

STUDIE VYUŽITÍ SIMULAČNÍHO SOFTWARE WITNESS PŘI NÁVRHU SIGNÁLNÍHO PLÁNU SVĚTELNĚ ŘÍZENÉ KŘÍŽOVATKY

STUDY OF SIMULATION SOFTWARE WITNESS APPLICATION FOR LIGHT CONTROLLED INTERSECTION CONTROL PLAN PROPOSAL

Michal Dorda¹

Anotace: Článek se zabývá možnostmi využití simulačního software Witness při návrhu pevného signálního plánu. Byl vytvořen simulační model fiktivní křižovatky a s použitím nástavby Witness Optimizer byly provedeny optimalizační experimenty, jejichž výstupy jsou údaje potřebné pro sestavu pevného signálního plánu. Výsledky dosažené simulací jsou konfrontovány s výsledky dosaženými řešením příslušného matematického modelu.

Klíčová slova: Světelně řízená křižovatka, signální plán, simulace, Witness

Summary: The paper is focused on possibility of simulation software Witness application for control plan proposal. A simulation model of fictive intersection was created and optimization experiments by using Witness Optimizer were executed. By simulation experiments data needed for control plan proposal were obtained. Outcomes gained by simulation were confronted with outcomes reached by appropriate mathematical model solution.

Key words: Signalized Intersection, Control Plan, Simulation, Witness

1. ÚVOD

Navrhování signálních plánů světelně řízené křižovatky patří k základním problémům vyskytujícím se v dopravně-inženýrské praxi. K návrhu signálního plánu lze přistupovat více možnými způsoby. V dopravní praxi jsou zpravidla užívány metody návrhu popsané v TP 81 – Zásady pro navrhování světelných signalizačních zařízení na pozemních komunikacích [1].

Návrh signálního plánu lze rovněž řešit pomocí lineárního programování. V publikaci [2] jsou popsány 2 varianty matematického modelu umožňující řešiteli získat potřebná data pro návrh signálního plánu. Je vhodné zmínit, že tato metoda je optimalizační, výsledkem je tedy optimální řešení vzhledem k daným vstupním údajům a zvolenému optimalizačnímu kritériu. V první variantě modelu se při zvolené délce cyklu maximalizuje minimální poměrná rezervu mezi nabízenou a průměrně požadovanou dobou zelené, ve druhé variantě se při zvolené hodnotě výše zmíněné rezervy minimalizuje délka cyklu.

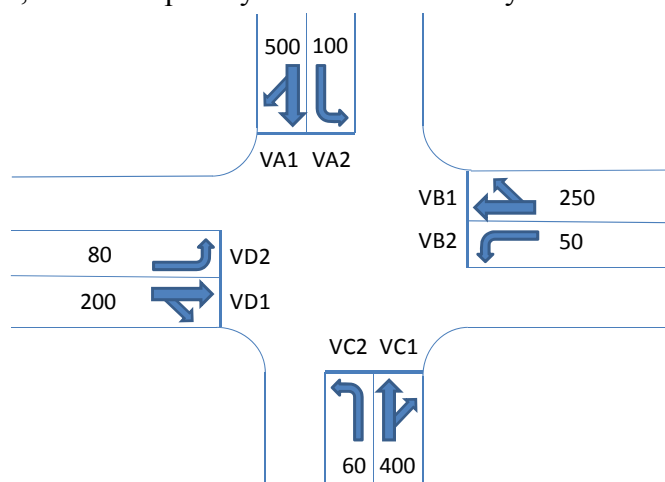
¹ Ing. Michal Dorda, Ph.D., VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava – Poruba, Tel.: +420 597 325 754, E-mail: michal.dorda@vsb.cz

S rozvojem počítačové techniky vstupuje do popředí simulace jakožto účinná metoda řešení mnoha problémů a to nejen z dopravní praxe. Pro potřeby návrhu signálních plánů světelně řízených křižovatek existuje v dnešní době celá řada specializovaných software, zmiňme např. software LISA+. Obecnou nevýhodu těchto specializovaných software lze ovšem spatřovat v poměrně úzké oblasti jejich použití.

