



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Petra Staňková
**VERIFIKACE OPTIMALITY SIGNÁLNÍHO PLÁNU
KŘIŽOVATKY**

Bakalářská práce

2018

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K617 Ústav logistiky a managementu dopravy

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Petra Staňková

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – LOG – Logistika a řízení dopravních procesů

Název tématu (česky): **Verifikace optimality signálního plánu křižovatky**

Název tématu (anglicky): **Verification of Intersection Control Plan Optimality**

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Dopravně-inženýrská charakteristika zadané křižovatky z hlediska metody pro tvorbu signálního plánu použité v bakalářské práci
- Charakteristika použitého exaktního přístupu
- Vyhodnocení vstupních dat
- Návrh matematického modelu pro posuzovanou křižovatku
- Výpočetní experiment s navrženým modelem
- Zhodnocení dosažených řešení - porovnání se současným stavem






- Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Černá, A., Černý, J. Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech. Institut Jana Pernera, Praha, 2004
Volek, J. Teorie grafů - Aplikace v dopravě a veřejné správě. Univerzita Pardubice, Praha, 2012

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **30. června 2017**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **27. srpna 2018**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


.....
doc. Ing. Lukáš Týfa, Ph.D.
vedoucí
Ústavu logistiky a managementu dopravy



.....
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.


.....
Petra Staňková
jméno a podpis studenta

V Praze dne30. června 2017

Poděkování

Ráda bych zde poděkovala vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Dušanu Teichmannovi PhD. za odborné vedení a konzultování bakalářské práce a předání mnoha znalostí. Dále bych chtěla poděkovat panu Miloši Jansovi z firmy Miloš Jansa za poskytnutí podkladů k vypracování této práce a výjimečnou trpělivost, s jakou zodpovídal mé dotazy.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na
ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité
informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě
vysokoškolských závěrečných prací.“

„Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000
Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých
zákonů (autorský zákon).“

V Praze dne 4. července 2018

.....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

VERIFIKACE OPTIMALITY SIGNÁLNÍHO PLÁNU KŘIŽOVATKY

bakalářská práce

srpen 2018

Petra Staňková

ABSTRAKT

Předmětem bakalářské práce Verifikace optimality signálního plánu křižovatky je charakterizovat zadanou křižovatku z hlediska metod pro tvorbu signálního plánu, charakterizovat použitý exaktní přístup k návrhu signálního plánu, dále navrhnout matematický model zadané křižovatky, na jeho základu provést výpočetní experiment a porovnat dosažené řešení se stávajícím.

KLÍČOVÁ SLOVA

- signální plán, křižovatka, světelná signalizace, optimalizace, doprava

ABSTRACT

The subject of bachelor thesis „Verification of intersection control plan optimality“ is to characterize the crossroad using methods for creation of a traffic signal plan, define method which was used in creating new traffic signal plans, design mathematical model computing signal plan of the crossroad and made a computing experiment on his base and compare the calculated solution with the existing solution.

KEY WORDS

- traffic signal plan, crossroad, traffic lights, optimization, traffic

Obsah

| | |
|---|----|
| Obsah..... | 3 |
| Seznam použitých zkratk..... | 5 |
| 1 Úvod..... | 6 |
| 2 Charakteristika zadané křižovatky..... | 7 |
| 2.1 Vymezení řešeného území – okres Chrudim..... | 7 |
| 2.2 Napojení okresu Chrudim na dopravní síť..... | 8 |
| 3 Charakteristika použitého exaktního přístupu..... | 13 |
| 3.1 Princip algoritmu a optimalizační kritérium..... | 13 |
| 3.2 Vstupní údaje a užívané proměnné..... | 14 |
| 3.3 Obecný matematický model..... | 15 |
| 3.4 Přípravné kroky..... | 16 |
| 3.4.1. Graf bezkoliznosti..... | 16 |
| 3.4.2 Vytvoření soustavy fázových skupin..... | 17 |
| 3.4.3 Výběr minimálního počtu fázových skupin..... | 18 |
| 3.4.4. Optimalizace pořadí fázových skupin..... | 18 |
| 4 Příprava vstupních dat pro optimalizační výpočet – intenzity dopravy a mezičasy..... | 20 |
| 4.1 Proudění vstupující do křižovatky..... | 20 |
| 4.2 Intenzity proudů..... | 23 |
| 4.3 Tabulka mezičasů a vstupní doby jednotkových vozidel..... | 28 |
| 5 Příprava vstupních dat pro optimalizační výpočet – tvorba mezičasových podmínek | 30 |
| 5.1 Graf bezkoliznosti..... | 30 |
| 5.2 Množina fází..... | 31 |
| 5.3 Výběr minimálního počtu fází..... | 31 |
| 5.4 Určení pořadí fází a optimálního řešení..... | 35 |
| 6 Matematický model posuzované křižovatky a jeho řešení..... | 43 |
| 6.1 Kompletní matematický model..... | 43 |
| 6.2 Text programu v optimalizačním software Xpress-IVE..... | 45 |
| 6.3 Výpis výsledků optimalizačního výpočtu..... | 48 |
| 7 Závěr..... | 56 |
| 8 Seznam obrázků..... | 58 |
| 9 Seznam tabulek..... | 59 |

| | | |
|----|--------------------------------|----|
| 10 | Seznam příloh..... | 59 |
| 11 | Literatura..... | 60 |
| 12 | Internetové a jiné zdroje..... | 60 |

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

TP Technické podmínky

SSZ Světelné signalizační zařízení

Z_0^+ Obor hodnot celá kladná čísla

1. ÚVOD

Křižovatka Adámkova – Resslerova v Hlinsku je jedinou křižovatkou osazenou světelnou signalizací ve městě. Jde o křížení silnice první třídy I/34 a silnice druhé třídy II/343, které znamenají hlavní napojení Hlinska na regionální silniční dopravní síť. Křížení se nachází ve středu města v jeho centru jak historickém, tak současném.

