ZKUŠENOSTI S NAVRHOVÁNÍM SIGNÁLNÍCH PLÁNŮ KŘIŽOVATEK METODAMI LINEÁRNÍHO PROGRAMOVÁNÍ V PODMÍNKÁCH SLOŽITÝCH KŘIŽOVATEK

EXPERIENCE IN DESIGNING SIGNAL PLANS FOR INTERSECTIONS USING LINEAR PROGRAMMING METHODS IN THE DIFFICULT INTERSECTIONS CONDITIONS

Lukáš Krejčí[1]

Anotace: Předložený text se zabývá porovnáním výsledků a tedy využitelnosti metod lineárního programování pro návrh signálních plánů světelně řízených křižovatek. Využitelnost je posuzována pomocí výpočetních experimentů v podmínkách křižovatky většího rozsahu. Posuzovány jsou dva přístupy - dekompoziční a exaktní. Exaktní přístup dosáhnul ve většině případů lepších výsledků, přičemž není tolik časově náročný na přípravu dat. Jeho nevýhodou jsou však vysoké požadavky na výpočetní techniku z hlediska výkonu, což se promítá i do ekonomické stránky řešení.

Klíčová slova: metody lineárního programování; signální plán; dekompoziční přístup, exaktní přístup; porovnání

Summary: The submitted text deals with the comparison of results and usability of linear programming methods aimed at designing the signal plans of traffic light controlled intersections. The usability is being assessed via computational experiments in circumstances of a larger-scale intersection. Decomposition approach and exact approach were assessed. In most cases, the exact approach showed better results; in the process, it is not so time-demanding for preparation of data as well. However, its disadvantage is high computer technology performance requirements which projects also to the economical point of view.

Key words: linear programming method; signal plan; decomposition approach; exact approach; comparison

ÚVOD

Jedním z významných faktorů omezujících kapacitu silniční infrastruktury jsou místa vzájemné interakce dopravních proudů, tj. křižovatky. Velmi rozšířenou variantou organizace dopravy na křižovatkách je organizace dopravy založená na světelném řízení. V takových případech je kapacita křižovatek silně ovlivněna kvalitou navrženého signálního plánu. Každá světelně řízená křižovatka má sestaven pevný signální plán, a to i v případech, je-li řízena dynamicky. Pevné signální plány jsou v dnešní době tvořeny na základě technických

[1] Ing. Lukáš Krejčí, VŠB - TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, Tel.: +420597323511, E-mail: lukas.krejci.st3@vsb.cz

podmínek Ministerstva dopravy ČR č. TP 81 „Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu" (6), a to metodami saturovaného toku, metodou spotřeby času nebo iterační metodou. Jistou alternativu k výše uvedeným metodám nabízí buď simulační metody, nebo obor operační výzkum, kde v odvětví lineárního programování existují modely, resp. ucelené postupy pro tvorbu signálních plánů.

Odborná literatura v případě metod založených na lineárním programování uvádí dva přístupy - dekompoziční přístup (1) a exaktní přístup (4). Dekompoziční přístup může být založen jak na spojitém lineárním programování, tak i na smíšeném celočíselném lineárním programování, exaktní přístup je pak založen buď na celočíselném, nebo na smíšeném celočíselném lineárním programování.

Předložený text si klade za cíl porovnání obou uvedených přístupů založených na lineárním programování z hlediska dosažených výsledků i časové náročnosti řešení úlohy z pohledu řešitele v podmínkách dopravně náročné křižovatky. Konkrétně jde o křižovatku ulic 28. října, Mariánskohorská a Plzeňská v Ostravě, která patří k nejsložitějším z pohledu počtu dopravních proudů, ale současně také k nejzatíženějším na území města.