Simulační software Witness, jehož možnosti využití při návrhu signálních plánů světelně řízené křižovatky budou v předkládaném článku demonstrovány, je určen pro simulaci a optimalizaci výrobních, obslužných a logistických systémů. Uvedený software má tedy mnohem širší možnosti použití oproti simulačním programům specializovaných na návrh signálních plánů. Cílem článku je ověřit a na konkrétním příkladě demonstrovat možnost využití software Witness právě pro návrh pevného signálního plánu světelně řízené křižovatky. V současné době se již sice zpravidla používá dynamické řízení, nicméně pevné signální plány slouží jako podklad pro návrh dynamického řízení.

2. POPIS ŘEŠENÉ KŘÍŽOVATKY

Problematika bude studována na fiktivní křižovatce, jejíž schéma je uvedeno na obrázku 1. Jedná se o úrovnňovou, čtyřramennou průsečnou křižovatku. Do křižovatky vstupuje celkem 8 vozidlových proudů, chodecké proudy nebudou uvažovány.



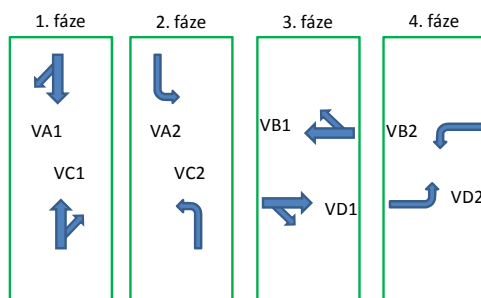
Zdroj: Autor

Obr. 1 – Schéma řešené křižovatky

Dále jsou známy špičkové hodinové intenzity jednotlivých proudů v [j.v./h], při simulaci bude tedy pracováno s homogenními dopravními proudy; intenzity jednotlivých proudů jsou rovněž uvedeny na obrázku 1. V rámci zjednodušení bude mezi jednotlivými kolizními proudy uvažována konstantní hodnota mezičasu 5 s (Witness samozřejmě umožňuje použít i rozdílné hodnoty mezičasů pro jednotlivé kolizní proudy).

Pro potřeby tvorby simulačního modelu je nutno vytvořit fázové schéma, kde fází dle [1] rozumíme časový interval, v němž mají současně volno zpravidla vzájemně nekolizní dopravní pohyby na řešené křižovatce. V tomto případě bylo vybráno čtyřfázové schéma, aby bylo zajištěno dokonale bezkolizní řízení všech dopravních proudů vstupujících do křižovatky. Při přiřazování dopravních proudů jednotlivým fázím bylo rovněž přihlédnuto

k hodinovým intenzitám jednotlivých proudů. Výsledné fázové schéma je znázorněno na obrázku 2.



Zdroj: Autor

Obr. 2 – Fázové schéma řešení křižovatky

3. POPIS VYTVOŘENÉHO SIMULAČNÍHO MODELU

Simulační model vytvořený v programovém prostředí Witness je relativně jednoduchý. Vozidla přijíždějící ke křižovatce jsou modelována pomocí prvku „Part“. Jelikož je nutno odlišit vozidla v jednotlivých proudech, bylo těchto prvků vytvořeno celkem 8, jejich pojmenování odpovídá označení příslušného proudu. Je uvažováno, že vozidla přijíždějí ke křižovatce jednotlivě, příjezd prvního vozidla v každém proudu nastane v čase 0. Hodinové intenzity jednotlivých proudů jsou uloženy v pomocné proměnné *Hodinove_intenzity*, jejíž kvantita činí 8 a odpovídá tedy počtu vozidlových proudů. Jelikož jsou známy pouze špičkové hodinové intenzity, je uvažován rovnoměrný proud vozidel (mezery mezi příjezdy vozidel ke křižovatce jsou pro jednotlivé proudy konstantami), mohou být na základě znalosti hodinových intenzit při inicializaci modelu na začátku simulace vypočítány hodnoty mezer mezi příjezdy vozidel; hodnoty těchto mezer jsou následně uloženy v proměnné *Stredni_mezery_vozidla* s kvantitou 8.

Fronta čekajících vozidel je modelována pro každý proud pomocí prvku „Buffer“, pojmenování příslušné fronty je tvořeno z označení příslušného proudu vozidel a přídomku *_fronta* (např. fronta vozidel proudu VA1 je pojmenována jako *VA1_fronta*). Kapacita fronty je nastavena na dostatečně velkou hodnotu (1000 vozidel), aby nedocházelo k odmítání vozidel na vstupu do modelu a nedošlo ke zkreslení dosažených výsledků.

