

Řízení dopravních procesů v logistických systémech

Petr Cenek

Cílem logistických systémů je zabezpečit dostupnost produktů v požadovaném čase a na požadovaném místě. Významnou část činností v logistických systémech představují dopravní procesy, které můžeme sledovat a řídit na všeobecné (makroskopické) anebo podrobné (mikroskopické) úrovni. Tvorbě obou typů modelů, jejich spolupráci a problémům řízení procesů na obou úrovních se věnuje tento článek.

Úvod

Řízení dopravních procesů, diskutované v tomto článku, navazuje volně na problematiku z předchozích ročníků, kdy v článku [2] byl popisován základní model dopravního systému a článek [3] v roce 2003 byl věnován modelům a optimalizaci procesů na dopravních sítích. Dopravní systém jsme rozdělili na dopravní síť (infrastrukturu), dopravní proudy (pohyb dopravních prostředků) a řídicí podsystém. Dále jsme rozdělili modely dopravních systémů na modely makroskopické a mikroskopické.

Mikroskopické modely popisují dopravní systém podrobněji a zabývají se pohybem (dynamikou) jednotlivých vozidel, zatímco v makroskopických modelech řešíme spíše úlohy optimálního plánování cest vozidel a budování dopravní sítě. Dopravní proudy reprezentujeme v makroskopických modelech zjednodušeně jen jako přepravovaná množství a nezajímáme se o dynamiku pohybu jednotlivých vozidel. Optimalizační úlohy na makroskopických modelech často představují kombinatorické problémy, při kterých hledáme nejlepší variantu z množiny přípustných řešení. Mezi typické optimalizační úlohy patří hledání nejkratších cest v síti (mezi uzly sítě anebo pro okružní jízdy při svozu a rozvozu zásilek), časové rozvrhy jízdy, umísťování středisek v síti (lokační úloha) pro obsluhu požadavků v uzlech a na úsecích sítě a úloha návrhu sítě (výběr úseků, které umožní přepravu zásilek na síti za minimální cenu). Přehled těchto úloh a odpovídajících modelů byl ukázán v [3].

Dále se budeme věnovat jen modelům mikroskopickým, optimalizačním úlohám na mikroskopické úrovni a spolupráci makroskopických a mikroskopických modelů. I když bychom pro reálné řešení úlohy potřebovali model, správné vstupní údaje a vhodné optimalizační metody, omezíme se v článku na slovní popis a základní matematickou formulaci úloh.

1. Mikroskopické modely dopravních procesů

Mikroskopické modely dopravních procesů popisují jednotlivá vozidla, kinematiku a dynamiku jejich pohybu. Na rozdíl od makroskopických modelů, ve kterých jsme mohli zanedbat typ použitých dopravních prostředků, musíme v mikroskopických modelech charakteristiky dopravních prostředků respektovat. Na problémech kinematiky a dynamiky pohybu dopravního prostředku můžeme ukázat významné rozdíly mezi silničními a kolejovými vozidly, které jsou nejpoužívanějšími druhy dopravních prostředků.

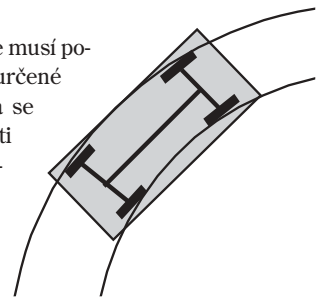
1.1 Kinematika pohybu vozidel

Důležitý rozdíl mezi kolejovými a silničními vozidly ukážeme nejprve na kinematice jejich pohybu. Budeme přitom sledovat rozdíl mezi trajektoriemi předních a zadních náprav u obou typů vozidel. Pozornost soustředíme především na silniční vozidla, u nichž je výpočet trajektorií obtížnější.

