



University of West Bohemia in Pilsen
Department of Computer Science and Engineering
Univerzitni 8
30614 Pilsen
Czech Republic

Simulation Study of a Traffic Node Throughput

(Simulační studie průchodnosti dopravního uzlu)

Stanislav Racek

Technical Report No. DCSE/TR-2002-03
January, 2002

Distribution: public

Simulation Study of a Traffic Node Throughput

(Simulační studie průchodnosti dopravního uzlu)

Stanislav Racek

Abstract

This paper presents state-machine approach that was used to create a discrete-time process-oriented simulation model based on the C-Sim simulation library. The method is demonstrated on a model of the Pilsen town traffic node, where we have a dynamic set of vehicles which are present inside the node, each of them modeled as a state machine instance. The work was initialized by a request incoming from *Plzensky holding a.s.* company in connection with a project of integrated local transport system in Pilsen, Czech republic.

Zpráva popisuje využití konceptu stavových strojů k sestavení simulačního modelu na bázi simulátoru C-Sim. Metoda je demonstrována na simulačním modelu dopravního uzlu, kde prvky dynamické množiny vozidel (tramvají) nacházejících se uvnitř uzlu jsou modelovány jako instance příslušného typu stavového stroje. Práce vznikla na základě zadání ze společnosti Plzeňský holding a.s. v souvislosti s projektem příměstské tramvaje ve městě Plzni.

This work was supported by Plzensky holding a.s. company.
A theoretical part of work was supported from the project MSM 235200005 of the Czech republic Ministry of Education.

Práce byla podporována společností Plzeňský holding a.s.
Práce na vývoji metod simulace distribuovaných systémů a nástrojů pro specializované úlohy z oblasti diskrétní simulace je podporována MŠMT ČR v rámci výzkumného záměru Informační systémy a technologie (ident. kód MSM 235200005).

Copies of this report are available on

<http://www.kiv.zcu.cz/publications/>
or by surface mail on request sent to the following address:

University of West Bohemia in Pilsen
Department of Computer Science and Engineering
Univerzitni 8
30614 Pilsen
Czech Republic

Copyright © 2002 University of West Bohemia in Pilsen, Czech Republic

Obsah

1. Úvod

2. Využití abstrakce stavového stroje jako modelu projíždějícího vozidla

2. Implementace simulačního modelu

3.1. Parametry modelu

3.2. Popis sledovaného děje

3.3. Sledované ukazatele

4. Výsledky

4.1. Provoz mimo špičku, odbavení cestujících probíhá na obou místech navrhované zastávky.

4.2. Provoz mimo špičku, odbavení cestujících probíhá jen na předním místě navrhované zastávky.

4.3. Provoz s vkládanou špičkou, odbavení cestujících probíhá na obou místech navrhované zastávky.

4.4. Provoz s vkládanou špičkou, odbavení cestujících probíhá jen na předním místě navrhované zastávky.

5. Závěr

1. Úvod

Předložená výzkumná zpráva popisuje simulační studii realizovanou na Katedře informatiky a výpočetní techniky Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni na základě požadavku společnosti Plzeňský holding a.s. v souvislosti s projektem příměstské tramvaje ve městě Plzni. V jedné z alternativ projektu byl uvažován návrh nové tramvajové zastávky dle následující specifikace:

- V sadech pětaticátníků bude ve směru Lochotín -> Bory zřízena tramvajová zastávka (označení dále Sady pětaticátníků), ve které mohou zastavit nejvýše dvě tramvaje. Variantně je uvažováno odbavování cestujících na obou místech zastavení či pouze na předním místě (tj. předním ve směru jízdy, v dalším textu jsou používány termíny *přední a zadní místo*).
- Tramvaj číslo čtyři projíždí rovně (jako dosud) a zastavuje pouze v zastávce Sady pětaticátníků, nikoliv na zastávkách U hlavní pošty a U synagogy. Zastávky U hlavní pošty a U synagogy budou zrušeny.
- Tramvaj číslo jedna nezastavuje na zastávce U hlavní pošty, projíždí rovně křižovatkou, zastavuje v (navrhované) zastávce Sady pětaticátníků, po odbavení cestujících pokračuje (jako dosud) doleva do Prešovské ulice.
- Tramvaj číslo dva ze Škvřňan přijíždí z náměstí Palackého (změna proti stávajícímu stavu), odbočuje doprava na křižovatce u hlavní pošty, zastavuje na zastávce Sady pětaticátníků, po odbavení cestujících pokračuje (jako dosud) na světelnou signalizaci doleva do Prešovské ulice.