Světelná signalizace je řízena čtyřmi pevnými signálními plány určenými pro období dopravní špičky a sedla všedního dne a víkendu. Tyto plány byly navrženy v roce 1998 Ing. Ondřejem Hájkem ze společnosti Patriot s. r. o. a od té doby nebyly měněny. Informace však byly získány pouze ke třem signálním plánům a to pro dopravní špičku a dopravní sedlo všedního dne a sobotní dopravní špičku.

Cílem práce je ověřit, zda jsou tyto plány stále optimální a pokud ne, tak navrhnout nové signální plány na základě matematického modelu navrženého v minulosti pracovníky Výzkumného ústavu dopravního v Žilině pod vedením prof. RNDr. Jana Černého, DrSc., Dr. h. c., které by jejich optimalitu zaručovaly.

V práci je charakterizováno umístění křižovatky v užších (rámeček města) i širších souvislostech (dopravní síť v okrese, kraji). Dále je podrobně popsán teoretický postup vytvoření signálních plánů včetně matematického modelu na základě postupu uvedeného v knize Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech autorů Anny Černé a Jana Černého a konkrétní postup řešení pro danou křižovatku. V práci je využita pouze varianta postupu s optimalizačním kritériem minimalizací délky cyklu. V závěru jsou vyhodnoceny výsledky a posouzena vhodnost použitého postupu.

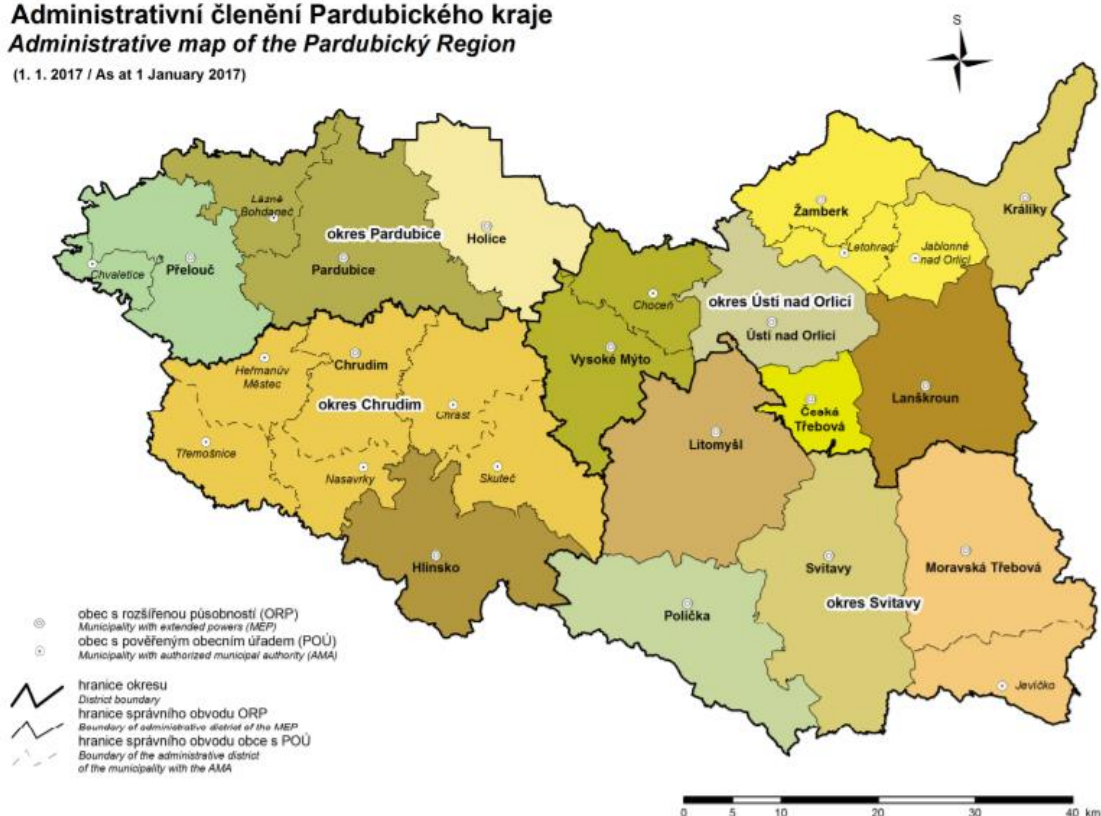
2. Charakteristika zadané křižovatky

2.1 Vymezení řešeného území – okres Chrudim

Zadaná křižovatka se nachází ve městě Hlinsku, které je situováno v jižní části okresu Chrudim. Okres Chrudim je jeden ze čtyř okresů Pardubického kraje. Okres vznikl v roce 1960 sloučením převážné části území okresů Chrudim a Hlinsko spolu s částí území rušených okresů Čáslav, Vysoké Mýto a Polička. Rozloha území okresu Hlinsko činí 993 km², okres se tak řadí ke středně velkým okresům a to i přesto, že tvoří jen 22 % územní rozlohy celého kraje. Hustotou zalidnění 105 obyvatel na km² spadá lehce pod krajský průměr. Na severu a východě sousedí s ostatními okresy Pardubického kraje, tedy s okresy Pardubice, Ústí nad Orlicí a Svitavy. Na jihu sousedí s okresem Žďár nad Sázavou, na jihozápadě s Havlíčkovým Brodem (oba okresy spadají pod kraj Vysočina) a na západě se Středočeským okresem Kutná Hora. [1] Okresy Pardubického kraje jsou znázorněny na obrázku č. 1.

