

KOORDINACE LINEK MHD S VYUŽITÍM PETRIHO SÍTÍ

TUREK, Richard, (CZ)

Abstrakt. Příspěvek se zabývá modelováním pohybu vozidel v síti linek MHD pomocí Petriho sítí. V úvodu je uveden význam problému tvorby sítě linek MHD a motivace využití nástroje Petriho sítí. Následuje teoretická analýza včetně základní koncepce a rozdělení Petriho sítí. Pomocí P/T Petriho sítí je nastíněno řešení konkrétního příkladu.

1 Úvod

Městská hromadná doprava zaujímá v dopravní soustavě každého státu nezastupitelnou funkci z hlediska každodenní mobility obyvatelstva. Při jejím plánování je žádoucí zabývat se kromě tvorby tras linek také modelováním pohybu vozidel v navržené síti, což může souviset s hledáním optimální varianty provozu.

V rámci procesu optimalizace MHD v tuzemsku i zahraničí existují matematické modely na tvorbu systémů linek MHD, které využívají pokročilé metody operačního výzkumu. K rozhodnutí, které linky vybrat tak, aby byla pokryta poptávka cestujících a určit jaký počet vozidel je třeba přiřadit linkám, je využívána např. metoda PRIVOL (Přiřazení Vozidel Linkám), která patří mezi úlohy lineárního programování [1], [2].

K dalším nástrojům, které jsou předmětem zájmu široké vědecké komunity, patří také Petriho sítě. Petriho sítě se dostaly do popředí zájmu v souvislosti s aplikacemi pro modelování a teoretické zkoumání distribučních a paralelních systémů, jako jsou komunikační protokoly, počítačové sítě či databázové systémy. V rámci modelování v oblasti dopravy se hovoří především o barevných Petriho sítích.

2 Motivace

Petriho sítě představují významný formalismus pro modelování diskrétních systémů, který spojuje výhody srozumitelného grafického zápisu a možnosti simulace s dobrou formální

analyzovatelností. Srozumitelnost a analyzovatelnost Petriho sítí je dána jejich jednoduchostí. Model je popsán místy (places), která obsahují stavovou informaci ve formě značek (tokens), přechody (transmissions), které vyjadřují možné změny stavu a hranami (arcs), propojujícími místa a přechody navzájem. Existuje celá řada typů Petriho sítí a jejich speciálních podtříd, až po vysokoúrovňové (High-Level Petri nets) a barevné sítě [5].

Existence různých variant Petriho sítí souvisí se snahou zvyšovat modelovací schopnosti a úroveň popisu modelu (přiblížit příslušný formalismus modelovaným skutečností) a přitom zachovat konceptuální jednoduchost, která je pro Petriho sítě příznačná. Obecně platí, že vyšší typy Petriho sítí jsou poněkud hůře analyzovatelné, poskytují však vyšší komfort při modelování.

Uplatnění Petriho sítí je značně široké, v oblasti dopravy však používání Petriho sítě doposud jako modelovacího, resp. optimalizačního nástroje příliš nerozšířilo. Smyslem je tedy zkoumat, zda Petriho sítě nemohou určitým způsobem přispět k řešení některých optimalizačních problémů v dopravě, případně odstranit některé nevýhody v současnosti používaných řešících nástrojů. V předloženém článku bude pomocí Petriho sítě prezentován pohyb vozidel v linkové síti MHD (obecně však jakékoliv síti linek).

3 Petriho sítě

Jak je uvedeno např. v [3], využívají Petriho sítě ke své výstavbě následující koncept.

Parciální stavy systému jsou modelovány místy a možné jevy, které jsou aktivátorem změny, jsou definovány přechody. Okamžitý stav systému je definován umístěním značek (tokens) v místech, což se v grafu Petriho sítě vyjadřuje tečkami v místech. Přítomnost tokenů v místě modeluje skutečnost, že daný stav je momentálně aktuální. Každý přechod má definována vstupní a výstupní místa, což je v grafu Petriho sítě vyjádřeno orientovanými hranami mezi místy a přechody. Tím je dáno, které aspekty stavu systému podmiňují výskyt odpovídající události (provedení přechodu), a které aspekty stavu jsou výskytem této události ovlivněny.