U kolejových vozidel je trajektorie pohybu všech kol jednoznačně určena geometrickým tvarem kolejí. Není proto žádný problém

určit polohu předních a zadních kol kolejového vozidla na základě popisu infrastruktury (kolejí), po kterých se vozidlo pohybuje. Poloha vozidla je určena dvěma body, které odpovídají poloze přední a zadní nápravy vozidla.

Znamená to, že kolejová vozidla se musí pohybovat po takto jednoznačně určené dráze a řízení kolejového vozidla se omezuje jen na určování rychlosti v podélném směru (ve směru pohybu vozidla). Geometrie a konstrukce trati také určuje maximální dovolenou rychlost jízdy v každém úseku trati. Kinematika pohybu kolejového vozidla je ilustrováno na obr. 1.

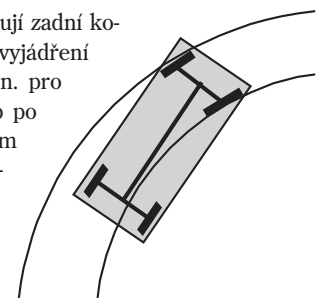


Obr.1 Kolejové vozidlo – dráha všech kol je určena kolejemi

Silniční vozidla se chovají odlišně.

Pouze přední náprava bude sledovat předepsanou dráhu, určenou nastavením předních kol (polohou volantu). Trajektorie zadních kol je jednoznačně určena dráhou kol předních. Pohyb předních a zadních kol u silničního vozidla je ukázán na obr. 2.

Vlečná křivka, po které se pohybují zadní kola, má netriviální matematické vyjádření a alespoň pro základní úlohy, tzn. pro pohyb v přímém směru a pohyb po kruhovém oblouku v ustáleném i v přechodovém stavu, jsou příslušné vztahy odvozeny v práci [3]. Složitější trajektorie pohybu mohou být s dostatečnou přesností aproximovány posloupností elementárních úseků složenou z přímých a kruhových úseků. Ustálený stav určuje křivku pohybu zadních kol po ujetí velké vzdálenosti při konstantním zakřivení dráhy předních kol. Přechodový stav popisuje křivku pohybu zadních kol po změně zakřivení dráhy předních kol. Řešení v ustáleném stavu je poměrně jednoduché. Pro pohyb v přímém směru se zadní kola pohybují po stejné přímce jako přední kola. Pro pohyb po kruhovém oblouku se budou zadní kola pohybovat po soustředné kružnici s menším poloměrem



Obr.2 Silniční vozidlo – sleduje předními koly zadanou dráhu, zadní kola jsou „vlečena“ ve směru podélné osy vozidla

$$R_Z = \sqrt{R_P^2 - L^2} \quad (1)$$

kde R_P je poloměr zakřivení dráhy předních kol [m],
 R_Z – poloměr zakřivení dráhy zadních kol [m],
 L – rozvor (vzdálenost přední a zadní nápravy) [m].

Trajektorie v přechodovém stavu se asymptoticky blíží křivce pro ustálený stav, výpočetní vztahy pro určení trajektorie zadních kol v přechodovém stavu jsou však poměrně složité a jsou uvedeny v [3].

1.2 Dynamika pohybu vozidel

Rozdíly mezi silničními a kolejovými vozidly musíme respektovat i při výpočtu dynamiky pohybu vozidla. Základní model dynamiky pohybu vozidla vychází z Newtonova pohybového zákona:

$$ma = \sum_i F_i \quad (2)$$

kde m je hmotnost vozidla [kg],
 a – zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],
 F_i – síly působící na vozidlo [N].

Když za zrychlení dosadíme výraz pro druhou derivaci dráhy podle času dostáváme:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{m} \sum_i F_i \quad (3)$$

Pozn.: Rovnici bychom měli psát ve vektorovém tvaru, protože síly a zrychlení obecně představují trojrozměrné vektory v prostoru. Pro jednoduchost budeme předpokládat kolejové vozidlo s jediným stupněm volnosti a vektory sil a zrychlení nahradíme skalárními hodnotami.