1. FORMULACE PROBLÉMU A ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA OBOU PŘÍSTUPŮ

Je dána řízená křižovatka pomocí světelně signalizačního zařízení, do které vstupují dopravní proudy drážních vozidel, silničních vozidel a chodců, které se před křižovatkou dělí do různých směrů, tj. dopravních proudů $P_1, P_2, \ldots, P_n$. Pro každý proud, který do křižovatky vstupuje, je známa jeho intenzita $q_1, q_2, \ldots, q_n$ [j.v. · hod^{-1}] a trasa v ploše dané křižovatky. Zkratka j.v. vyjadřuje jednotkové vozidlo. Pro každý proud je dála stanovena minimální doba zelené a doba, kterou potřebuje jednotkové vozidlo jedoucí v saturovaném proudu pro vstup do křižovatky.

Proudy, jejichž trasy se neprotínají, mohou vstupovat do křižovatky ve stejný okamžik tzv. nekolizní proudy. Proudy, jejichž trasy se vzájemně protínají, do křižovatky zpravidla vstupovat současně nesmějí. Jedná se o tzv. kolizní proudy, u nichž hrozí vzájemný střet vozidel nebo vozidla a chodce. Výjimku tvoří tzv. podmíněně kolizní proudy, což jsou proudy, jejichž trasy se sice vzájemně protínají, ale současně pro ně i při řízení světelným signalizačním zařízením platí příslušná pravidla provozu na pozemních komunikacích o přednosti v jízdě. Pro všechny dvojice vzájemně kolizních dopravních proudů je vypočten mezičas.

1.1 Dekompoziční přístup

Tento postup pro návrh signálních plánů křižovatek navrhnul tým výzkumníků Vysokého ústavu dopravního v Žilině pod vedením prof. RNDr. Jan Černý, DrSc., Dr.h.c. a přístup byl publikován např. v (1). Vzhledem k omezeným možnostem výpočetní techniky v době vzniku metody bylo nutné úlohu rozdělit na tři oddělené podúlohy.

V první podúloze je zapotřebí množinu proudů $P_1, P_2, \ldots, P_n$ vyskytujících se na řešené křižovatce pokrýt minimální soustavou maximálních podmnožin vzájemně nekolizních proudů, tzn. vytvořit fáze. Tato podúloha je řešena ve dvou krocích. V prvním kroku se na základě poznatků z teorie grafů vyhledá soustava všech maximálních podmnožin nekolizních proudů. V případě dopravně méně náročných křižovatek lze tuto úlohu vyřešit poměrně snadno, a to prohledáním grafu bezkoliznosti. V případě dopravně náročnějších křižovatek lze k řešení úlohy o vyhledání maximálních podmnožin nekolizních proudů použít účinný přístup založený na úloze o barvení grafu, jehož autorem je doc. RNDr. Štefan Peško, CSc., jak je uvedeno např. v (5). Úkolem druhého kroku je z vytvořené množiny vybrat minimální počet podmnožin, které představují výsledné fáze křižovatky. Při řešení úlohy je třeba dbát na fakt, aby každý dopravní proud vstupující do křižovatky byl obsažen alespoň v jedné z výsledných fází. K tomuto účelu byl sestaven jednoduchý model lineárního programování, viz např. (1).

Cílem druhé podúlohy je optimální seřazení vybraných fází. Optimalizačním kritériem je součet rozhodujících mezičasů mezi fázemi. Toto kritérium je potřeba minimalizovat, čímž se minimalizuje i součet neproduktivního času křižovatky. K vyřešení této podúlohy lze použít Littlův algoritmus pro vyhledání minimální Hamiltonovy kružnice v obyčejném digrafu. Výstupem této podúlohy je fixace pořadí fází.

Třetí podúloha stanovuje optimální časy začátků a konců zelených v průběhu cyklu pro všechny proudy s ohledem na jejich zafixované pořadí z předchozí podúlohy. Tento úkol je řešen pomocí modelu lineárního programování se zvoleným optimalizačním kritériem. Model obsahuje dvě základní skupiny proměnných, které mohou být jak nezáporné celočíselné, tak i z oboru nezáporných reálných hodnot. Tyto proměnné představují časy začátků a konců dob zelených pro jednotlivé proudy. Další proměnná reprezentuje optimalizovanou veličinu. Může jí být délka cyklu, nebo minimální poměrná. Je-li optimalizačním kritériem délka cyklu, v průběhu optimalizačního výpočtu se její hodnota minimalizuje. Rozhodujícím dopravním proudům ve fázích jsou zde přiřazeny pouze minimální doby zelených pro průjezd zadané intenzity vozidel (je-li hodnota výše uvedené poměrné rezervy rovna jedné). Je-li optimalizačním kritériem minimální poměrná rezerva při zvolené délce cyklu, potom se v průběhu optimalizačního výpočtu její hodnota maximalizuje. Minimální poměrná rezerva je hodnota minimálního poměru mezi nabízeným časem, v němž je umožněn vstup dopravního proudu do křižovatky, a požadovanou dobou pro tento proud (dále jen minimální poměrná rezerva).

