoje A .

Nevýhodou metodiky přiřazovacího problému je skutečnost, že výsledky nejsou přímo využitelné. Tato skutečnost je důsledkem toho, že není možné zohlednit všechny typy omezení při formulaci snadno řešitelné úlohy.

Požadavky, které lze zohlednit:

- minimalizace vzdálenosti ujeté při přejezdech mezi spoji a minimalizace času stráveného při přejezdech,
- minimalizace počtu vozidel,
- minimalizace doby čekání vozidel mezi dvěma spoji (minimalizace prostojů).

Požadavky, které nelze zohlednit:

- kalkulace zákonných přestávek obsluhy náležitosti (vozidla),
- požadavek návratu vozidla do depa, ze kterého vyjelo (při existenci více dep),
- eliminace dlouhého prostoje mimo vozovnu uprostřed turnusu.

Druhou skupinu požadavků nelze zohlednit, protože lze ocenit přechody pouze pro jednotlivé dvojice spojů. Požadavky na celý turnus není možné do účelové funkce nijak zahrnout. Takové turnusy je nutné dále zpracovat.

Pro úpravu turnusů (výsledného řešení) je možné použít tzv. křížovacích heuristik. Výsledné turnusy se vhodným způsobem dodatečně zatíží náklady, které budou vyjadřovat míru neplnění dodatečných podmínek. (1)

Po jednotlivých dvojicích turnusů se provede tzv. překřížení. Každý turnus je vhodně rozdělen na dva samostatné turnusy. Poté je provedeno spojení s jiným turnusem. Pokud je překřížením dosaženo úspory nákladů, je vhodné jej realizovat.

1.6 Maďarská metoda

Tato metoda vychází z teorie grafů a je určena k řešení přiřazovacího problému. Popis metody je zpracován na základě (2).

Úloha je reprezentována bipartitním grafem. Následně dochází k hledání nejlevnějšího perfektního plánování. Bipartitní graf G je úplný, se stranami M a N o stejném počtu vrcholů. Jednotlivé hrany grafu lze chápat jako uspořádané dvojice (m, n) , které jsou ohodnoceny cenami. Ceny je možné uspořádat do ucelené cenové matice C , jejíž prvky $c(m, n)$ odpovídají ceně konkrétní hrany (m, n) .

Grafem rovnosti G_r se nazývá faktor grafu G , který obsahuje ty hrany grafu G , jejichž transformovaná cena je nulová. Transformace cen $c(m, n)$ je realizována na základě libovolného ohodnocení vrcholů $p(m)$, $p(n)$ dle předpisu $c^T = c(m, n) - p(m) - p(n)$. Pokud graf rovnosti G_r obsahuje perfektní párování P , pak je toto párování optimálním řešením přiřazovací úlohy.

1.6.1 Algoritmus maďarské metody

Samotný algoritmus řešení maďarské metody se skládá ze tří fází: počáteční přípustné ohodnocení vrcholů, sestrojení grafu rovnosti a maximální párování. Při řešení maximálního párování je využito značkovací metody.

1. Počáteční přípustné ohodnocení vrcholů

Pro každé $m \in M$ se položí $p(m) = \min c(m, n)$. Pro každé $n \in N$ se dále položí $p(n) = \min(c(m, n) - p(m))$.

2. Sestrojení grafu rovnosti

Po počátečním přípustném ohodnocení vrcholů dochází k sestrojení faktoru G_r grafu G tak, že $H(G_r) = \{(m, n) \in H(G) \mid c(m, n) - p(m) - p(n) = 0\}$. Množina hran grafu rovnosti obsahuje pouze ty hrany grafu G , jejichž cenové ohodnocení je nulové.

3. Maximální párování

V grafu G_r se sestrojí maximální párování P . Je-li toto párování perfektní, algoritmus končí, neboť výsledné perfektní párování představuje nejlevnější variantu.

Pokud výsledné párování P není perfektní, nalezneme množinu $A \subseteq M$ taková, že $|A| > |N_{G_r}(A)|$, vypočteme hodnotu $d = \min\{c(m,n) - p(m) - p(n) \mid m \in A, n \notin V_{G_r}(A)\}$ a změním se přípustné ohodnocení vrcholů: $p(m) = p(m) + d$ pro všechna $m \in A$; $p(n) = p(n) - d$ pro všechna $n \in V_{G_r}(A)$. Dále následuje krok 2.

Značení $V_{G_r}(A)$ je použito pro množinu vrcholů grafu G_r spojených s vrcholem A . Maximální párování lze určit pomocí značkovací metody, při které lze nalézt množinu A .

1.6.2 Značkovací metoda

Popis algoritmu značkovací metody v další části práce je zpracován na základě publikace Grafy a jejich aplikace. (2) Vlastní značkovací metodě předchází konstrukce libovolného přípustného výchozího párování P . Při inicializaci značkovací metody je nutné nalézt střídavou cestu. Střídavá cesta vzhledem k párování P je taková cesta, jejíž hrany střídavě leží a neleží v P . Podél střídavé cesty s volnými krajními vrcholy je možné párování zvětšit tak, že hrany střídavé cesty, které dosud nebyly obsaženy v P , se do P zařadí a hrany, které dosud byly obsaženy v P , se z P vyřadí. Tímto způsobem je dosaženo zvýšení počtu hran v P o jednu. Samotný algoritmus značkovací metody je možné rozdělit na čtyři fáze: inicializace, test nalezení cesty, pokus o značkování vpřed a pokus o značkování vzad.

1. Inicializace

Označují se všechny volné vrcholy z množiny M . Ostatní vrcholy jsou bez značek.

2. Test nalezení cesty

Je-li označován některý volný vrchol z množiny N , značkovací procedura končí. Je nalezena střídavá cesta s volnými krajními vrcholy a podél ní lze zvětšit počet hran v párování.

3. Pokus o značkování vpřed

Existuje-li hrana $h \notin P$ vedoucí z označovaného vrcholu $m \in M$ do neoznačovaného vrcholu $n \in N$, pak se označuje vrchol n a pokračuje se podle kroku 2. Neexistuje-li taková hrana, pokračuje se podle kroku 4.

4. Pokus o značkování vzad

Existuje-li hrana $h \in P$ z neoznačkováného vrcholu $m \in M$ do neoznačkováného vrcholu $n \in N$, pak se označuje vrchol m a pokračuje se dle kroku 3. Neexistuje-li taková hrana, značkovací metoda končí, stávající párování je maximální. (2)

Uvedený algoritmus značkovací metody je součástí algoritmu maďarské metody. Jsou-li tyto algoritmy správně použity pro samotný výpočet, existuje předpoklad dosažení perfektního párování, což představuje v samotném procesu nejlevnější variantu skladby turnusu.

1.7 Zhodnocení analýzy metod operačního výzkumu

Na základě provedené analýzy metod operačního výzkumu pro sestavu oběhů vozidel se jako nejlepší podklad pro řešení daného problému jeví maďarská metoda. Hlavní výhodou maďarské metody je zejména skutečnost, že nepodléhá tzv. degeneraci řešení. Jako degenerované řešení rozumíme takové řešení přiřazovacího problému, které má jen n kladných složek, namísto $2n - 1$. Degenerované řešení je výstupem např. distribuční metody nebo Dantzigovy metody. Proto se tyto metody jeví jako méně vhodné pro řešení přiřazovacího problému a nejsou tak v této práci podrobněji rozvedeny.

Maďarská metoda se jeví jako vhodná také z interpretačního hlediska. Na základě maticového výpočtu je možné výsledné perfektní párování přehledně graficky interpretovat.