Vjezd vozidel v jednotlivých proudech do křižovatky je modelován pomocí prvku „Machine“, pojmenování je opět tvořeno z označení příslušného proudu a z přídomku *_vjezd* (např. vjezd vozidel v proudu VA1 je pojmenován jako *VA1_vjezd*). Operační čas (doba průjezdu jednoho vozidla) je nastaven na hodnotu 2 s, což odpovídá průměrnému vstupnímu času vozidla do křižovatky (s touto hodnotou pracuje i matematický model). Po ukončení obsluhy příslušným strojem (tedy vjezdem do křižovatky) je předpokládáno, že vozidlo bez problému opustí křižovatku, příslušné vozidlo je odesláno ven z modelu.

Vjezd vozidel v příslušném proudu je povolen pouze během signálu povolujícího jízdu. Toto je realizováno pomocí vstupního pravidla u příslušného stroje. Na ukázkou vstupní pravidlo pro stroj *VA1_vjezd* je ve tvaru:

```
IF Aktualni_doba_cyklu >= Zacatky_zelenych (1) AND Aktualni_doba_cyklu <=
Zacatky_zelenych (1) + Doby_zelenych (1)
    PULL from VA1 out of VA1_fronta
ELSE
    Wait
ENDIF
```

Ve výše uvedeném zápise se objevují další pomocné proměnné. Pomocná proměnná pojmenovaná jako *Aktualni_doba_cyklu* vyjadřuje, v kolikáté sekundě cyklu se simulační model právě nachází. Jakmile dosáhne proměnná *Aktualni_doba_cyklu* hodnoty cyklu (délka cyklu je uložena v proměnné *Delka_cyklu*; způsob, jakým je délka cyklu stanovena, je popsán dále v textu), je její hodnota vynulována. Toto je realizováno pomocí pomocného prvku „Machine“ pojmenovaném *Cyklovani*. V pomocné proměnné *Zacatky_zelenych* (kvantita této proměnné je rovna počtu jednotlivých proudů, tedy 8) jsou uloženy začátky zelených pro jednotlivé proudy, v pomocné proměnné *Doby_zelenych* s kvantitou 8 jsou uloženy doby trvání zelených pro jednotlivé proudy. V proměnné *Mezicas* je uložena hodnota mezičasu mezi vzájemně kolizními proudy (jak již bylo dříve v textu uvedeno, je pro všechny vzájemně kolizní proudy uvažována jednotná hodnota mezičasu a to 5 s).

Simulační model byl navržen tak, aby se při následné optimalizaci měnily délky zelených. Na základě znalosti příslušných dob trvání zelených jsou při inicializaci modelu stanoveny příslušné začátky zelených a doba cyklu podle vztahů:

$$\text{Zacatky_zelenych (1)} = 0$$

$$\text{Zacatky_zelenych (5)} = 0$$

$$\text{Zacatky_zelenych (2)} = \text{Doby_zelenych (5)} + \text{Mezicas}$$

$$\text{Zacatky_zelenych (6)} = \text{Doby_zelenych (1)} + \text{Mezicas}$$

$$\text{Zacatky_zelenych (3)} = \text{MAX (Zacatky_zelenych (2) + Doby_zelenych (2), Zacatky_zelenych (6) + Doby_zelenych (6))} + \text{Mezicas}$$

$$\text{Zacatky_zelenych (7)} = \text{MAX (Zacatky_zelenych (2) + Doby_zelenych (2), Zacatky_zelenych (6) + Doby_zelenych (6))} + \text{Mezicas}$$

$$\text{Zacatky_zelenych (4)} = \text{Zacatky_zelenych (7)} + \text{Doby_zelenych (7)} + \text{Mezicas}$$

$$\text{Zacatky_zelenych (8)} = \text{Zacatky_zelenych (3)} + \text{Doby_zelenych (3)} + \text{Mezicas}$$

$$\text{Delka_cyklu} = \text{MAX (Zacatky_zelenych (4) + Doby_zelenych (4), Zacatky_zelenych (8) + Doby_zelenych (8))} + \text{Mezicas}$$

Je zřejmé, že součet příslušné hodnoty začátku zelené a doby trvání zelené vyjadřuje konec zelené pro daný proud.