Model řešený ve třetí podúloze je však natolik univerzální, že umožňuje zakomponovat i jiná optimalizační kritéria, např. součet délek čekajících vozidel v rámci jednoho cyklu, jehož hodnota se v průběhu optimalizačního výpočtu při zvolené délce cyklu minimalizuje. Model umožňuje i výpočet podle vhodně zvolené vícekriteriální účelové funkce.

1.2 Exaktní přístup

Tento přístup byl popsán v práci (4), která byla vedena prof. RNDr. Jaroslavem Janáčkem, CSc. Ve srovnání s předchozím přístupem probíhá řešení celé úlohy pouze v rámci jediného optimalizačního výpočtu – řešením modelu celočíselného, nebo smíšeného celočíselného lineárního programování, což je ovšem ve srovnání s předchozím přístupem výrazně složitější zejména po stránce konstrukce modelu.

Model obsahuje stejné proměnné jako v případě třetí podlohy u dekompozičního přístupu. Kromě nich jsou k vytvoření modelu zapotřebí ještě další dvě množiny bivalentních proměnných – vztahují se k pořadí začátků a konců dob zelených a pořadí začátků a konců mezičasů. I zde je možné použít v modelu různá optimalizační kritéria, a to při žádných nebo minimálních úpravách soustavy omezujících podmínek modelu.

Všechny uvedené modely zahrnuté pod exaktní přístup umožňují libovolnou polohu doby zelené i mezičasů v cyklu i na rozhraní dvou po sobě následujících cyklů. Tato skutečnost znamená, že optimální signální plán se vyskytuje v poměrně velkém počtu variant. Rozdíly mezi nimi spočívají pouze v umístění dob zelených na časové ose cyklu. Odlišnosti jednotlivých řešení nejenže nemají rozdílnou interpretaci, nijak ani nezmění hodnotu účelové funkce.

U modelů exaktního přístupu jsou očekávány delší výpočetní časy, proto je žádoucí zamezit uvedenému duplikování přípustných řešení a omezit tak prohledávanou množinu přípustných řešení. Tohoto požadavku lze docílit fixací polohy právě jednoho proudu, pomocí přednastavení hodnoty jedné proměnné modelující čas začátku nebo konce doby zelené.

Optimalizační výpočet u reálných úloh pomocí exaktního přístupu je však zpravidla možný až při použití dostatečně výkonné výpočetní techniky a s použitím dostatečně výkonných optimalizačních software.

2. ZHODNOCENÍ EXISTUJÍCÍCH PŘÍSTUPŮ ZALOŽENÝCH NA LINEÁRNÍCH MODELECH

Zhodnocení existujících přístupů bude provedeno ze dvou hledisek – z hlediska časové náročnosti řešení úlohy a z hlediska vhodnosti jednotlivých optimalizačních kritérií, která se v literatuře vyskytují.

Časová náročnost jednotlivých přístupů závisí na dvou hlavních faktorech – na časové náročnosti přípravy vstupních dat a časové náročnosti vlastního řešení sestavených modelů. V případě dekompozičního přístupu vyžadují všechny tři podúlohy rozsáhlou přípravu vstupních hodnot, která u složitých křižovatek může představovat značně časově náročnou práci řešitele, přičemž ani při velmi poctivém přístupu řešitele není vyloučeno, že se řešitel dopustí chyby, např. tím, že v první podúloze opomene zařadit některou výhodnou fázi (v grafu bezkoliznosti přehlédne některou výhodnou kliku). U první podúlohy vytváří největší časovou náročnost hledání všech klik grafu v grafu bezkoliznosti. Znatelně kratší, ale přesto náročné, je vyhledání rozhodujících mezičasů u druhé podúlohy. Ve třetí podúloze (to platí zejména v rozsáhlejších úlohách) představuje časovou zátěž především přepis podmínek zajišťujících dodržení mezičasů, nemá-li řešitel dostatek programátorských zkušeností.