Pro každý přechod jsou definovány vstupní a výstupní podmínky. Přechod může být proveden pouze v případě, že všechna jeho vstupní místa obsahují značky, tj. má splněny všechny vstupní podmínky. Provedením přechodu se odstraní značky ze vstupních míst (vstupní podmínky přestanou platit) a umístí se nové značky do výstupních míst (uplatní se výstupní podmínky). Provedení přechodu je atomická operace, která odpovídá výskytu události.

K modelování provozu bude v předloženém článku využito P/T Petriho sítí, které patří k základním Petriho sítím. P/T Petriho síť je tvořena následujícími objekty:

- místa (places), graficky reprezentovanými kružnicemi,
- přechody (transitions), graficky reprezentovanými obdélníky, orientovanými hranami (arcs), graficky reprezentovanými šipkami směřujícími od míst k přechodům nebo od přechodů k místům,

- udáním kapacity (capacity indications) pro každé místo sítě, tj. přirozeného čísla udávajícího maximální počet tokenů, který se může v místě nacházet,
- udáním váhy (weights) pro každou hranu sítě, tj. přirozeného čísla udávajícího násobnost hrany,
- udáním počátečního značení (initial marking), udávajícího počet tokenů pro každé místo sítě.

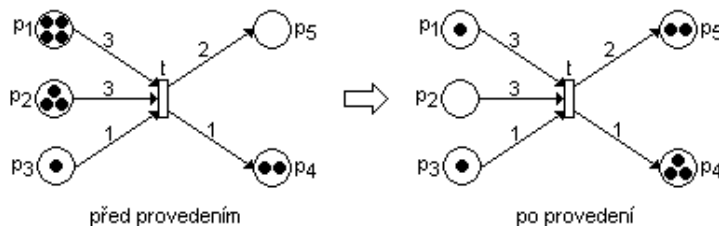
Změny stavů (značení) P/T Petriho sítě jsou charakterizovány následujícími pravidly:

- stav sítě je určen značením, tj. počtem tokenů v každém místě,
- místo p patří do vstupní množiny (pre-set) přechodu t , jestliže z místa p vede hrana do přechodu t a místo p patří do výstupní množiny (post-set) přechodu t , jestliže z přechodu t vede hrana do místa p ,
- přechod t je proveditelný (enabled, activated), jestliže:
 - pro každé místo p vstupní množiny přechodu t platí, že obsahuje alespoň tolik tokenů, kolik činí násobnost hrany vedoucí z místa p do přechodu t ,
 - pro každé místo p výstupní množiny přechodu t platí, že počet tokenů obsažených v místě p zvětšený o násobnost hrany, mířící z přechodu t do místa p , nepřevyšuje kapacitu místa p ,
- při provedení (firing) proveditelného přechodu t se změní stav (značení, marking) sítě takto:
 - počet tokenů v každém vstupním místě p přechodu t se zmenší o násobnost hrany spojující toto místo s tímto přechodem
 - počet tokenů v každém výstupním místě p přechodu t se zvětší o násobnost hrany spojující toto místo s tímto přechodem

Vstupní a výstupní podmínky přechodů specifikují počty odebíraných/umístěvaných značek. V grafu Petriho sítě se to vyjádří ohodnocením orientovaných hran do/z přechodu. Příklad změny stavu je znázorněn na obr. 1. V P/T Petriho sítích podle obvyklých zásad místa označují stavy modelovaného systému a přechody změny stavu. Stav je charakterizován celým nezáporným číslem daným značením daného místa (počtem tokenů v daném místě). Při modelování počítačových dějů, jedná se např. o počty jednotek volné nebo obsazené paměti (např. bufferu), o počty jednotek disponibilních nebo využívaných zdrojů různého typu apod..

Implicitně předpokládáme násobnost hrany 1 a kapacitu místa nekonečnou. Násobnost jednoduchých hran ($w = 1$) a kapacitu kapacitně neomezených míst ($k = \infty$) na grafech Petriho sítí není nutné uvádět, především kvůli větší přehlednosti.

Speciálním případem P/T Petriho sítí jsou C/E Petriho sítě, což jsou P/T Petriho sítě ve kterých je kapacita každého místa a násobnost každé hrany rovna 1.