Sledované simulační výstupy se ukládají do tří proměnných. Do první proměnné pojmenované *Prumerne_zdrzeni* se ukládá průměrné zdržení vozidel čekáním ve frontě před křižovatkou, proměnná má kvantitu 9, neboť do proměnné se ukládá jednak zdržení pro jednotlivé proudy a jednak výsledné průměrné zdržení. Do druhé proměnné *Prumerna_delka_fronty* s kvantitou 9 se ukládá průměrná délka fronty čekajících vozidel v jednotlivých proudech a výsledná průměrná délka fronty. Do poslední proměnné *Pomerna_rezerva* s kvantitou 9 se ukládají jednak poměrné rezervy pro jednotlivé proudy

$$OK_1 = \frac{\sum_{i=1}^8 \text{Prumerne_zdrzeni}(i)}{8} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Jelikož OK_1 je aritmetickým průměrem všech průměrných zdržení pro jednotlivé proudy, může se stát, že takto definované optimalizační kritérium při optimalizaci způsobí, že hodnota průměrného zdržení vozidel pro některý proud bude velká vzhledem k vypočítanému průměru a zbývající hodnoty průměrných zdržení budou nízké. Pokusme se tedy optimalizační kritérium založené na průměrných zdrženích definovat tak, abychom neminimalizovali celkové průměrné zdržení, ale aby se minimalizovalo maximální dílčí průměrné zdržení. Druhé optimalizační kritérium můžeme tedy matematicky zapsat ve tvaru:

$$OK_2 = \max_i \{\text{Prumerne_zdrzeni}(i)\} \rightarrow \min. \quad (2)$$

Varianty optimalizačního kritéria OK_1 a OK_2 se vztahují k době čekání vozidel. V některých případech může být ale vhodnější nepracovat s průměrnou dobou čekání, ale s délkou fronty čekajících vozidel pro jednotlivé proudy. V tomto případě lze využít funkci APARTS stanovující průměrný počet součástí (v našem případě vozidel) v zásobnících, které představují jednotlivé fronty čekajících vozidel. Zápis této funkce pro proud VA1 vypadá konkrétně:

$\text{Prumerna_delka_fronty}(1) = \text{APARTS}(VA1_fronta)$.

Potom můžeme definovat třetí optimalizační kritérium – celková průměrná délka fronty stanovená jako aritmetický průměr všech dílčích průměrných délek front, jejíž hodnotu budeme minimalizovat:

$$OK_3 = \frac{\sum_{i=1}^8 \text{Prumerna_delka_fronty}(i)}{8} \rightarrow \min, \quad (3)$$

a čtvrté optimalizační kritérium – maximální dílčí průměrná délka fronty, jejíž hodnotu budeme minimalizovat:

$$OK_4 = \max_i \{\text{Prumerna_delka_fronty}(i)\} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Jako další optimalizační kritérium je možno uvažovat propustnost křižovatky. Propustností křižovatky budeme uvažovat počet vozidel, které opustí křižovatkou za danou časovou jednotku; v tomto případě lze použít funkci NPARTS, která stanoví počet součástí (tedy vozidel) odeslaných z modelu. Matematicky lze optimalizační kritérium vyjádřit:

$$OK_5 = \sum_{i \in P} NPARTS(i) \rightarrow \max, \text{ kde } P \in \{VA1, VA2, VB1, VB2, VC1, VC2, VD1, VD2\}. \quad (5)$$

Jako další optimalizační kritérium lze uvažovat minimální poměrnou rezervu, jež je optimalizačním kritériem i v případě již zmíněného matematického modelu. Poměrnou

rezervu mezi nabízenou dobou zelené a průměrně požadovanou dobou zelené pro i -tý proud stanovíme na základě vztahu:

$$\text{Pomerna_rezerva}(i) = \frac{3600 \cdot \text{Doby_zelenych}(i)}{2 \cdot \text{Hodinove_intenzity}(i) \cdot \text{Delka_cyklu}} \quad (6)$$

Optimalizační kritérium potom můžeme zapsat ve tvaru:

$$OK_6 = \min_i \{ \text{Pomerna_rezerva}(i) \} \rightarrow \max \quad (7)$$

V experimentální části bude použito poslední optimalizační kritérium, aby bylo možno porovnat výsledky dosažené simulací s výsledky získanými řešením odpovídajícího matematického modelu.