Administrativní členění Pardubického kraje Administrative map of the Pardubický Region

(1. 1. 2017 / As at 1 January 2017)



Obr. č. 1: Administrativní členění Pardubického kraje [2]

Na severu okresu se nachází nížinná oblast s teplejším a sušším klimatem oproti jižní části, kterou prochází Železné hory, část Českomoravské vrchoviny. 61 % území okresu tvoří zemědělská půda, převážně orná a asi šestinou území jsou zastoupeny trvalé travní porosty. Z nezemědělské půdy převažují lesní porosty pokrývající 28,9 % území okresu. Okres je průmyslově-zemědělskou oblastí.

Zemědělství převažuje v severní nížinné části zaměřené na pěstování obilnin. Ve střední a jižní části pak navazuje tradiční bramborářská oblast s podhůřským charakterem. Průmysl v okrese je velmi rozmanitý, hlavní centra tvoří největší osídlení okresu, tedy Chrudim (strojírenství, textilní průmysl), Hlinsko (elektrotechnika, textilní průmysl, kožešnictví, potravinářství), Skuteč (kožedělný průmysl, stavební hmoty), Prachovice (stavební průmysl) a Třemošnic (strojírenství). Dlouhodobě je okres Chrudim okresem s druhou nejvyšší nezaměstnaností v kraji, řada obyvatel dojíždí za pracovními příležitostmi do hlavního krajského města Pardubice. [1]

Okres Chrudim je turisticky atraktivní oblastí díky historickému jádru města Chrudim, státnímu zámku Slatiňany s hipologickým muzeem, množství zřícenin hradů (např. Lichnice, Oheb, Košumberk) či souboru lidových staveb Vysočina na Veselém Kopci a v přilehlých lokalitách Hlinecka. Masopustní průvody z Hlinecka jsou od roku 2010 zapsány na seznam nehmotného kulturního dědictví UNESCO. [1]

2.2 Napojení okresu Chrudim na dopravní síť

V Pardubickém kraji je poměrně hustá železniční a silniční síť.

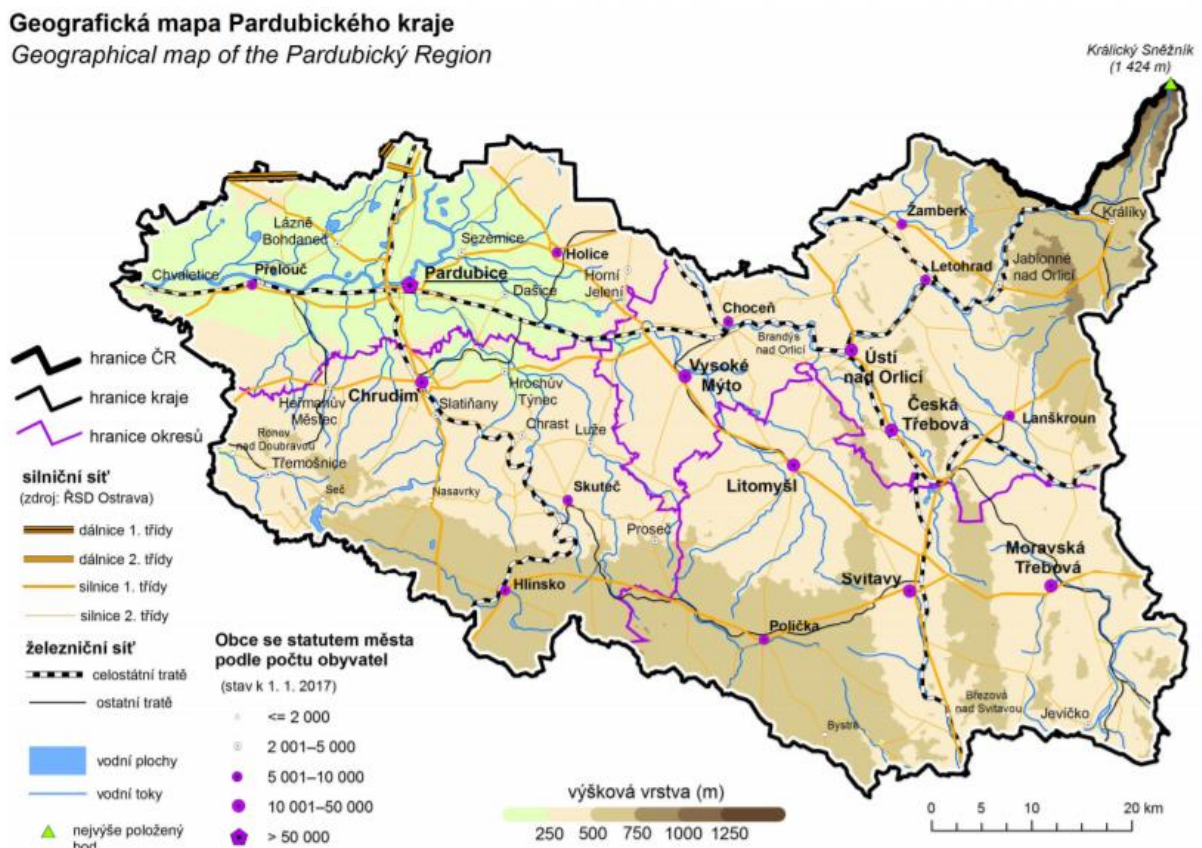
Železniční doprava má velký význam v severní části kraje, kterou prochází tratě mezinárodního a celostátního významu č. 010 Praha – Pardubice – Česká Třebová, trať č. 260 Česká Třebová – Svitavy – Brno a trať č. 270 Česká Třebová – Zábřeh – Olomouc – Přerov. Ty jsou součástí I., II. a III. železničního koridoru. K ostatním tratím celostátního významu patří trať č. 031 Hradec Králové – Pardubice propojující blízce sousedící krajská města a trať č. 238 Rosice nad Labem – Chrudim – Hlinsko – Havlíčkův Brod. Tato trať napojuje město Hlinsko na železniční síť. V jihozápadní části kraje, tedy převážně v okrese Chrudim má železniční doprava pouze regionální význam. [3]