Zadání pro simulační studii:

Vyhodnotit vliv navrhované zastávky na plynulost tramvajového provozu zejména v době ranní a odpolední špičky. Pro vyhodnocení použít současné (konec roku 2001) parametry tramvajové dopravy včetně současných cyklů signalizace na křižovatkách. Odhadovaná střední doba odbavení cestujících na navrhované zastávce je 60 sec, odbavení cestujících probíhá současně na obou místech navrhované zastávky.

2. Využití abstrakce stavového stroje jako modelu projíždějícího vozidla

Stavový stroj je abstrakcí popisující zobecněný konečný automat, tedy systém vyvíjející se v diskrétním čase a reagující změnou stavu buď na nějakou událost ve svém okolí nebo na překročení stanoveného časového limitu (angl. timeout). V teorii počítačových věd jsou stavové stroje zhusta využívány pro modelování paralelních procesů (vláken), komunikačních protokolů, výpočetních systémů odolných proti poruchám (viz např. [Sch90]), atd. Koncept stavového stroje lze však stejně dobře využít pro abstraktní model vozidla projíždějícího dopravním uzlem nebo pro abstraktní model automatu ovládajícího světelnou signalizaci na konkrétní křižovatce.

Formální popis nějakého systému prostřednictvím stavových strojů (tj. některé prvky systému chápeme jako stavové stroje) lze typicky využít pro matematické odvození či důkazy vlastností systému. Je však též možné sestavit metodou přímého modelování simulační model systému koncipovaný jako množina vzájemně vázaných stavových strojů a experimentálně (tj. opakovaným spouštěním simulačního modelu) ověřovat specifikovanou vlastnost systému. Toto je též případ popisovaný v předložené zprávě, kde koncept stavových strojů byl použit pro modelování průchodnosti tramvajové zastávky, která se nachází v dopravním uzlu, kde se “kříží” několik tramvajových linek. Jako stavové stroje jsou modelovány jednak projíždějící tramvaje a dále též světelná signalizace na křižovatkách před a za modelovanou zastávkou. Pro sestavení simulačního modelu byl použit simulátor C-Sim [Csim].

Dále se pokusíme neformálně vymezit pojem stavového stroje a jeho popisu prostřednictvím simulátoru C-Sim. Budeme rozlišovat jednak typ stavového stroje a dále instanci příslušného typu, tedy konkrétní stavový stroj. Pokud nebude řečeno jinak, termín stavový stroj budeme používat pro typovou informaci kompletně popisující chování celé třídy strojů příslušného typu. Stavový stroj budeme chápat jako aktivitu, tj. jeho simulačním modelem bude (pseudoparalelní) proces, přesněji v simulovské terminologii třída odvozená od PROCESS. Simulační prostředek C-Sim vychází ideově ze Simuly, využívá však výrazové prostředky jazyka C (včetně např. maker, pomocí kterých jsou vytvářeny programy procesů, emulována dědičnost ze základních typů, atd.).

Stavový stroj je popsán pomocí grafu přechodů, kde:

- uzly grafu jsou jednotlivé stavy,
- hrany grafu jsou přechody mezi stavy.

Rozlišujeme stavy s charakterem:

- stabilní (angl. stable), tj. v příslušném stavu se modelovaný stroj nějakou dobu (v modelovém čase) “zdrží”, pro tento účel se v implementaci využijí simulovské příkazy hold() nebo passivate(),
- přechodné (angl. transient), tj. v příslušném stavu se nemusí modelovaná instance stavového stroje “zdržet”, pouze přechází (nulová doba trvání v modelovém čase) do dalšího stavu.

Proces (ve smyslu simulovského procesu), který je simulačním modelem stavového stroje, má vlastní (tj. lokální) data a vlastní program (sdílený všemi

instancemi příslušného typu procesu, v Simule třídy procesu). Stav stroje je dán místem v programu, kde se nachází aktivita jeho procesu (tzv. reaktivační bod procesu v simulovské terminologii). Přechod ze stavu do stavu je popsán sekci programového kódu nacházející se mezi dvěma stavy (reaktivačními body). Lokální data procesu jsou atributem stavu procesu. Typicky z jednoho stavu existuje několik přechodů, přičemž konkrétní přechod je vybrán (execucí příslušné sekce kódu) v závislosti na atributu stavu (hodnotách lokálních dat procesu) a na hodnotách globálních dat modelu.