4. SIMULAČNÍ EXPERIMENTY A JEJICH VYHODNOCENÍ

Cílem experimentů bude navrhnout doby trvání zelených pro jednotlivé proudy tak, aby se maximalizovala minimální poměrná rezerva mezi nabízenou a průměrně požadovanou délkou zelené. Simulační čas omezme na 60 min. Při optimalizaci bude použita nástavba software Witness – Witness Optimizer, která nabízí několik algoritmů pro vyhledání optimálního řešení, nicméně s výjimkou jednoho, který prohledává celou množinu přípustných řešení, není u těchto algoritmů zaručeno vyhledání globálního extrému. Více o jednotlivých algoritmech prohledávání množiny přípustných řešení včetně studie jejich úspěšnosti při hledání globálního extrému lze nalézt v článku [3].

Proměnnými při optimalizaci budou délky zelených (tedy Doby_zelenych), přičemž bude uvažováno pouze s celočíselným řešením, minimální doba zelené je dle [1] 5 s a maximální doba zelené bude uvažována 40 s. Dále uvažujme omezení délkou cyklu, kdy budeme uvažovat maximální hodnotu délky cyklu 90 s. Witness Optimizer umožňuje zadat omezující podmínky pouze ve formě lineárních rovnic, resp. nerovnic, jejichž proměnnými jsou optimalizační proměnné. Z tohoto důvodu musíme délku cyklu shora omezit podmínkou, k níž se dopravujeme následující úvahou. Uvažujeme čtyřfázové řízení s maximální délkou cyklu 90 s. Odečteme-li od délky cyklu hodnoty mezičasů (4 mezičasy, každý o velikosti 5 s), dostaneme hodnotu 70 s. Jelikož v každé fázi jsou zahrnuty právě dva vozidlové proudy, dostáváme podmínku pro součet všech délek zelených ve tvaru:

$$\sum_{i=1}^8 \text{Doby_zelenych}(i) \leq 140 \text{ [s]} \quad (8)$$

Prohledat celou množinu přípustných řešení (počet celočíselných přípustných řešení je v řádu 10^9) není v reálném čase možné, proto bude při optimalizaci použita jedna z vestavěných metaheuristik – Adaptive Thermostatistical Simulated Annealing.

Tab. 1 – Výsledky provedených experimentů

Experiment	Maximum Evaluations ¹	Maximum Moves Without Improvement ²	Dosažená hodnota optimalizačního kritéria [-]	Doba trvání optimalizace [min:s]
1	1 000	200	1,44	3:22
2	2 500	500	1,525	3:55
3	5 000	1 000	1,525	5:56
4	10 000	2 000	1,525	7:45
5	25 000	5 000	1,525	9:06

pozn. ¹Nastavení optimalizačního algoritmu udávající maximální počet provedených simulačních běhů s různými nastavením vstupních proměnných.

²Nastavení optimalizačního algoritmu udávající maximální počet provedených simulačních běhů bez zlepšení hodnoty účelové funkce.

Zdroj: Autor

Jak je z tabulky 1 patrné, při prvním experimentu bylo docíleno hodnoty optimalizačního kritéria (tedy minimální poměrné rezervy) 1,44, při ostatních experimentech hodnoty 1,525. Je tedy zřejmé, že v prvním případě určitě nedošlo k nalezení optimálního řešení, nabízí se ovšem otázka, zda řešení s hodnotou optimalizačního kritéria 1,525 optimálním je (jak již bylo zmíněno, použitý algoritmus nezaručuje nalezení optimálního řešení). Podívejme se tedy na dosažené výsledky podrobněji. V tabulce 2 jsou uvedeny údaje potřebné pro sestavu signálního plánu (začátky, konce a doby zelených pro jednotlivé proudy) získané jednotlivými experimenty. Je vhodné uvést, že v průběhu každého experimentu bylo nalezeno více řešení se stejnou hodnotou optimalizačního kritéria, v tabulce 2 je uvedeno pouze jedno vybrané. Dále je třeba zmínit, že polohy některých konců zelených je možno ještě posunout, ovšem bez vlivu na hodnotu účelové funkce.