Silniční síť v Pardubickém kraji je poměrně hustá a zejména v jihozápadním výběžku kraje má výrazně vyšší význam než železniční doprava. Krajem prochází silnice první třídy I/35, představující druhé nejdůležitější spojení mezi Čechami a Moravou po dálnici D1. Prochází krajem východojižním směrem, ze severu od Hradce Králové přes Holice, Vysoké Mýto, Litomyšl a Moravskou Třebovou.

Pro okres Chrudim je významná silnice I/37 která krajem prochází ze severu na jih v úseku Hradec Králové – Pardubice – Chrudim – Žďár nad Sázavou a znamená hlavní silniční napojení okresu Chrudim na krajské město a zajišťuje napojení na dálniční síť – jižně na dálnici D1, na severu pak na D11. [4] Dále je zde silnice I/17 procházející severní částí okresu Chrudim ze západu na východ,

propojující města Čáslav a Chrudim a za hranicemi okresu se napojují na již zmiňovanou I/35. Pro jižní část okresu, a tedy i město Hlinsko hraje nejdůležitější roli silnice I/34 která krajem prochází v úseku Havlíčkův Brod – Hlinsko – Svitavy – I/35. Jedná se o jedinou silnici první třídy, procházející městem Hlinsko. [5]

Na severním okraji Hlinska do I/34 zaústíuje silnice druhé třídy II/355 propojují města Pardubice, Hrochův Týnec, Chrast a Hlinsko na území Pardubického kraje. Přes město dále prochází II/343 spojující Seč, Trhovou Kamenici a Svatku a okresy Chrudim a Žďár nad Sázavou. Dvě ze tří lokálně nejvýznamnějších silničních komunikací I/34 a II/343 se kříží přímo v centru města Hlinska, a právě toto křížení – křižovatka ulic Adámkova, Resslerova a Wilsonova je osazena SSZ, jehož signální plán je předmětem této práce. Obr. č. 2: Geografická mapa Pardubického kraje znázorňuje silniční a železniční síť v Pardubickém kraji.