Obrázek 1: Příklad změny stavu po provedení přechodu v P/T Petriho síti

4 Petriho síť vyšší úrovně

Základní typy Petriho sítí byly postupně obohacovány a zobecňovány tak, aby schopnost tohoto modelovacího nástroje vyhověla praktickým potřebám. Dalšími typy Petriho sítí vzniklými rozšířením P/T sítí jsou:

- Petriho síť s inhibičními hranami (P/T PN with inhibitors),
- Petriho síť s prioritami (P/T PN with priorities),
- Časované Petriho síť (Timed PN),
- Barevné Petriho síť (Coloured PN),
- Hierarchické Petriho síť (Hierarchical PN),
- Objektové Petriho síť (Object-Oriented PN).

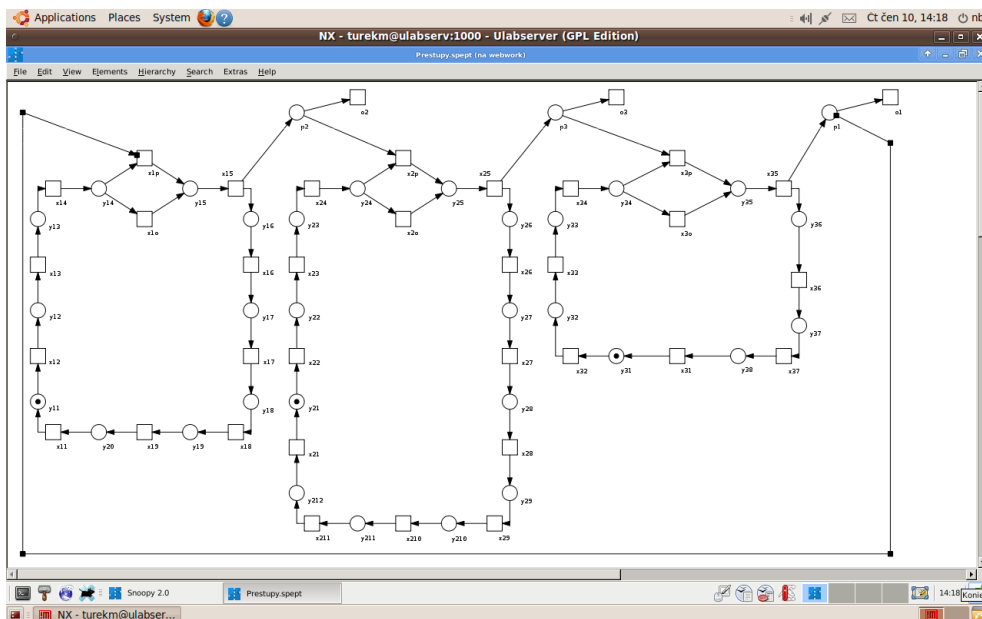
5 Specializovaný software pro sestavení Petriho sítě

Při vytváření Petriho sítě a následnou simulaci je nutné využít specializovaný software. V následující části budou popsány specializované software Snoopy a Pipe2, protože byly použity k řešení koordinace linek MHD s využitím Petriho sítí.

5.1 Software Snoopy

Spuštěním software Snoopy se zobrazí kromě základního okna také nabídka Petriho sítí a po zvolení zamýšlené Petriho sítě se zobrazí obrazovka obsahující menu a pracovní prostor. V pracovním prostoru (viz. obr. 2) se postupně vytváří Petriho síť prostřednictvím položek, které se nacházejí v menu. Kromě sestavení prvků Petriho sítě je možné definovat příslušné parametry, u každého místa lze definovat název, značení, komentář a grafickou podobu, u každého přechodu lze definovat název, komentář a grafickou podobu, pro každou hranu