Z hlediska dob potřebných k realizaci optimalizačního výpočtu se však dekompoziční přístup jeví jako výhodnější, protože časy potřebné pro řešení sestavených lineárních modelů jsou zanedbatelné. Všechny uvedené modely za použití běžně dostupné výpočetní techniky lze vypočítat pod 1 s.

Při hodnocení celkové doby řešení dekompozičního přístupu je tak nutno konstatovat, že optimální řešení u složitých křižovatek lze najít nejdříve po několika hodinách. Výhodou tohoto přístupu je naopak fakt, že veškerou časově náročnou práci je potřeba provést pouze jednou. V případech, kdy řešitel potřebuje zjistit hodnotu optimálních řešení pro různé hodnoty jiných parametrů (například pro rozdílnou délku cyklu), je toho dosaženo za několik málo sekund po nalezení prvního řešení.

Exaktní přístup se nedělí na žádné podúlohy. Funkci všech tří kroků dekompozičního přístupu obstará pouze jediný model. Cenou za tuto výhodu je však navýšení počtu proměnných modelu, a tedy i jeho výpočetní náročnosti. Modely nově obsahují výše charakterizované bivalentní proměnné, kterých je v součtu n^2+n, kde n je počet proudů křižovatky.

Řešitel je donucen pouze přepsat matematický model do výpočetního software a vložit do něj základní vstupní hodnoty potřebné pro návrh signálního plánu. Tento úkol lze při dobré znalosti programovacího jazyka uskutečnit za několik desítek minut. Dá se však očekávat, že výpočetní časy potřebné pro vyřešení matematických modelů exaktního přístupu budou několikanásobně vyšší než v případě dekompozičního přístupu. Tyto časy lze zkrátit použitím výkonnější výpočetní techniky, což však může být pro řešitele velmi nákladné řešení.

Z pohledu porovnání výhodnosti použitého optimalizačního kritéria lze dospět k několika závěrům. Výsledky získané řešením modelu minimalizujícího délku cyklu lze považovat pouze za informativní. Navržený signální plán nebude, především u nejzatíženějších proudů, obsahovat rezervy, což je pro reálné použití nevhodné. U modelu maximalizujícího minimální poměrnou rezervu lze očekávat, že jeho řešením bude navržen signální plán, který již pro všechny proudy rezervu obsahuje (pokud je rezerva v rámci stanovené délky cyklu možná). Nedostatkem tohoto modelu však může být fakt, že není nijak zabezpečeno, aby rezerva byla nastavena na nejvyšší možnou hodnotu u všech proudů.

Modelem minimalizujícím součet délek řad čekajících vozidel je již zabezpečeno rovnoměrnější rozdělení rezervy v závislosti na vstupní intenzitě dopravy proudů. V krajním případě však může dojít k navržení nižší minimální poměrné rezervy než u předchozího modelu. Za účelem sloučení výhod předchozích dvou modelů byl navržen model čtvrtý s vícekriteriální účelovou funkcí zohledňující obě kritéria (4).

3. CHARAKTERISTIKA VYBRANÉ KŘIŽOVATKY

Jak již bylo uvedeno v úvodu článku, pro účely výpočetních experimentů byla vybrána křižovatka ulic 28. října, Mariánskohorská a Plzeňská v Ostravě, která je jednou z nejzatíženějších a dopravně nejnáročnějších na území města.

Podle dopravních průzkumů pravidelně prováděných firmou Ostravské komunikace, a.s., celková intenzita dopravy na vybrané křižovatce v posledních čtyřech letech sice klesá v řádu jednotek procent, nicméně výsledky posledních měření z roku 2010 stále potvrzují vysokou průměrnou hodnotu zatížení - 53199 vozidel za 16 hodin (obvyklá doba sčítání dopravy v pracovním dni).