Statický pohled na simulační model konstruovaný s využitím konceptu stavových strojů pak obsahuje zejména:

- množinu popisů stavových strojů (resp. jejich typů), popis stavového stroje je složen z popisu atributu stavu (tj. typu lokálních dat příslušné třídy procesů) a z (typového) programu třídy procesů,
- množinu popisů typů “pasivních” objektů, tj. objektů nevyvozujičích vlastní aktivitu,
- inicializační funkci (popřípadě hlavní program), která provede vytvoření patřičného počtu instancí zavedených typů, jejich vzájemné “propojení” a aktivaci alespoň jednoho procesu.

Dynamický pohled na simulační model (tj. na objekty existující za chodu simulačního programu) obsahuje tyto entity:

- dynamicky proměnlivý počet instancí stavových strojů (procesů) vzájemně propojených prostřednictvím platných odkazů (referencí) obsažených v lokálních datech (atributech) objektů; v pseudo-paralelním procesově orientovaném simulačním výpočtu jen jeden proces počítá (tj. realizuje přechod mezi dvěma svými stavy) a ostatní procesy “čekají” v nějakém stavu symbolizovaném buď použitím hold() nebo passivate(),
- dynamicky proměnlivý počet instancí pasivních objektů (třeba zprávy, fronty zpráv apod.) sdílených mezi procesy - instancemi stavových strojů,
- staticky (compile-time) daný počet instancí primitivních či uživatelsky definovaných typů figurujících jako globální data simulačního výpočtu.

Pro konstrukci simulačního modelu koncipovaného jako množina spolupracujících instancí stavových strojů je dobré dodržet následující “kompoziční” pravidla:

- stavový stroj nepoužívá globální reference na jiné objekty; pokud reference potřebuje, má je jako položky ve svých lokálních datech (složky atributu stavu),
- instance stavových strojů nemají pokud možno mezi sebou reference (tj. “neznají se”),
- pokud reference (instanční vazby v terminologii OOP) mezi sebou mají, využívají je pouze k testu stavu spolupracujícího stroje (např. pasivní/plánovaný, simulovská funkce idle()) a popřípadě k jeho aktivaci (simulovská funkce activate()),
- instance stavových strojů mají reference na pasivní objekty zapouzdřující “globální data” simulačního modelu,

- při realizaci přechodu se instance stavového stroje (sama) rozhoduje jaký bude příští stav na základě atributu svého stavu (lok. data procesu modelujícího instanci stavového stroje), na základě testu stavu spolupracujících instancí stavových strojů a na základě informací poskytnutých z pasivních objektů představujících globální data simulačního výpočtu.

Uvedená pravidla obecně vedou k vysokému stupni autonomie jednotlivých aktivit (tj. instancí stavových strojů) v modelu a tudíž též k přehlednosti modelu, jednoduchému ladění simulačního programu a rovněž k flexibilitě (tj. možnosti jednoduché modifikace) modelu a opakovatelnému využití (angl. reusability) použitých typů stavových strojů.

Dále předvedeme na příkladu implementaci některých výše zavedených abstraktních pojmů s využitím výrazových prostředků simulátoru C-Sim.

Typ atributu stavu stavového stroje (tj. lokální data modelujícího procesu):

```
typedef struct {
    d_process;          /*makro – emulace dědičnosti – přidává společné atributy procesů */
    double lambda;     /* ... následují jednotlivé položky atributu stavu */
    int counter;
    /* ... */
} State_machine_1;
```

Příklad realizace programu chování stavového stroje typu `State_machine_1` (v C-Sim je typ procesu dán typem jeho dat – zde `State_machine_1`). Program všech procesů tohoto typu budiž C-funkce se jménem `Sml_Prog`:

```
s_program (State_machine_1, Sml_Prog)
/* program aktivity stroje, popis prostřednictvím C-syntaxe, k lokálním datům
   instance se přistupuje přes operátor my, třeba my.counter */
/* například stroj s časově neohrazenou aktivitou by vypadal takto: */

for (;;) {
    state_0:    /* časově neohrazené setrvání ve stavu, nutná vnější aktivace */
    passivate ();
    /* .... akce při přechodu do dalšího stavu, vlastní přechod
       (do jiného stavu než state_1) je realizován skokem goto state_x; */

    state_1:    /* časově ohraničené (delta1_time) čekání ve stavu 1 */
    hold (delta1_time);
    /* .... akce při přechodu do dalšího stavu, vlastní přechod
       (do jiného stavu než state_2) je realizován skokem goto state_y; */

    state_2:    /* potenciálně „přechodný“ stav, proces se v něm nemusí „zdržet“ */
```



```
if (my.counter <= N) {
    /* nějaký výpočet – změna lok. dat procesu či glob. dat modelu (přechod 2 ->0)*/;
    goto state_0;
}
else {
    hold (delta2_time); /*přece jenom se zdrží */
    /* ... po “probuzení” něco udělá (přechod 2->3) a přejde do stavu 3 */
}
state_3: /* .... */

/* ... */
}
s_end_program (State_machine_1, Sml_Prog)
```