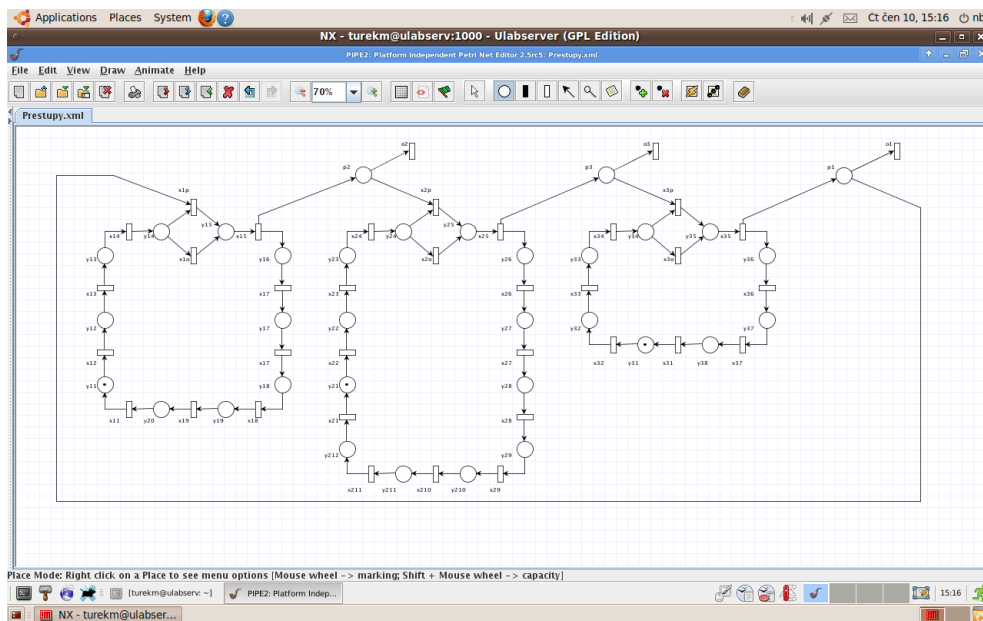
Ize definovat násobnost, komentář a grafickou podobu. Prostřednictvím položky Start Anim-mode, která je součástí menu, se v pracovním prostoru spouští simulace sestavené Petriho sítě. V rámci simulace se po hranách přesunují červně zbarvené tokeny a mění se počty tokenů v příslušných místech.



Obrázek 2: Pracovní prostor v software Snoopy

5.2 Software Pipe2

Spuštěním software Pipe2 se zobrazí obrazovka obsahující menu, pracovní prostor a rozšířenou analýzu Petriho sítí. K vytvoření Petriho sítě slouží pracovní prostor (viz. obr. 3), do kterého se prostřednictvím položek z menu vkládají jednotlivé prvky Petriho sítě. V případě, že se prvky Petriho sítě nacházejí v pracovním prostoru je možné definovat jejich parametry, u každého místa lze definovat název, značení a kapacitu, u každého přechodu lze definovat název, sazbu a časování, pro každou hranu lze definovat násobnost. Prostřednictvím položky Animate, která je součástí menu, se v pracovním prostoru spouští simulace sestavené Petriho sítě. Při simulaci se mění počty tokenů v příslušných místech a nedochází k viditelnému přesunu tokenů po hranách.



Obrázek 3: Pracovní prostor v software Pipe2

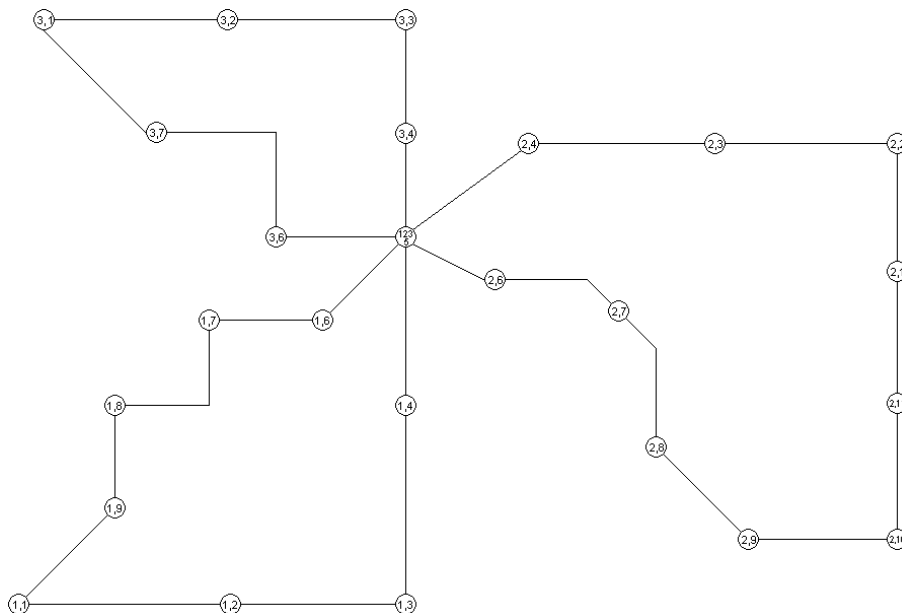
6 Aplikace P/T Petriho sítě na řešení úlohy o modelování koordinace linek MHD

Jedním ze způsobů řešení uvedeného problému je graficky založený model, kdy přechody představují zastávky, místa jízdy vozidla mezi zastávkami a tokeny představují vozidla.