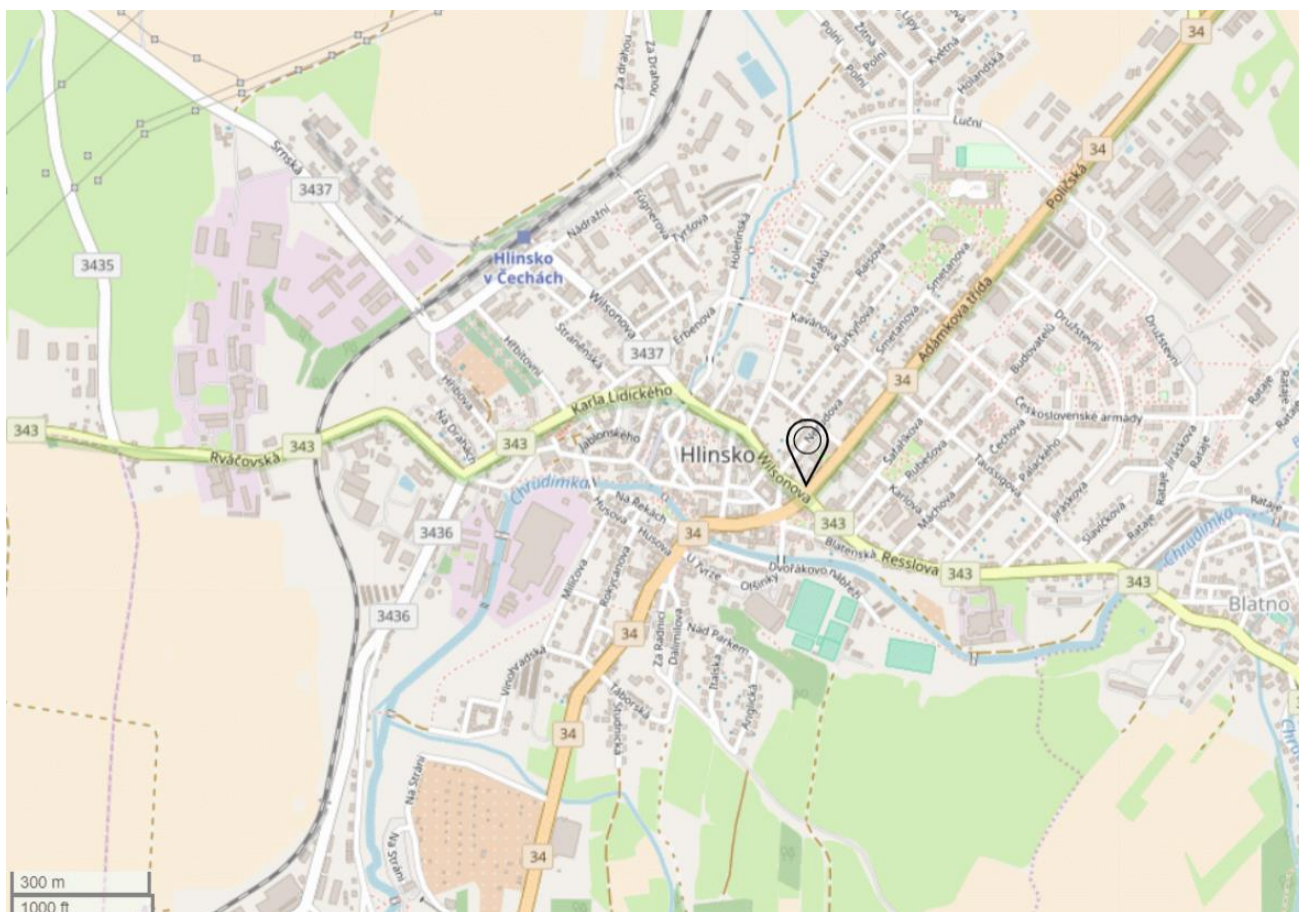


Obr. č. 2: Geografická mapa Pardubického kraje [6]

Hlinsko svou rozlohou 2 427 ha a 9 697 obyvateli patří k menším městům v České republice, v okrese Chrudim však jde o druhé největší město hned po Chrudimi (zhruba 23 000 obyvatel [7]). Je tedy poměrně významným lokálním centrem. V Hlinsku se nachází tři mateřské a tři základní školy, gymnázium a základní umělecká škola. V rámci občanské vybavenosti lze zmínit i místní

knihovnu, kino, sportoviště a zdravotní i sociální služby. [8] V Hlinsku bylo k 31. 12. 2017 registrováno 2 433 podniků, z toho však pouze 1 238, tedy přibližně 50 % tvoří podniky se zjištěnou aktivitou. Mezi nimi jsou nejpočetnější podniky v oboru průmyslu (286) a v oboru velkoobchodu a maloobchodu, opravě a údržbě motorových vozidel (266). [9]

Křižovatka Adámkova – Resslerova v Hlinsku je jedinou křižovatkou řízenou SSZ na území města Hlinsko. Umístění křižovatky je znázorněno na obr. č. 3. Adámkova třída je částí průtahu I/34, procházející městem od severu na jih a je hlavní třídou v Hlinsku. Podél ní je soustředěna občanská vybavenost – Multifunkční centrum Hlinsko, místní pošta, knihovna, gymnázium K. V. Raibe a v její blízkosti je též plavecký bazén. Na Adámkovu třídu na jih od mostu přes řeku Chrudimku navazuje Havlíčkova ulice, kde je situován Městský úřad a Městské muzeum a galerie.



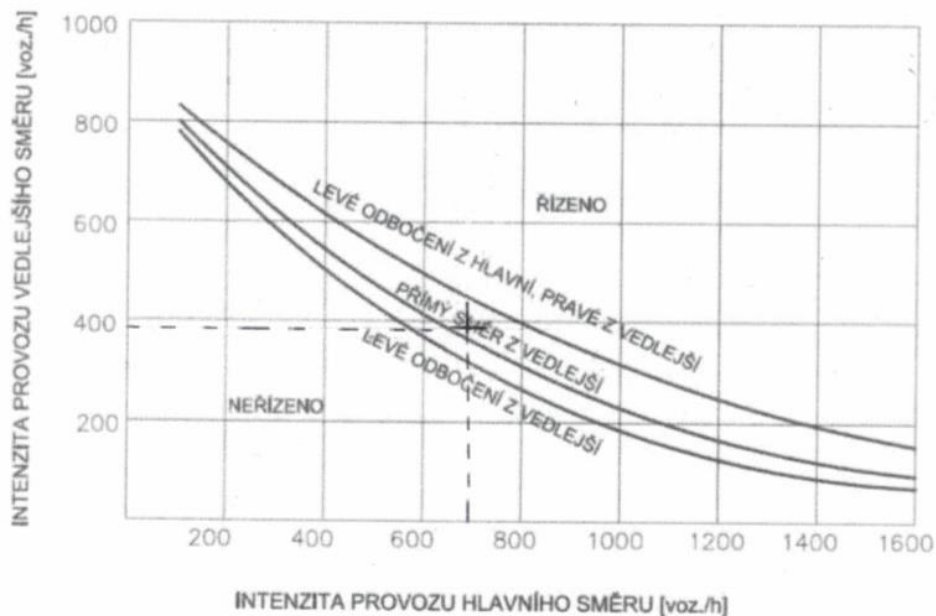
Obr. č. 3: Poloha řešené světelné křižovatky v rámci města Hlinsko [10]

Ulice Wilsonova by se dala považovat za druhou nejvýznamnější – zčásti je tvořena průtahem silnice druhé třídy II/343, která posléze odbočuje na západ ulicemi Karla Lidického a Faráře Toufara směrem na Trhovou Kamenici, zatímco Wilsonova nadále směřuje na sever k nádraží. V místě křížení I/34 a II/343 se nachází centrum města současné i historické (skanzen Vysočina – Betlém).