3. Implementace simulačního modelu

3.1. Parametry modelu

Poznámka:

Dále uváděné hodnoty parametrů modelované situace vesměs slouží jako parametry simulačního programu a mohou být tudíž v případě potřeby jednoduše změněny či opraveny na základě přesnějšího poznání reality, či jejího zpřesněného odhadu pro budoucí dobu.

Časové parametry příjezdů

Dle požadavku zadavatele studie byly časové parametry příjezdů odvozeny ze stávajících jízdních řádů tramvají číslo jedna, dva a čtyři. Pro tramvaje číslo jedna a čtyři byly využity doby příjezdů do zastávky U hlavní pošty, pro tramvaj číslo dva doby příjezdů do zastávky U synagogy.

Z jízdních řádů byly extrahovány přibližné střední hodnoty časových intervalů TA1, TA2, TA3 mezi průjezdy jednotlivých typů tramvají pro dvě základní situace označované v dalším textu jako *špička* a *normální provoz*. Pro určení parametrů špičkového provozu byla rozhodující (výraznější) ranní špička, která je v uvažovaném místě zhruba v době od 7:15 do 7:45. Uvažované hodnoty časových intervalů mezi příjezdy a jim odpovídající frekvence příjezdů jsou uvedeny v tabulce 1.

	<i>normální provoz</i>		<i>Špička</i>	
	<i>prioda</i> [min]	<i>frekvence</i> [1/min]	<i>prioda</i> [min]	<i>Frekvence</i> [1/min]
<i>Tramvaj č. 1</i>	6,0	0,167	3,0	0,333
<i>Tramvaj č. 2</i>	8,0	0,125	4,0	0,250
<i>Tramvaj č. 4</i>	4,0	0,250	2,0	0,500
<i>Celkem</i>	--	0,542	--	1,083

Tabulka 1: Časové intervaly mezi příjezdy a odpovídající frekvence

Z hodnot uvedených v tab. 1 vyplývá, že celková (tj. pro všechny typy tramvají) uvažovaná frekvence průjezdů modelovaným dopravním uzlem ve špičce je zhruba 1 tramvaj za minutu (přesně 1,083/min) a frekvence průjezdů v normálním provozu je poloviční, tj. zhruba 1 tramvaj za dvě minuty.

Časové parametry světelné signalizace na křižovatkách

Tyto parametry byly získány zejména z pozorování současného stavu na křižovatkách U hlavní pošty a U synagogy a mohou být tudíž zatíženy nějakou nepřesností pozorování. Cykly světelné signalizace na obou křižovatkách mají periodu 100 sec a jsou vzájemně svázány. Jako počáteční událost vázaného cyklu je uvažována zelená (současně pro auta i tramvaj) rovně ve směru Lochotín -> Bory na

křižovatce U hlavní pošty. Relativní časy (tj. proti začátku cyklu) událostí uvažovaných v simulačním modelu jsou uvedeny v tabulce 2.

<i>rel. čas [sec]</i>	<i>Událost</i>
0	Zač. cyklu, zelená rovně U hlavní pošty
10	Zelená pro tramvaj i auta rovně U synagogy, zároveň zelená pro tramvaj doleva (pokud je tam tramvaj)
12	Konec zelené pro tramvaj doleva U synagogy
30	Konec zelené pro tramvaj rovně U hlavní pošty
55	Konec zelené pro tramvaj rovně U synagogy
65	Zelená doprava z Palackého nám. na křižovatce U hlavní pošty
70	Zelená pro tramvaj doleva U synagogy (pokud je tam tramvaj)
72	Konec zelené pro tramvaj doleva U synagogy
100	Konec zelené pro tramvaj doprava z Palackého (zároveň začátek dalšího cyklu, tj. zelená rovně U hlavní pošty)

Tabulka 2: Časování světel na křižovatkách

Poznámky:

- 1) Intervaly oranžového světla dopravní signalizace nejsou uvažovány.
- 2) Na křižovatce U hlavní pošty je pro tramvaj č.2 (která zde v současné době nejezdí) uvažována stávající signalizace pro auta odbočující z Palackého náměstí doprava.
- 3) Zelená doleva pro tramvaj na křižovatce U synagogy je vázána na přítomnost čekající tramvaje a může být vystavena dvakrát v průběhu cyklu. Světelný signál je krátkodobý (cca 2 sec) a může na něj projet jen 1 tramvaj.
- 4) Parametry časových cyklů dopravních světel jsou považovány za deterministické konstantní veličiny, tj. nemění se s časem a nepodléhají žádným náhodným vlivům (mj. nejsou ovlivněny okamžitou situací na křižovatkách).