Tab. 2 – Výsledky provedených experimentů – začátky, konce a doby zelených

	Experiment 1			Experiment 2			Experiment 3		
	ZZ [s]	KZ [s]	DZ [s]	ZZ [s]	KZ [s]	DZ [s]	ZZ [s]	KZ [s]	DZ [s]
VA1	0	30	30	0	36	36	0	36	36
VC1	0	24	24	0	31	31	0	29	29
VA2	29	37	8	36	46	10	34	46	12
VC2	35	40	5	41	46	5	41	46	5
VB1	45	60	15	51	69	18	51	69	18
VD1	45	60	15	51	68	17	51	68	17
VB2	65	70	5	73	80	7	73	80	7
VD2	65	70	5	74	80	6	74	80	6
Délka cyklu [s]	75			85			85		
	Experiment 4			Experiment 5					
	ZZ [s]	KZ [s]	DZ [s]	ZZ [s]	KZ [s]	DZ [s]			
VA1	0	36	36	0	36	36			
VC1	0	29	29	0	29	29			
VA2	34	43	9	34	46	12			
VC2	41	46	5	41	46	5			
VB1	51	69	18	51	69	18			
VD1	51	68	17	51	68	17			
VB2	73	78	5	73	78	5			
VD2	74	80	6	74	80	6			
Délka cyklu [s]	85			85					

pozn. ZZ – začátek zelené, KZ – konec zelené, DZ – délka zelené

Zdroj: Autor

V tabulce 3 jsou uvedeny hodnoty optimalizačního kritéria (minimální poměrné rezervy) získané řešením odpovídajícího matematického modelu pro celočíselné délky cyklu 71 s – 90 s.

Tab. 3 – Hodnoty minimální poměrné rezervy získané řešením matematického modelu

Délka cyklu [s]	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Hodnota OK [-]	1,369	1,400	1,381	1,411	1,440	1,421	1,449	1,442	1,458	1,440
Délka cyklu [s]	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Hodnota OK [-]	1,467	1,493	1,475	1,500	1,525	1,507	1,531	1,534	1,537	1,520

Zdroj: Autor

Jak je z tabulky 3 patrné, nejvyšší hodnoty minimální poměrné rezervy je dosaženo při délce cyklu 89 s a to 1,537. Nejvyšší hodnota minimální poměrné rezervy dosažené simulací je rovna 1,525 (což představuje rozdíl přibližně 0,78% vzhledem ke globálnímu extrému), vidíme tedy, že simulací nebyl dosažen globální extrém, tedy optimální řešení. Můžeme ale konstatovat, že jak pro délku cyklu 75 s (experiment 1), tak pro délku cyklu 85 s (experimenty 2 – 5) byla nalezena optimální řešení pro danou hodnotu délky cyklu.

5. ZÁVĚR

V článku byla demonstrována možnost použití simulačního software Witness při návrhu pevného signálního plánu světelně řízené křižovatky. Pro fiktivní křižovatku byl vytvořen simulační model, se kterým bylo dále experimentováno. V článku jsou uvedena některá optimalizační kritéria, která lze při následné optimalizaci použít. V rámci provedených experimentů byla jako optimalizační kritérium vybrána minimální poměrná rezerva, aby bylo možno srovnat výsledky dosažené simulačními experimenty s výsledky získanými řešením příslušného matematického modelu.

Z hlediska dalšího rozvoje studované problematiky je třeba hlavně zmínit možnost přechodu z deterministického modelu na model stochastický; při simulaci tedy nemusí být např. pracováno s předpokladem rovnoměrného příjezdu vozidel ke křižovatce. Dále se nabízí zapracovat do simulačního modelu dynamiku vozidel a porovnat dosažené výsledky s původním modelem, ve kterém je pracováno s průměrným vstupním časem 2 s.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] TP 81 – Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu. Brno: Centrum dopravního výzkumu, 1996, 111 s. ISBN 80-902141-2-6.
- [2] ČERNÝ, J. – KLUVÁNEK, P. *Základy matematické teorie dopravy*. Bratislava: VEDA, 1990, 279 s. ISBN 80-224-0099-8.
- [3] VAŽAN, P. – PAULÍČEK, R. Hodnotenie algoritmov simulačnej optimalizácie vo Witness. In *Sborník příspěvků mezinárodní konference Witness 2010*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010, 93 s. ISBN 978-80-214-4107-1.