Níže uvedený graficky založený model vychází z předlohy fiktivní dopravní sítě s okružním systémem tras linek MHD, které mají společnou přestupní zastávku v centru. Schéma sítě linek MHD modelové sítě je znázorněno na obr. 4. Celkový počet zastávek v síti činí 25, linka č. 1 obsluhuje 9 zastávek, linka č. 2 obsahuje 11 zastávek a linka č. 3 zahrnuje 7 zastávek. Čísla přiřazená jednotlivým hranám reprezentují číslo linky, která příslušnou trasu obsluhuje.

Pro potřeby modelování problému nástroji Petriho sítí se bude každá linka L_i skládat z posloupnosti přechodů $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij})$ a míst, která jsou spojena hranami, jak je uvedeno na obr. 5. Jednotlivé přechody reprezentují zastávky, přechod x_{i1} je výchozí zastávkou, x_{i5} představuje přestupní zastávku. Přechody x_{ip} a x_{io} představují propojení přestupních zastávek. Místa y_{ij} mezi těmito přechody představují pohyb vozidel mezi zastávkami. Místa označená p_i spojují linky L_i a L_{i+1} . Jejich prostřednictvím je možné modelovat pohyb cestujících, kteří chtějí přestoupit mezi dvěma spoji dvou linek.

Tokeny v Petriho síti budou mít dva významy. Jednak budou modelovat pohybující se vozidlo a potom také skupiny cestujících, kteří budou v přestupním uzlu přestupovat. V pří-



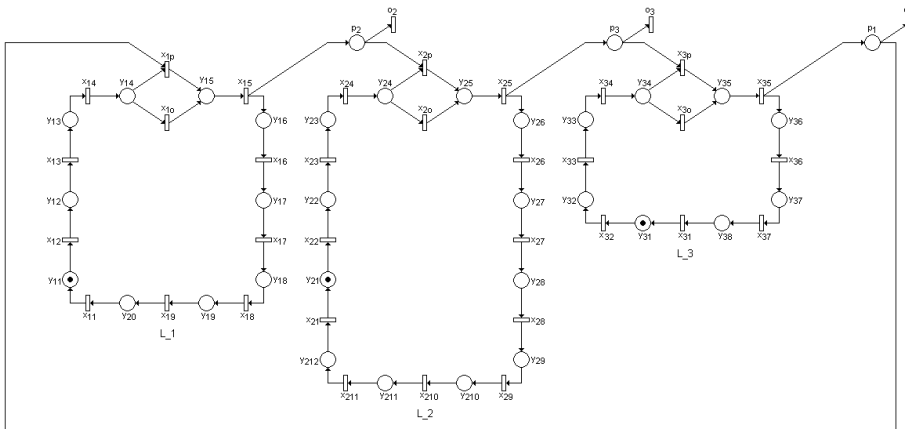
Obrázek 4: Předlohová dopravní síť MHD

padě místa p_i představuje token všechny cestující čekající na přestupní zastávce. V modelu dopravní sítě MHD se mohou vyskytovat různé varianty, buď je aktivován přechod reprezentující přestup cestujícího na spoj jiné linky nebo je aktivován přechod, který představuje že cestující nepřestupuje na spoj druhé linky.

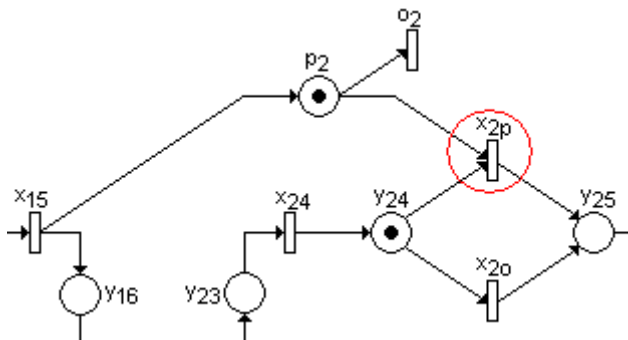
Vzhledem k tomu, že v Petriho síti přechody x_{ip} a x_{io} představují propojení přestupních zastávek a nerepresentují zastávky bude počet přechodů na jednotlivých linkách v modelu dopravní sítě MHD o 2 přechody vyšší než je počet zastávek na jednotlivých linkách. To znamená, že celkový počet přechodů na jednotlivých linkách bude činit 33. Přestupy cestujících modelují v navržené Petriho síti specifické komponenty. Příklad takové komponenty je uveden na obr. 6.