Složitost křižovatky po stránce dopravního uspořádání potvrzuje velké množství dopravních směrů. Ze čtyř ramen křižovatky tři obsahují tramvajové pásy, které tvoří dohromady šest různých dopravních proudů. Pomocí dalších osmi dopravních proudů je organizována individuální automobilová doprava. V poslední řadě situaci na křižovatce, resp. její řízení komplikuje i sedm chodeckých proudů.

Složitost i dopravní zatížení vybrané křižovatky popsané v předchozích odstavcích patří mezi hlavní důvody výběru právě této křižovatky, která přirozeně klade velký důraz na kvalitu signálních plánů, pomocí kterých je na ní řízena doprava.

4. VÝPOČETNÍ EXPERIMENTY

Výpočetní experimenty v podmínkách uvedené křižovatky probíhaly v několika krocích.

Před přikročením k výpočtům pomocí popisovaných přístupů bylo nutné zajistit vstupní údaje charakteristické pro konkrétní křižovatku. Byla pořízena kompletní tabulka mezičasů, situační schéma a hodnoty intenzity dopravy jednotkových vozidel.

U dekompozičního přístupu byly nejdříve provedeny první dvě podúlohy, jimiž se dospělo k seřazení čtyř vybraných fází, které obsahují každý dopravní proud minimálně jednou. V posledním kroku byl sepsán text programu pro software Xpress-IVE, kterým bylo možno vypočítat signální plán pomocí všech zmíněných modelů.

V případě exaktního přístupu byl pouze sepsán text programu pro software Xpress-IVE, který taktéž umožňoval výpočet podle všech zmíněných optimalizačních kritérii.

Ve všech případech bylo přistoupeno k výpočtu modelů pro proměnné představující začátky a konce dob zelených z oboru hodnot nezáporných reálných čísel i z oboru hodnot nezáporných celých čísel.

Před zahájením optimalizačního výpočtu u některých variant modelů musí řešitel zvolit délku cyklu nebo hodnotu minimální poměrné rezervy, pro kterou bude výpočet prováděn. Byla zvolena maximální možná doporučována délka cyklu lit. (6) o hodnotě 120 s a minimální poměrná rezerva o hodnotě 1,0.

5. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ REALIZOVANÝCH EXPERIMENTŮ

Následující podkapitoly vzájemně porovnávají výsledky dekompozičního a exaktního přístupu postupně pro všechna optimalizační kritéria.

5.1 Modely minimalizující délku cyklu

Hodnoty účelové funkce jsou ve shodě, oba přístupy dospěly ke stejné délce minimálního cyklu. Hodnoty jsou shrnuty v tab. 1.

Tab. 1 - Hodnota účelové funkce – minimální délka cyklu [s]

	Proměnné x_i a y_i z oboru hodnot nezáporných reálných čísel	Proměnné x_i a y_i z oboru hodnot nezáporných celých čísel
Dekompoziční přístup	80,821	85
Exaktní přístup	80,821	85

Zdroj: Autor

Model umožňující výpočet minimální délky cyklu v exaktním přístupu obsahuje prohibitivní konstantu K, kterou je v lit. (4) doporučeno volit větší, než je hodnota představující 1 hodinu, tedy 3600. Byla provedena série experimentů bez zafixování jednoho ze začátků dob zelených s různou hodnotou této konstanty včetně případů, kdy na rozdíl od doporučení uvedené literatury byla volena hodnota prohibitivní konstanty K nižší. Hodnota účelové funkce byla ve všech případech shodná, rozdíl byl však ve výpočetní době. Závislost výpočetního času na hodnotě konstanty *K* je možno dokumentovat údaji uvedenými v tab. 2.