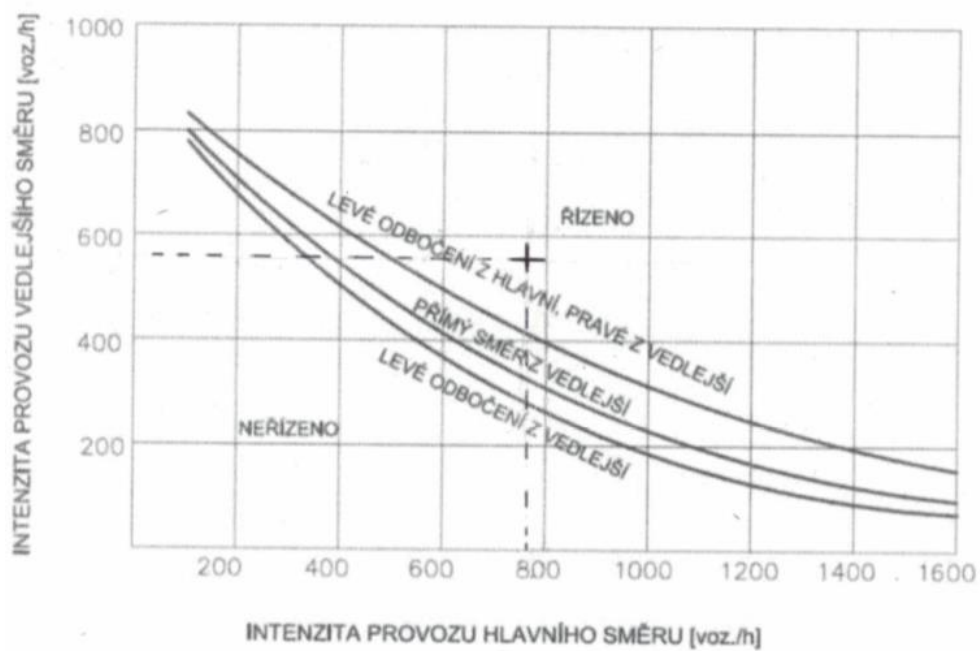
Tato křižovatka je tedy významným bodem na místní dopravní síti, kterým prochází v podstatě veškerá doprava generovaná či procházející Hlinskem.

Podle dat ze Sčítání intenzity dopravy v Pardubickém kraji provedeném v roce 2016 byla komunikací s nejvyšším zatížením v sídlech správních obvodů obcí s rozšířenou působností v Hlinsku silnice I/34 (mimo Hlinsko pak I/37). Celoroční průměrná intenzita, tedy počet vozidel za 24 hodin činila v roce 2016 10 144 vozidel a ve srovnání s rokem 2010 (5 846 vozidel) vzrostla o 73,5 %. Hlinsko se tak zařadilo mezi města s relativně nejvyšším nárůstem dopravy v Pardubickém kraji (dále Moravská Třebová – 48,6 % a Holice – 45,7 %). [11] Tento razantní nárůst však nebyl způsoben zlepšením ekonomické situace okresu (naopak např. původně hlinecký podnik ETA v roce 2012 přesídlil do Prahy). Z části se na něm mohl podílet rostoucí stupeň automobilizace v kraji. V roce 2010 bylo v Pardubickém kraji registrováno celkem 216 704 vozidel, z toho zhruba 21,5 % (46 801 vozidel) v okrese Chrudim. V roce 2016 Český statistický úřad již nerozlišuje počet vozidel podle okresů, nicméně za předpokladu, že se podíl počtu vozidel v okrese Chrudim na celkovém počtu vozidel v Pardubickém kraji zachoval, by zde bylo registrováno 54 395 vozidel tedy o 16 % více než v roce 2010. [12] Nejvíce se na nárůstu intenzity dopravy zřejmě podílí narůstající dojíždka za prací. Struktura vozidel v roce 2016 byla 84,9 % osobní automobily a 14,2 % těžká vozidla. Ve srovnání s rokem 2010 tak velmi lehce stoupl podíl osobních automobilů (zhruba o 4,5 %). Hodnota podílu těžkých vozidel je v rámci kraje průměrná. [11]

Křižovatka Adámkova – Resslerova splňuje kritérium intenzity provozu z hlediska vozidel, to je dosahuje vyšších hodnot intenzit, silničního provozu, než jsou stanoveny přípustnými intenzitami neřízených křižovatek podle ČSN 73 6102 orientačním posouzením kapacity křižovatky dle grafu uvedeného v TP 81. [01] Na obrázku č. 4 je graf s vyznačenými intenzitami odpolední špičky všedního dne dle intenzit uvedených v technické dokumentaci křižovatky. Analogická situace se vyskytuje v podmínkách sobotní dopravní špičky. Během poledního sedla všedního dne kritérium pro zavedení světelného řízení nebylo splněno. Na obrázku č. 5 pak je však vyznačena intenzita provozu během poledního sedla, která byla aktuálně naměřena v rámci dopravního průzkumu. Proto bylo usouzeno, že i v tomto období je světelné řízení vhodné a je tedy také vhodné zabývat se optimalizací signálního plánu.