V případě, že cestující budou požadovat přestoupit mezi dvěma spoji dvou linek, bude tento požadavek znázorněn setrváním tokenu ve vstupním místě p_i představujícím všechny cestující, kteří chtějí přestoupit. To znamená, že v případě výskytu tokenu ve druhém vstupním místě y_{i4} bude splněna vstupní podmínka pro provedení přechodu x_{ip} a dojde k jeho aktivaci. V případě požadavku na přestup bude tedy zajištěna provázanost s odjezdem autobusu na přestupní zastávce prostřednictvím přechodu x_{ip} , který bude aktivován pouze v případě splnění vstupních podmínek.

Jestliže cestující nebudou potřebovat přestoupit, bude aktivován přechod o_i a v místě p_i se nebude vyskytovat token reprezentující přestupující cestující. V případě výskytu tokenu v místě y_{i4} znázorňující vozidlo tak bude splněna jediná vstupní podmínka přechodu x_{io}



Obrázek 5: Grafické znázornění Petriho sítě pro řešený problém

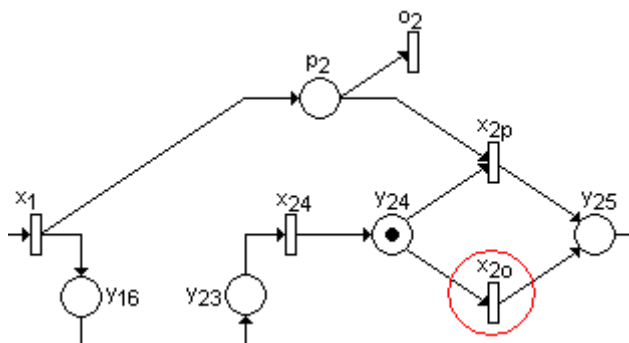


Obrázek 6: Fragment modelu Petriho sítě znázorňující požadavek přestup

a dojde k jeho aktivaci. Tato situace je znázorněna na fragmentu dopravní sítě MHD na obr. 7.

K modelování Petriho sítě se obecně využívá specializovaných software, např. Snoopy, Pipe2. Provedení simulace umožňuje pozorovat chování navrženého modelu a možné konflikty. Na základě zjištěných skutečností je pak možné změnit konfiguraci modelu. V případě modelu dopravní sítě MHD v Petriho síti se může jednat o modelování návaznosti na přestupních zastávkách.

Postup při potřebě využití Petriho sítě je tedy následující. V první řadě je třeba sestavit podle zvolené koncepce Petriho sítě model v Petriho síti. Každá Petriho síť se skládá z posloupnosti přechodů a míst spojených orientovanými hranami. Prostřednictvím orientovaných hran se znázorní logické vazby mezi objekty, které jsou vzájemně ovlivněny. K tomu, aby bylo možno modelovat pohyb vozidel, je nutné před začátkem simulace do některého místa na každé lince umístit token představující vozidlo. Token reprezentující cestující, kteří



Obrázek 7: Fragment modelu Petriho sítě bez požadavku na přestup

potřebují přestoupit vznikne rozdělením tokenu představujícího vozidlo, který vstoupí do přechodu x_{i5} – přestupní zastávky ze kterého vycházejí dvě orientované hrany.

7 Závěr

Předmětem článku je modelování koordinace linek MHD s využitím Petriho sítí. V první části je seznámení s nástrojem Petriho sítí včetně koncepce a popsány software umožňující sestavení Petriho sítě. Sestavování Petriho sítě v software Snoopy a Pipe2 je shodné, protože oba software využívají pro sestavení Petriho sítě pracovní prostor, do kterého se prostřednictvím položek z menu vkládají jednotlivé prvky Petriho sítě. Rozdíl mezi software nastává v případě definování vlastností prvků, protože definování kapacity míst a časování přechodů umožňuje pouze software Pipe2. Z hlediska simulace dochází ke změnám počtu tokenů v příslušných místech při použití obou software, přičemž při použití software Snoopy dochází navíc k viditelnému přesunování zvýrazněných tokenů po hranách.