Tab. 2 - Hodnota konstanty *K*

Hodnota konstanty *K*	Výpočetní čas [s]	
	Proměnné x_i a y_i z oboru hodnot nezáporných reálných čísel	Proměnné x_i a y_i z oboru hodnot nezáporných celých čísel
10^2	13,6	11,6
10^3	18,0	39,8
10^4	62,9	50,0
10^5	92,7	60,9

Zdroj: Autor

Na základě provedených experimentů se ukázalo, že se vzrůstající hodnotou prohibitivní konstanty se hodnota výpočetního času zvyšuje. Při provedených experimentech bylo nejnižších hodnot výpočetního času (jak při definované nezápornosti, tak i nezápornosti celočíselnosti proměnných modelujících začátky a konce dob zelených) dosaženo při hodnotě prohibitivní konstanty *K=100*, což nekoresponduje s doporučením lit. (4). Nelze však vyloučit, že u některých křižovatek, může být uvedené doporučení důvodné. Tato informace není však v práci (4) uvedena. Co se týče porovnání délek výpočetního času, při volbě různých definičních oborů výsledky provedených experimentů na základě výpisu hodnot z optimalizačního software paradoxně ukazují, že v podmínkách řešené křižovatky trvá výpočetní čas méně při volbě definičních oborů pro začátky a konce dob zelených z množiny celých nezáporných čísel.

Následně byly provedeny experimenty se zafixovanou polohou jednoho proudu. Výpočetní časy ve srovnání s údaji uvedenými v tab. 2 výrazně poklesly, viz tab. 3.

Tab. 3 - Hodnota konstanty *K*

Hodnota konstanty *K*	Výpočetní čas [s]	
	Proměnné x_i a y_i z oboru hodnot nezáporných reálných čísel	Proměnné x_i a y_i z oboru hodnot nezáporných celých čísel
10^2	2,2	1,2
10^5	2,4	4,0

Zdroj: Autor

Porovnání délek výpočetních časů u modelů s fixací začátku doby zelené jednoho proudu ukazuje odlišný závěr než v případě modelů bez fixace. Při volbě definičního oboru pro začátky a konce dob zelených z množiny celých nezáporných čísel mají hodnoty délky výpočetního času větší rozpětí. Kromě většího rozpětí dochází u nich také k tomu, že při nižší hodnotě prohibitivní konstanty činí doba výpočtu přibližně polovinu a u vyšší hodnoty prohibitivní konstanty je doba výpočtu přibližně dvojnásobně delší než v případě modelu s definičním oborem nezáporných čísel.

5.2 Modely maximalizující minimální poměrnou rezervu

Při těchto výpočtech nebylo různými přístupy dosaženo stejných výsledků, v obou případech byly na základě modelu exaktního přístupu vypočítány lepší hodnoty účelové funkce, viz. tab. 4.

Tab. 4 - Hodnota účelové funkce – minimální poměrná rezerva [-]

	Proměnné x_i a y_i z oboru hodnot nezáporných reálných čísel	Proměnné x_i a y_i z oboru hodnot nezáporných celých čísel
Dekompoziční přístup	1,06840	1,06195
Exaktní přístup	1,08856	1,07706

Zdroj: Autor

Výpočetní časy modelů exaktního přístupu bez fixace začátku doby zelené jednoho proudu se pohybovaly v jednotkách minut, přičemž výpočetní čas modelu s proměnnými z oboru hodnot nezáporných čísel byl kratší než dvě minuty a výpočetní čas modelu obsahujícího proměnné pouze z oboru nezáporných celých čísel trval cca šest minut. Při zavedení fixace začátku doby zelené jednoho proudu klesl výpočetní čas pod hranici dvou sekund.

5.3 Modely minimalizující součet délek řad čekajících vozidel

I v tomto případě modely vykazovaly rozdílné hodnoty účelové funkce. Zde se hodnota optimalizačního kritéria minimalizovala. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 - Hodnota účelové funkce – součet délek řad čekajících vozidel [j.v.]