Řešením rovnice (3) získáme průběh rychlosti a ujeté dráhy v závislosti na čase. Můžeme tedy zjišťovat jízdní doby případně spotřebu energie potřebné pro ujetí daného úseku cesty. Optimalizací dynamiky pohybu vozidla můžeme zjistit minimální potřebnou jízdní dobu (jízdu za minimální čas) a z ní přidáním určité časové rezervy určit potřebnou jízdní dobu. Pokud máme jízdní dobu již stanovenou a tato doba je delší než minimální jízdní doba, můžeme hledat optimální režim z hlediska spotřebu energie (energeticky optimální jízdu). Optimální režimy jízdy můžeme pro zjednodušené modely odvodit pomocí Pontrjaginova principu maxima anebo je můžeme vyhledávat pomocí simulačních experimentů a numerických metod.

Při hledání vhodného režimu jízdy musíme respektovat omezení rychlosti. V kolejové dopravě je dráha vozidla určena jednoznačně geometrií kolejí a maximální povolená rychlost může být určena podle konstrukce trati a vlastností vozidel (lokomotivy a železničních vozů). Silniční vozidla se mohou pohybovat víceméně volně po celé šířce komunikace resp. šířce jízdního pruhu, což znamená, že mohou měnit nejen svou rychlost v podélném směru, ale mohou také alespoň do určité míry řídit trajektorii svého pohybu. Zakřivení zvolené trajektorie omezuje maximální rychlost vozidla, protože vznikající odstředivé zrychlení nesmí přesáhnout dovolenou hodnotu, danou součinitelem tření mezi koly a vozovkou

$$\frac{v_{\max}^2}{R} \leq a_F \quad (4)$$

kde v_{\max} je maximální povolená rychlost vozidla v zatáčce [m/s],
 R – poloměr zakřivení zatáčky [m],
 a_F – maximální povolené odstředivé zrychlení, omezené součinitelem tření mezi koly a vozovkou [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$].

V opačném případě by došlo ke smyku anebo převrácení vozidla.

V mikroskopickém modelu vozidla můžeme podle potřeby používat anebo zanedbávat některé síly, které ve výpočtu mají významný anebo zanedbatelný vliv. Například při jízdě vlaku bude zvýšení odporu na výhybce zanedbatelné, zatímco při spouštění železničního vozu ze svážného pahorku je třeba odpor na výhybkách ve výpočtech respektovat. Pro jeden dopravní prostředek (např. železniční vůz) tedy můžeme na mikroskopické úrovni použít různé modely v závislosti na požadované přesnosti popisu.

1.3 Řešení konfliktních situací

V dopravním systému resp. na jednom úseku dopravní sítě se zpravidla pohybuje množství různých vozidel, které navzájem „soupeří“ o místo na komunikaci. Všechna vozidla jsou zatím řízena lidskou obsluhou a inteligence této obsluhy spolu se znalostí do-

pravních předpisů a další potřebnou kvalifikací řidiče dovolí bezkonfliktní řešení dopravních situací jako jsou následná jízda vozidel, průjezdy křižovatkou, předjíždění a míjení vozidel apod. V simulačních modelech a při předpokládaném budoucím automatickém řízení vozidel je třeba konfliktní situace namodelovat a vyvinout algoritmy pro automatické řešení dopravních situací v souladu s dopravními předpisy tak, aby byla zajištěna bezpečnost provozu na dopravní komunikaci.