Ve druhé části je vytvořen zjednodušený model dopravní sítě MHD v Petriho síti, ve kterém přechody reprezentují zastávky, místa jízdy vozidla mezi zastávkami a tokeny představují autobusy, případně skupiny přestupujících cestujících. V rámci řešené problematiky se jedná např. o modelování pohybu vozidel v síti linek MHD a zajištění koordinace spojů na přestupních zastávkách. Petriho sítě by tak v budoucnu mohly být využívány při hodnocení návrhu dopravní sítě MHD.

V případě výše uvedeného modelu došlo k určitému zjednodušení, v reálném provozu je totiž třeba zohlednit intenzity přepravního proudu, počty a kapacity vozidel, doby oběhů vozidel na jednotlivých linkách. Při návrhu odpovídajícímu reálnému provozu bude vhodné uplatnit pro sestavení a následnou simulaci software Pipe2, protože vykazuje lepší modelovací schopnosti.

Literatura

- [1] ČERNÝ, J. – KLUVÁNEK, P.: Základy matematickej teorie dopravy. Bratislava: VEDA, 1990. ISBN 80-224-0099-8
- [2] ČERNÝ, J. – ČERNÁ, A.: Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech. Pardubice: Institut J. Pernera, 2004. 1. vydání, 150 s. ISBN 80-86530-15-9.
- [3] MARKL, J.: Petriho sítě I. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009.
- [4] KOCHANÍČKOVÁ, M.: Petriho sítě. Olomouc: Univerzita Palackého, 2008.
- [5] Snoopy. Oficiální stránka. Dostupné na internetu: <http://www-dssz.informatik.tu-cottbus.de/index.html?/software/snoopy.html>
- [6] Pipe2. Oficiální stránka. Dostupné na internetu: <http://pipe2.sourceforge.net>

Kontaktní adresa

Richard TUREK (Ing.),
Institut dopravy FS VŠB – TU Ostrava,
17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba,
richardturek@seznam.cz

Otvorený softvér vo vzdelávaní, výskume a v IT riešeniach

1.–4. júla 2010, Žilina, Slovensko

Organizátori: Miloš Šrámek, Spoločnosť pre otvorené informačné technológie
Tatiana Šrámková, Katedra fyziky, FEI STU Bratislava
Michal Kaukič, Aleš Kozubík, Tomáš Majer, Žilinská univerzita
Lýdia Gábrisová, Ľubica Micháľková, Žilinská univerzita
Juraj Bednár, Digmia, Slovensko
Miloslav Ofúkaný, GeoCommunity, Slovensko
Peter Mráz, Kremnica
Slavko Fedorik, SOŠ elektrotechnická, Poprad
Peter Štrba, Spojená škola/Gymnázium M. Galandu, Turčianske Teplice
Ladislav Ševčovič, FEI, Technická univerzita v Košiciach

Editori: Michal Kaukič
Miloš Šrámek
Slavko Fedorik
Ladislav Ševčovič

Recenzenti: Mgr. Juraj Bednár
Mgr. Rudolf Blaško, PhD.
RNDr. Ján Buša, CSc.
Ing. Slavko Fedorik
Ing. Karol Grondžák, PhD.
Mgr. Michal Kaukič, CSc.
Ing. Tomáš Kliment
RNDr. Aleš Kozubík, PhD.
Mgr. Juraj Michálek
doc. RNDr. Štefan Peško, CSc.
Ing. Pavel Stříž, PhD.
RNDr. Ladislav Ševčovič
Ing. Michal Žarnay, PhD.

Vydavateľ: Spoločnosť pre otvorené informačné technológie – SOIT, Bratislava

ISBN 978-80-970457-0-8

Sadzba programom pdfT_EX Ladislav Ševčovič

Copyright © 2010 autori príspevkov. Príspevky neprešli redakčnou ani jazykovou úpravou.

Ktokoľvek má dovolenie vyhotoviť alebo distribuovať doslovný opis tohoto dokumentu alebo jeho časti akýmkoľvek médiom za predpokladu, že bude zachované oznámenie o copyrighte a o tom, že distribútor príjemcovi poskytuje povolenie na ďalšie šírenie, a to v rovnakej podobe, akú má toto oznámenie.