	Proměnné x_i a y_i z oboru hodnot nezáporných reálných čísel	Proměnné x_i a y_i z oboru hodnot nezáporných celých čísel
Dekompoziční přístup	66,782	66,815
Exaktní přístup	64,333	64,459

Zdroj: Autor

Doba výpočetního času modelu exaktního přístupu bez fixace začátku doby zelené jednoho proudu s proměnnými z oboru hodnot nezáporných čísel trvala pod hranici půl minuty, při zavedení proměnných z oboru nezáporných celých čísel se doba výpočtu čtyřnásobně zvýšila. Doby výpočetních časů modelů s fixací začátku doby zelené jednoho proudu se pohybovaly okolo dvou sekund.

5.4 Modely s vícekriteriální optimalizovanou funkcí

Toto optimalizační kritérium bylo sestaveno ze dvou členů. Prvním členem je minimální poměrná rezerva, jejíž hodnota je K – násobně navýšena, čímž je umožněno při optimalizaci preferovat právě tento člen účelové funkce. Druhým členem je součet délek řad čekajících vozidel v rámci jednoho cyklu, která v průměru přijedou ke křižovatce v době červené.

V testovaných variantách bylo pomocí exaktního přístupu vždy dosaženo lepších výsledků, pro prezentaci je vybraná varianta, kdy $K=10^6$. Výsledky jsou shrnuty v tab. 6.

Tab. 6 – Výsledky testovaných variant

	Proměnné x_i a y_i z oboru hodnot nezáporných reálných čísel		Proměnné x_i a y_i z oboru hodnot nezáporných celých čísel	
	Dekompoziční přístup	Exaktní přístup	Dekompoziční přístup	Exaktní přístup
Hodnota účelové funkce [-]	$1{,}06834 \cdot 10^6$	$1{,}08854 \cdot 10^6$	$1{,}06188 \cdot 10^6$	$1{,}07703 \cdot 10^6$
Minimální poměrná rezerva [-]	1,0684	1,08856	1,06195	1,07706
Součet délek řad čekajících vozidel [j.v.]	66,959	26,511	66,967	26,488

Zdroj: Autor

Model exaktního přístupu bez fixace začátku doby zelené u jednoho proudu, jehož proměnné, představující začátky a konce dob zelených, byly z oboru hodnot nezáporných celých čísel, nedospěl ani v jednom případě za dobu 12 hodin výpočetního času k optimálnímu výsledku. V reálné době bylo optima dosaženo pouze u modelu se zafixovanou polohou začátku doby zelené u jednoho proudu.

Součástí výpočetních experimentů s modely obsahujícími víceúčelovou funkci byl i odhad vlivu hodnoty prohibitivní konstanty K na dobu výpočtu. Ukázalo se, že volba hodnoty prohibitivní konstanty neměla vliv na hodnoty členů účelové funkce. Rozdílný byl však výpočetní čas u modelu založeného na exaktním přístupu, jehož proměnné, představující začátky a konce dob zelených, byly z oboru hodnot nezáporných reálných čísel. Výsledky provedených experimentů jsou shrnuty v tab. 7.

Tab. 7 - Výsledky provedených experimentů

Hodnota konstanty K	Výpočetní čas modelu bez fixace [s]	Výpočetní čas modelu s fixací [s]
10^5	274,7	4,7
10^6	92,7	1,0
10^7	57,1	1,4
10^8	2,0	0,9
10^9	3,8	1,3
10^{10}	7,6	0,5

Zdroj: Autor

ZÁVĚR

Předložený text se věnuje testování uplatnitelnosti přístupů založených na metodách lineárního programování při sestavě signálních plánů v podmínkách složitých křižovatek. Prvním z nich je tzv. dekompoziční přístup, který rozkládá řešení úlohy do několika jednodušších podúloh. Druhým je pak tzv. exaktní přístup, při kterém jsou všechny dílčí podúlohy zakomponovány do jednoho matematického modelu.

V prvé řadě bylo zjišťováno, zda modely sestavené pro složité křižovatky budou vůbec řešitelné. Z uvedeného úhlu pohledu je možno konstatovat, že v případě složité křižovatky, do které vstupuje 21 dopravních proudů, jsou navržené modely aplikovatelné. Další postup řešení se soustředil na srovnání výsledků a výpočetní náročnosti experimentů při obou přístupech.