Zatím je tato problematika zajímavá především v simulačních modelech, kde nepřítomnost lidské inteligence se obtížně nahrazuje naprogramováním rozhodovacích algoritmů pro řešení konfliktních situací. I když nezvládnutí konfliktu nemá v simulačním modelu fatální následky, znamená přinejmenším přerušení simulačního experimentu, potřebu opravy zadání úlohy a nové spuštění výpočtu. Mnohem náročnější bude návrh algoritmů pro řízení vozidel v praxi, kdy bezpečnost a spolehlivost provozu musí být prvořadým požadavkem. Vyvinuté řídicí systémy proto využívají nejmodernější technologie pro získávání informací o stavu komunikace a provozu na ní. Patří sem např. snímače pro zjišťování polohy na komunikaci, snímače pro detekci překážek, systémy GPS pro zjišťování polohy, radiokomunikační prostředky pro zajištění automatické komunikace mezi vozidly apod. Dosavadní výsledky ukazují schůdnost takových řešení i když jejich zavedení do praxe je zatím neúnosně nákladné a nabízená bezpečnost a plynulost provozu ještě nedosahuje požadovanou úroveň.

Z teoretického hlediska je řízení konfliktních situací v dopravě asi nejnáročnější úlohou. Je třeba sledovat neustále se měnící stav provozu, obsazení dopravních cest a rozhodovat o rezervaci a přidělování omezených prostředků dopravního systému v souladu s pravidly provozu.

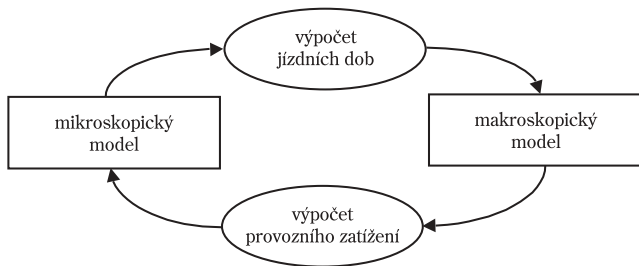
2. Spolupráce mikroskopických a makroskopických modelů

Modely na mikroskopické i makroskopické úrovni mohou popisovat stejný reálný dopravní systém, přesto se tyto modely navzájem liší. Například v železniční dopravě představuje infrastruktura v obou typech modelů stejné koleje a pohyblivé prvky reprezentují stejná hnací vozidla (lokomotivy) a stejné železniční vozy. Otázkou tedy je, čím se modely liší, co mají společné a v čem mohou anebo mají spolupracovat.

Získání vstupních dat o dopravní infrastruktuře je nákladný proces a podobně je tomu i při zjišťování údajů o hnacích vozidlech a vozovém parku. Je proto přirozené, že bude snaha získávat tyto údaje pouze jedenkrát a potom je používat ve všech typech modelů. Oba typy modelů se potom budou lišit stupněm podrobnosti popisu jednotlivých částí dopravního systému, kdy v makroskopických modelech mohou být zanedbány například údaje o směrovém vedení trati případně i o sklonových poměrech a v modelech vozidel mohou být zanedbány rozměrové údaje o vozidlech a případně i jejich dynamické vlastnosti.

V mikroskopickém modelu už bude naopak třeba respektovat nejen podrobnější popis infrastruktury a vozidel, ale bude třeba použít i podrobnější popis provozu. Například v makroskopickém modelu železničního provozu se budou vlaky pohybovat volně mezi uzly dopravní sítě zadanou průměrnou rychlostí, v mikroskopickém modelu však bude třeba respektovat rozjezdy a brždění vlaku případně další manipulační činnosti ve stanicích (přepřahání lokomotiv, řazení vlaků, posuny). Podobně v silniční dopravě můžeme v hrubém modelu použít odhadnutou průměrnou rychlost, zatímco v podrobnějším mikroskopickém modelu je třeba respektovat průjezdy křižovatkami a jízdu v kolonách, které vyvolávají potřebu brždění a akcelerace vozidel.

Vykonání uvedených činností v mikroskopickém modelu bude silně závislé na hustotě provozu v daném místě dopravního systému, výsledky řešení mohou sloužit např. pro stanovení potřebné doby



Obr.3 Spolupráce mikroskopického a makroskopického modelu

pobytu vlaku ve stanici nebo pro odhad doby potřebné pro průjezd městem, které budou použity v makroskopickém modelu případně budou respektovány i v jízdním řádu.