Obr. č. 4: Kritérium intenzity provozu pro zavádění SSZ – původní data, odpolední špička [01]



Obr. č. 5: Kritérium intenzity provozu pro zavádění SSZ – aktuální data, polední sedlo [01]

3. Charakteristika použitého exaktního přístupu

V této práci využívám ke stanovení signálního plánu algoritmus uvedený v publikaci Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech autorů Anny a Jana Černého, vydané pod hlavičkou Katedry technologie a řízení dopravy, Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice v roce 2004.

3.1 Princip algoritmu a optimalizační kritérium

Algoritmus využívá metodu lineárního programování, jež je univerzálním nástrojem pro řešení velkého spektra různých typů optimalizačních problémů. Při řešení je nutno nejdříve vytvořit matematický model úlohy, který je následně řešen zpravidla optimalizačním softwarem vhodným pro řešení těchto typů úloh. V této práci byl k řešení modelu využit Xpress-IVE společnosti FICO.

Lineární matematický model optimalizační úlohy obecně sestává z účelové funkce a omezujících podmínek. Účelová funkce, nebo též kritériální funkce, vyjadřuje optimalizační kritérium úlohy. Jde o maximalizaci nebo minimalizaci rozhodující veličiny. Extrém účelové funkce je hledán při splnění všech omezujících podmínek, které tvoří vlastní omezení úlohy a jsou vyjádřeny lineárními rovnicemi nebo nerovnicemi. Řešení pak musí splňovat také podmínku nezápornosti, která vyplývá z interpretace očekávaných rozhodnutí a je zapsána buď pomocí nerovnice, množinového zápisu nebo pomocí výčtu hodnot, kterých může příslušná proměnná nabývat. [13]

Jako optimalizované veličiny (optimalizační kritéria) lze v algoritmu zvolit dvě různé veličiny: délku cyklu a minimální z poměrných rezerv mezi nabízenou a průměrně požadovanou dobou zelené. [02] V první variantě (délka cyklu) je kritériální funkce minimalizována. [01] Tento postup vede k plynulejší dopravě při zachování potřebné kapacity. Používá se při známé hodnotě poměrných rezerv. [02]

Poměrnou rezervou pro daný proud se rozumí podíl nabízené doby zelené daného proudu v rámci cyklu a průměrně požadované doby zelené vyplývající z intenzity proudu vztažené k jednomu cyklu pro daný proud. Poměrná rezerva o hodnotě 1 značí, že se nabízená doba zelené rovná průměrně požadované době zelené, tedy je přesně uspokojena poptávka. Při dimenzování nabídky se používá hodnoty poměrné rezervy větší než jedna, což znamená, že nabízená doba zelené je delší, než je průměrně požadovaná doba zelené pro daný proud, tedy že existuje určitá rezerva ve využívání

doby zelené. Například poměrná rezerva o hodnotě 1,2 znamená o 20 % delší nabízenou dobu zelené, než je průměrně požadována, tedy 1,2–násobek průměrně požadované doby zelené. [02]

Při zvolení minimální poměrné rezervy jako optimalizačního kritéria je tato rezerva maximalizována, tedy cílem je dosáhnout větší „spravedlnosti“ v rozdělování doby zelené. Tato varianta se používá při známé neměnné hodnotě délky cyklu. [02]

V obou postupech se předpokládá, že každá signální skupina v rámci jednoho cyklu má jen jednu zelenou. Pokud je obsažena ve více fázích, musí být tyto řazeny bezprostředně za sebou a zelená pak trvá během všech těchto fází nepřerušovaně. [02]

3.2 Vstupní údaje a užívané proměnné

Pro provedení algoritmu je nutno znát následující údaje:

- množinu proudů vstupujících do křižovatky
- hodinovou intenzitu každého proudu q_i vyjádřenou v jednotkových vozidlech [j. v./h]
- mezičas m_{ij} mezi kolizními proudy i a j [s]
- minimální dobu zelené t_i [s]
- vstupní dobu jednotkového vozidla do křižovatky T_i [s]

Množina proudů bývá vyznačena v situaci křižovatky, respektive situaci SSZ, kde jsou vyznačena jednotlivá návěstidla signálního zařízení, a ze které vyplývá, které proudy jsou jimi řízeny. Hodinová intenzita provozu jednotlivých proudů je zjištěna dopravním průzkumem, který by se měl řídit zásadami uvedenými v technických podmínkách TP 189 (II. vydání). Intenzity mohou být znázorněny pomocí pentlogramu intenzit a hodnoty v nich uvedené udávají počet jednotkových vozidel za hodinu, která danou křižovatku projela. Mezičas je minimální doba, která musí uplynout od konce doby zelené proudu i do začátku zelené následujícího kolizního proudu j . Udává se v sekundách formou tabulky mezičasů. Mezičasy se určují výpočtem dle TP 81. Minimální doba zelené t_i je určena v technických podmínkách TP 81 jako 5 sekund pro vozidla, chodce, cyklisty a tramvaje. [01] Vstupní dobou vozidla do křižovatky se rozumí doba, kterou spotřebuje jednotkové vozidlo na vstup do křižovatky a je možné ji určit měřením nebo se využije obvyklá konstanta (např. 2 sekundy). [02]

V modelu jsou používány proměnné:

- c [s] – délka cyklu signálního plánu
- u [-] – minimální poměrná rezerva
- x_i [s] – čas začátku doby zelené pro proud i počítáno od začátku cyklu
- y_i [s] - čas konce doby zelené pro proud i počítáno od začátku cyklu.