Časové parametry čekání tramvají na zastávce

Střední doba TP trvání odbavení cestujících na navrhované zastávce Sady pětatřicátníků byla zadavatelem simulační studie odhadnuta na jednu minutu. V dále uvedených výsledcích získaných prostřednictvím simulačního programu je variantně uvažována i poloviční průměrná doby odbavení cestujících, tj. $TP = \{30 \text{ sec}, 60 \text{ sec}\}$. Doba TP je měnitelným parametrem chodu simulačního programu.

Dynamika jízdy tramvají

Dynamika jízdy tramvají není v simulačním programu detailněji modelována. Předpokládá se jednotná střední doba $TR = 7 \text{ sec}$ pro všechny přechodové děje, tj. přejezd z místa čekání na vstupním semaforu na zadní místo zastávky, přejezd ze zadního na přední místo zastávky a přejezd z předního místa zastávky ven z křižovatky U synagogy.

Náhodnost časových parametrů průjezdů tramvají

V reálném provozu dopravní sítě nemohou být pochopitelně v důsledku náhodných vlivů příjezdy tramvají zcela pravidelné v časech stanovených jízdním řádem. Rovněž doby odbavení tramvaje na navrhované zastávce budou kolem střední hodnoty TP kolísat podle počtu pasažérů.

V simulačním modelu se předpokládá normální (Gaussovské) pravděpodobnostní rozdělení časových parametrů jízdy tramvají.

Uvažované střední hodnoty časových parametrů TA1, TA2, TA3, TP a TR již byly zavedeny výše. Směrodatnou odchylku σ normálního rozdělení (shodnou pro všechny uvedené parametry) je možné zvolit jako parametr chodu simulačního programu. V dále uvedených výsledcích simulačního modelování byly kromě hodnoty $\sigma = 0$ (deterministický případ, tramvaje přijíždí přesně se stanovenou periodou TA) použity hodnoty $\sigma = 0,1$ a $\sigma = 0,2$. Je tudíž uvažována desetiprocentní a dvacetiprocentní průměrná odchylka od zvolených středních hodnot časových parametrů průjezdu tramvají modelovaným dopravním uzlem.

3.2. Popis sledovaného děje

Pro konstrukci simulačního modelu byla použita metoda procesově orientované diskrétní pravděpodobnostní simulace. Jako programovací nástroj byl využit simulátor C-Sim v úpravě pro prostředí MS-DOS (viz <http://www.c-sim.zcu.cz>).

V objektově orientovaném simulačním programu jsou jako základní typy objektů použity **tramvaj** (dynamický aktivní objekt, tj. proces), **semafor** (statický aktivní objekt), **fronta** (pasivní objekt s charakterem kontejneru pro ukládání objektů typu tramvaj).

Jako stavový stroj byla popsána projíždějící vozidla (zde tramvaje) a dále též světelná signalizace na křižovatkách (typ semafor). Dopravní uzel je vymezen dvěma křižovatkami, mezi kterými je tramvajová zastávka. Tramvaje (3 různé linky) přijíždí do modelovaného uzlu, stojí ve frontách na vstupní křižovatce uzlu a pak (dopravní signalizace) vjíždí do zastávky. Na zastávce mohou stát současně nejvýše dvě tramvaje, přičemž odbavování cestujících probíhá variantně buď na obou místech, či pouze na „předním“ místě zastávky. Objekty tramvají v modelu dynamicky vznikají a zanikají. Předvedeme kostru kódu C-Sim procesu, který představuje stavový stroj tramvaje projíždějící modelovaným uzlem:

```
s_program (TRAM, TRAM_PROG)
state_0:      /* ... příjezd, přechod do stavu 2 nebo 1 */
state_1: passivate() ; /* čekání ve vstupní frontě */
/* ... následuje přechod do stavu 2 nebo návrat do 1 */
state_2: hold gauss(transient_time); /* přejezd přes vstupní křižovatku */
/* ... následuje přechod do stavu 3 nebo 5 */
state_3: hold gauss(processing_time); /* odbavování cestujících – zadní místo */
/* ... následuje přechod do stavu 4 nebo 5 */
```

```

state_4: passivate(); /* čekání odbavené tramvaje na zadním místě */
/* ... následuje přechod do stavu 5 nebo návrat do 4 */
state_5: hold (gauss(transient_time)); /* přejezd ze zadního na přední místo */
/* ... následuje přechod do stavu 6, 7 nebo 8 */
state_6: hold (gauss(processing_time)); /* odbavování cestujících – přední místo */
/* ... následuje přechod do stavu 7 nebo 8 */
state_7: passivate(); /* čekání odbavené tramvaje na předním místě zastávky */
/* ... následuje přechod do stavu 8 nebo návrat do 7 */
state_8: hold(gen_gauss(transient_time)); /* přejezd přes výstupní křižovatku */
/* ... následuje přechod do stavu 9 */
state_9: /* ... odjezd (přechodný stav, realizace statistiky) */
s_end_program (TRAM, TRAM_PROG)