Protože doba vykonání uvedených operací může záviset od stavu (hustoty) provozu v místě dopravního systému, potřebujeme zadat modelu údaje o provozu ve zkoumaném místě dopravního systému a v jeho okolí (např. příjezdy a odjezdy vlaků, hustota provozu na křižovatce apod.) Tyto údaje závisí na stavu okolních částí sítě, které jsou známy z makroskopického modelu celé sítě anebo potřebné části sítě.

Z uvedených úvah vyplývá, že výsledky řešení z mikroskopického modelu mohou sloužit jako vstupní parametry pro ohodnocení dílčích činností v makroskopickém modelu a naopak výsledky z makroskopického modelu budou definovat vstupní hodnoty pro stanovení provozní situace a zatížení prvků (uzlu anebo úseku) dopravní sítě při simulaci provozu v tomto místě. Spolupráce obou modelů je ukázána na obr. 3.

Závěr

Z uvedených úvah vyplývá, že jak mikroskopický tak i makroskopický model mají své oprávnění při optimalizaci dopravních a logistických systémů. Protože pro jeden dopravní systém potřebujeme vytvářet vhodné mikroskopické a makroskopické modely, je třeba vstupní údaje o dopravní síti a vozidlech ukládat do jednotné databáze, ze které potom vybereme relevantní informace a vytvoříme z nich požadovaný model. Musíme tedy odlišit vstupní údaje od vlastních modelů, pomocí kterých budeme navrhovat řízení dopravního systému. Na jedné straně se tedy snažíme o sjednocení

postupu a vytvoření univerzálního modelu dopravního systému, na druhé straně si musíme uvědomit různorodost úloh řízení a plánování v dopravě a při volbě modelu a metody řešení vycházet z potřeb a charakteristiky konkrétní úlohy.

Pokud bychom používali jen modely jednoho typu mohli bychom se dopouštět vážných chyb při odhadech hodnot parametrů. Z vlastních zkušeností můžeme potvrdit, že zadávané hodnoty často nejsou exaktně odměřeny anebo zjištěny statistickými rozbory, ale jsou odhadnuty podle zkušeností a podle podmínek současného provozu. Jejich použití v optimalizačních výpočtech při změně provozních podmínek už nemusí odpovídat skutečnosti a může vést k chybným závěrům.

Literatura

- [1] ALEXÍK, M.: Simulation in the dynamic of transport vehicles and processes. Studies of the Faculty of Management Science, Zv. 4, pp.1 – 10, Žilina 1995
- [2] CENEK, P.: Modelování a řízení dopravních systémů. AT&P Journal, No. 6, 2002, str. 88 – 89
- [3] CENEK, P.: Modelování procesů na dopravních sítích. AT&P Journal, No. 9, 2003, str. 98 – 101
- [4] CENEK, P., KLIMA, V., JANÁČEK, J.: Optimalizace dopravních a spojových procesů. EDIS VŠDS, Žilina 1994
- [5] JANÁČEK, J.: Matematické programování. EDIS – ŽU, Žilinská univerzita, Žilina 1999
- [6] JANÁČEK, J.: Optimalizace na dopravních sítích. EDIS-ŽU, Žilinská univerzita, Žilina 2002
- [7] JÁNOŠÍKOVÁ, L.: An adaptation of the tabu search metaheuristic to the problem of transportation planning, In: Preprints of the „IFAC/IFIP/IFORS Symposium – Transportation systems“, Tech. University of Crete, Chania, Greece, 1997, pp. 765 – 768.

prof. Ing. Petr Cenek, CSc.

**ŽU Žilina
Fakulta riadenia a informatiky
Katedra dopravných sietí
Veľký diel, 010 26 Žilina
e-mail: petr@frdsa.utc.sk**

7