Srovnání exaktního a dekompozičního přístupu lze provést na více úrovních. První z nich je samozřejmě kvalita dosažených výsledků z pohledu zvolených optimalizačních kritérií. Z uvedeného pohledu jsou výsledky jednoznačné a potvrzují očekávání řešitele, v případě exaktního přístupu nebyly nikdy dosaženy horší výsledky, než v případě dekompozičního přístupu, v případě vyhledání minimální délky cyklu dosáhly oba přístupy stejných výsledků, v ostatních případech vykázal exaktní přístup lepší výsledky.

Jde-li o čas potřebný k jednomu výpočtu, tak v případě takto rozsáhlé křižovatky je jednoznačně méně náročný exaktní přístup. I přes snahu o nalezení efektivnějšího způsobu zpracování dat u dekompozičního přístupu, kterým bylo dosaženo nemalé úspory, vyžaduje celý postup stále několik hodin práce řešitele spojených zejména s přípravou vstupních dat. Na základě provedených experimentů bylo však ukázáno, že ve srovnání s exaktním přístupem jsou výpočetní časy při použití dekompozičního přístupu zanedbatelné.

Exaktní přístup nevyžaduje takovou práci řešitele z pohledu přípravy vstupních dat, celková doba řešení je limitována úkony spojenými s transformací modelu do optimalizačního software a jeho řešení. Tento čas je ovšem špatně odhadnutelný a jak se provedenými experimenty potvrdilo, ve srovnání s dekompozičním přístupem byl vyšší (v některých případech i znatelně vyšší). Závisí na rozsahu křižovatky, výkonu výpočetní techniky a bylo prokázáno, že závisí i na hodnotách některých prohibitivních konstant. Značnou úsporu času přináší fixace libovolné doby začátku nebo konce jednoho proudu, přičemž se neprokázal vliv na hodnotu optimalizačního kritéria.

Má-li řešitel potřebu výpočet opakovat třeba pro různé hodnoty délky cyklu, pak při dekompozičním přístupu nevzniká již téměř žádná další prodleva. Je potřeba zopakovat výpočet jen posledního modelu a ten obvykle trvá méně než jednu sekundu. Naopak opakovaný propočet exaktního přístupu vyžaduje v některých případech i několik minut v závislosti na rozsahu modelu a výkonu dostupné výpočetní techniky.

V předloženém textu bylo dosaženo několika závěrů. Na jejich základě je možné doporučit pro návrh signálních plánů v podmínkách složitějších křižovatek model exaktního přístupu s fixací libovolné doby začátku nebo konce jednoho proudu, a to za předpokladu, že je dostupná moderní výpočetní technika.

POUŽITÁ LITERATURA

(1) ČERNÝ, Jan; KLUVÁNEK, Pavol. *Základy matematickej teórie dopravy*. 1. vydání. Bratislava : Veda, 1991. 280 s. ISBN 80-224-0099-8.

(2) DANĚK, Jan; TEICHMANN, Dušan. *Optimalizace dopravních procesů*. 1. vydání. Ostrava : VŠB-Technická Univerzita Ostrava, 2005. 191 s. ISBN 80-248-0996-6.

(3) KREJČÍ, Lukáš. *Verifikace optimality stávajícího způsobu řízení vybrané světelně řízené křižovatky lineárním matematickým modelem*. Ostrava, 2009. 60 s. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.

(4) PECHTOR, Slávek. *Návrh signálneho plánu križovatky pomocou metód matematického programovania*. Žilina, 1998. 154 s. Diplomová práce. Žilinská Univerzita v Žilině.

(5) RUSEK, Michal. *Aplikace metod barvení grafů pro určení minimálního počtu fází světelně řízených křižovatek.* Perner´s Contacts [online]. 15.4.2011, roč. 6, č. 1, [cit. 2011-09-10]. Dostupný z WWW: <http://pernerscontacts.upce.cz/21_2011/Rusek.pdf>.

(6) Silniční vývoj spol. s.r.o. *Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu : technické podmínky*. 1. vydání. Brno : Centrum dopravního výzkumu Brno, 1996. 109 s. ISBN 80-902141-2-6.