```

"Normální" tramvajový provoz navrhovaným dopravním uzlem je modelován jako časově neomezený stacionární náhodný proces charakterizovaný základními hodnotami frekvencí příjezdů tramvají (viz hodnoty pro tzv. *normální provoz* v tabulce 1. Do tohoto procesu je periodicky "vkládána" půlhodinová "špička" provozu (viz hodnoty frekvencí příjezdů pro špičku v tab.1). Doba mezi jednotlivými špičkami musí být dostatečně dlouhá, aby postačovala pro "odeznění špičky", a po předběžných experimentech byla její hodnota nastavena na dvě hodiny. Oba základní (a periodicky se opakující) intervaly (tj. "normální provoz" a "špička") mají společnou hodnotu parametru nepravidelnosti časového chování σ .

Pro jednotlivé varianty modelovaného děje byly sestaveny čtyři modifikace simulačního programu:

TRAM_1.C - normální provoz bez špiček, odbavování cestujících na obou místech navrhované zastávky Sady pětatřicátníků,

TRAM_2.C - normální provoz bez špiček, odbavování cestujících jen na předním místě navrhované zastávky Sady pětatřicátníků,

TRAM_3.C - provoz s vkládanou špičkou, odbavování cestujících na obou místech navrhované zastávky Sady pětatřicátníků,

TRAM_4.C - provoz s vkládanou špičkou, odbavování cestujících jen na předním místě navrhované zastávky Sady pětatřicátníků,

Výsledky získané během jednotlivých verzí simulačního programu jsou uvedeny dále v odstavcích 4.1. až 4.4.

3.3. Sledované ukazatele

Jako základní sledované ukazatele byly zvoleny:

- *střední délka fronty tramvají č. 4 a 1* (projíždí rovně) na semaforu U hlavní pošty,

- **střední délka fronty tramvají č.2** (zatačí doprava) na semaforu nám. Palackého,
- **střední doby průjezdu tramvají č. 1,2 a 4** uvažovaným dopravním uzlem.

Tyto ukazatele byly vyhodnoceny pro dvě základní situace:

- **normální provoz** (základní frekvence průjezdů, poloviční proti špičkovým),
- **špička** (frekvence průjezdů zhruba odpovídají současné ranní špičce),

s cílem získat:

- hodnoty pro normální provoz bez špiček** (průměrované přes celou dobu modelovaného provozu, slouží jako srovnávací hodnoty)
- hodnoty desetiminutového maxima**, tj. hodnoty získané průměrováním přes desetiminutový interval na konci špičky (5 min před a 5 min po změně frekvencí příjezdů) a průměrováním přes celou dobu modelovaného provozu (tj. přes všechny špičky).

Každý simulační experiment byl proveden **pro dobu 1 milion sec**, což znamená:

ad a) statistické vyhodnocení cca 12-ti dní nepřetržitého intervalu "normálního provozu"

ad b) vyhodnocení cca 100 intervalů "špičkového provozu" vkládaného do základní úrovně "normálního provozu".

4. Výsledky

4.1. Provoz mimo špičku, odbavení cestujících probíhá na obou místech navrhované zastávky.

Výsledky pro tento případ jsou uvedeny v tabulce 3.

Střední doba odbavení v zastávce		30 [sec]			60 [sec]		
Nepravidelnost sigma		0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2
Střední délka fronty [počet tramvají]	Palackého	0.06	0.05	0.04	0.09	0.06	0.06
	U pošty	0.18	0.20	0.20	0.20	0.24	0.25
Střední doba průjezdu [sec]	č. 1	97	104	104	162	154	153
	č. 2	97	93	92	150	135	133
	č. 4	90	92	93	147	148	147

Tabulka 3: Normální provoz, odbavení cestujících na obou místech

Z tabulky výsledků mj. vyplývá, že závislost sledovaných ukazatelů na koeficientu *sigma* nepravidelnosti příjezdů tramvají do modelovaného uzlu je relativně malá, což je typické pro malé vytížení uzlu. **Průměrné průjezdní doby tramvají by byly pro modelovaný případ zřejmě akceptovatelné** (frekvence průjezdů jsou ale trvale na poloviční hodnotě proti současné ranní špičce).

4.2. Provoz mimo špičku, odbavení cestujících probíhá jen na předním místě navrhované zastávky.

Výsledky pro tento případ jsou uvedeny v tabulce 4.

Střední doba odbavení v zastávce		30 [sec]			60 [sec]		
Nepravidelnost sigma		0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2
Střední délka fronty [počet tramvají]	Palackého	0.06	0.04	0.04	0.08	0.06	0.07
	U pošty	0.18	0.20	0.21	0.27	0.27	0.28
Střední doba průjezdu [sec]	č. 1	109	114	116	188	183	178
	č. 2	102	98	99	194	167	165
	č. 4	90	102	105	167	167	169

Tabulka 4: Normální provoz, odbavení cestujících jen na předním místě

Z hodnot uvedených v tab. 4 lze srovnáním s tab. 3 vysledovat, že pro relativně nízké frekvence průjezdů se sledované ukazatele příliš nezhorší omezením možnosti odbavování cestujících pouze na přední místo navrhované zastávky v Sadech pětatřicátníků.

4.3. Provoz s vkládanou špičkou, odbavení cestujících probíhá na obou místech navrhované zastávky.

Výsledky pro tento případ jsou uvedeny v tabulce 5.

Tato tabulka udává hodnoty desetiminutového maxima sledovaných ukazatelů. Hodnoty vzniknou průměrováním údajů získaných z desetiminutových intervalů na konci špičky, přesněji z intervalů začínajících pět minut před koncem špičky a končících pět minut po ukončení špičky. Špička vznikne zvýšením frekvencí příjezdů tramvají na dobu půl hodiny na dvojnásobek základních hodnot, tj. zhruba na hodnoty dosahované v ranní špičce dle současného stavu (celková frekvence cca 1 tramvaj za minutu).

Hodnoty uvedené v tabulce 5 jsou pravděpodobně nejdůležitější pro posouzení vlivu navrhované zastávky. Bohužel pro odhadovanou střední dobu odbavení cestujících v zastávce 60 sec jsou průjezdní časy tramvají číslo 1 a 4 ve špičce neúnosně vysoké (cca 10min). Tramvaj číslo 2 kupodivu stále projíždí s akceptovatelným zdržením (cca 3 min) díky tomu, že ji semafor na křižovatce U hlavní pošty "upřednostňuje" před tramvajemi 1 a 4 při vjezdu do (právě vyprázdněné) zastávky Sady pětatřicátníků.

Střední doba odbavení v zastávce		30 [sec]			60 [sec]		
		0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2
<i>Nepravidelnost sigma</i>		0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2
Střední délka fronty [počet tramvají]	<i>Palackého</i>	0.07	0.10	0.10	0.27	0.25	0.25
	<i>U pošty</i>	0.52	0.89	1.06	8.41	7.94	7.92
Střední doba průjezdu [sec]	č. 1	112	142	159	694	664	656
	č. 2	97	97	96	186	165	164
	č. 4	129	144	157	702	652	644

Tabulka 5: Provoz s vkládanou špičkou, odbavení cestujících na obou místech

4.4. Provoz s vkládanou špičkou, odbavení cestujících probíhá jen na předním místě navrhované zastávky.

Výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.

Střední doba odbavení v zastávce		30 [sec]			60 [sec]		
		0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2
Nepravidelnost σ		0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2
Střední délka fronty [počet tramvají]	Palackého	0.08	0.10	0.11	-	0.27	0.22
	U pošty	1.74	2.14	2.23	-	16.73	11.24
Střední doba průjezdu [sec]	č. 1	223	259	269	-	1362	915
	č. 2	137	127	135	-	226	215
	č. 4	244	254	259	-	1377	893

Tabulka 6: Provoz s vkládanou špičkou, odbavení jen na předním místě

Hodnoty v tabulce 6 jsou uvedeny pouze pro úplnost srovnání s předchozími případy (zejména s tab. 5). V souladu s očekáváním jsou výrazně horší proti verzi s odbavováním cestujících na obou místech (tab. 5), zejména pak pro delší dobu odbavování cestujících. Pro případ s dobou odbavení 60 sec a $\sigma = 0$, nedošlo pro zvolené parametry ke stacionárnímu stavu (zřejmě vlivem souběhu „hustých“ deterministických proudů tramvají s deterministickými cykly světla na křižovatkách), vlivy jednotlivých špiček se stále kumulovaly a fronty na vstupu modelovaného dopravního systému neomezeně narůstaly.

5. Závěr

Ve výzkumné zprávě je prezentována metodika konstrukce modelu dopravního systému vycházející z abstraktního konceptu *stavového stroje* jakožto základního typu prvků modelu. Postup konstrukce modelu je demonstrován simulační studií reálné dopravní situace (resp. na návrhu její změny) ve městě Plzni dle zadání a údajů poskytnutých společností Plzeňský holding a.s.

Z výsledků realizované simulační studie vyplývá, že pro zadané okolnosti provozu navrhované zastávky Sady pětatřicátníků, tj. zhruba:

- hustota provozu jako v současné ranní špičce,
- cykl světel dle současného stavu,
- odbavování cestujících na obou místech navrhované zastávky,
- se střední doba odbavení cestujících cca 60 sec,

by docházelo ve špičce k neakceptovatelnému zdržení (cca 10 min) tramvají číslo 1 a 4 přijíždějících ze směru Lochotín (viz hodnoty v tab.5).

Vytvořený simulační program (resp. sada programů pro jednotlivé uvažované situace) poměrně přesně modeluje časové poměry průjezdu tramvají uvažovaným dopravním uzlem pro relativně dlouhou dobu (čili nepřesnost statistiky lze považovat za zanedbatelnou). Autorovi známé nepřesnosti modelu vedou spíše k "horším" výsledkům, čili vypočtené odhady jsou spíše trochu pesimistické. Rovněž není vyloučeno, že odhad střední doby odbavení tramvaje v zastávce (60 sec) je též spíše pesimistický (přičemž citlivost výsledků na tuto hodnotu je značná - viz tab.5, hodnoty pro dobu odbavení 30 sec).

Na druhé straně je ale pravděpodobně použitý model optimistický v tom, že neuvažuje zvýšený provoz chodců na přechodech pro chodce (cestující vystupující a nastupující do tramvají) a z toho vyplývající přídatné zdržení v zastávce. Rovněž nejsou uvažovány žádné "rezervy průchodnosti" např. pro budoucí linky příměstské dopravy procházející uvažovaným dopravním uzlem.

Vzhledem k tomu, že autorovi známé okolnosti ovlivňující přesnost uvedených výsledků se (na základě intuitivního posouzení) zhruba kompenzují, lze považovat tyto výsledky za poměrně věrohodné (či spíše optimistické), takže na jejich základě nelze zřízení nové zastávky dle zadavatelem prezentovaného návrhu doporučit.

Vytvořený simulační model je objektivě orientovaný, takže je (do určité míry) možná jeho relativně jednoduchá modifikace. Rovněž použité simulační prostředí C-Sim (vytvořené na KIV/ZČU, viz <http://www.c-sim.zcu.cz>) je dostatečně flexibilní, takže v případě potřeby je možné přepočítat hodnoty výše uvedených (či jiných zadaných) ukazatelů pro změněné okolnosti průjezdu tramvají navrhovanou zastávkou.

Rovněž prezentovaný obecný postup konstrukce simulačního modelu dopravního uzlu s využitím stavového stroje jako základní abstrakce modelu a simulátoru C-Sim jako implementačního prostředku se jeví jako dosti univerzální a efektivní.

Literatura

[Csim] <http://www.c-sim.zcu.cz>

[Sch90] Schneider, F.B.: The State Machine Approach - A tutorial, Fault-Tolerant Distributed Computing, Lecture Notes in Computer Science, no. 448, Springer 1990, pp. 299.

Poznámka

Práce byla podporována společností Plzeňský holding a.s.

Teoretická složka práce (vývoj metod simulace distribuovaných systémů a nástrojů pro specializované úlohy z oblasti diskrétní simulace) byla podporována MŠMT ČR v rámci výzkumného záměru Informační systémy a technologie (ident. kód MSM 235200005).