Nabízená doba zelené pro proud i je pak definována jako $y_i - x_i$. [02]

3.3 Obecný matematický model

Matematický model pro minimalizaci délky cyklu c má tvar:

$$\min f(x, y, c) = c \quad (1.1)$$

za podmínek:

$$y_i - x_i \geq t_i \quad \text{pro } i \in I \quad (1.2)$$

$$y_i - x_i \geq \frac{q_i}{3600} \cdot c \cdot T_i \cdot u \quad \text{pro } i \in I \quad (1.3)$$

$$x_j - y_i \geq m_{ij} \quad (1.4)$$

$$x_j + c - y_i \geq m_{ij} \quad (1.5)$$

$$y_i \leq c \quad \text{pro } i \in I \quad (1.6)$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (1.7)$$

$$y_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (1.8)$$

$$c \geq 0 \quad (1.9)$$

Funkce (1.1) reprezentuje optimalizační kritérium – délku cyklu, která je minimalizována. Skupina omezujících podmínek (1.2) zajišťuje, že nabízená doba zelené v rámci jednoho cyklu neklesne pod hodnotu minimální doby zelené. Podmínka se vytváří pro každý proud. Skupina omezujících podmínek (1.3) zajišťuje, že nabízená doba zelené v rámci jednoho cyklu neklesne pod hodnotu průměrně požadované doby zelené upravenou o případnou minimální poměrnou rezervu. Podmínka se vytváří pro každý proud. Tato skupina podmínek zajišťuje uspokojení poptávky po době zelené v jednotlivých proudech. Skupiny omezujících podmínek (1.4) a (1.5) zajistí dodržení mezičasů mezi časy konců a časy začátků dob zelených pro kolizní proudy. Počet podmínek odpovídá počtu kolizních situací, které se vyskytnou ve výsledném fázovém schématu. Skupina podmínek (1.4) zajistí zachování mezičasů ve fázových přechodech uvnitř cyklu, skupina omezujících podmínek (1.5) zajistí zachování mezičasů ve fázovém přechodu mezi sousedními

cykly. Skupina omezujících podmínek (1.6) zajistí, že doby zelených pro všechny proudy skončí nejpozději na konci cyklu. Skupiny omezujících podmínek (1.7) – (1.9) vymezují definiční obory proměnných.

Při volbě minimální poměrné rezervy jako optimalizačního kritéria by byl matematický zápis následovně upraven:

$$\max f(x, y, u) = u \quad (1.10)$$

$$u \geq 0 \quad (1.11)$$

Optimalizační kritérium (1.1) by bylo nahrazeno tvarem (1.10) a vzhledem ke změně proměnné, u které je hledán extrém, dojde k záměně podmínky (1.9) za (1.11).

3.4 Přípravné kroky

Skupiny omezujících podmínek (1.2) a (1.3) jsou jednoznačně vytvořitelné, vztahují se totiž ke všem proudům. Tato jednoznačnost však neplatí u mezičasových podmínek, protože zatím není známo, v jakém pořadí budou v rámci cyklu proudy do křižovatky vstupovat. K tvorbě pořadí vstupujících proudů a následné identifikaci vhodných mezičasových podmínek slouží následující přípravné kroky.

3.4.1 Graf bezkoliznosti

V prvním kroku vytvoříme graf bezkoliznosti. „*Grafem se rozumí uspořádaná trojice $G = (V, X, p)$, kde V a X jsou množiny, přičemž V je konečná neprázdná množina a p je prosté zobrazení množiny X do množiny všech neuspořádaných dvojic (u, v) , $u, v, u \neq v$. Prvky množiny V nazýváme vrcholy grafu G , prvky množiny X hranami grafu G a zobrazení p incidencí grafu G .*“ [03]

Vrcholy grafu v grafu bezkoliznosti znázorňují proudy vstupující do křižovatky a hrany spojují proudy, které jsou navzájem bezkolizní, tedy mohou do křižovatky vstupovat současně. [02]

Na místě je poznámka, že počet proudů vstupujících do křižovatky se nemusí nutně rovnat reálnému počtu proudů užitých v algoritmu. Toto je dáno počtem návěstidel, které signalizační zařízení na křižovatce využívá. Jedno návěstidlo může řídit dva proudy současně, například proud

projíždějící křižovatkou rovně a proud odbočující vlevo. Při praktické aplikaci je nutné vycházet z konkrétní situace na dané křižovatce.

3.4.2 Vytvoření soustavy fázových skupin

Po vytvoření grafu bezkoliznosti vytvoříme množinu fází. Fáze je množina proudů, které mohou vstupovat do křižovatky současně, tedy jsou navzájem nekolizní. Fáze je v grafu znázorněna jako maximální kompletní podgraf (takzvaná klika grafu). [02]

Požadavkem na kompletnost, to znamená příležitost každého vrcholu ke všem ostatním vrcholům podgrafu [03] zajišťujeme, že v jedné fázi budou pouze navzájem nekolizní proudy (jak bylo výše popsáno, propojení vrcholů hranou signifikuje bezkoliznost propojených vrcholů). Vložением všech možných vrcholů do podgrafu, tedy vytvořením maximálního podgrafu se zaručuje, že žádný proud, který může vstupovat, aniž by vznikla kolize, nebude opomenut. Přidělení zelené maximální fázové skupině je velmi výhodné, protože se neefektivněji využije délka cyklu. [02]

Množinu fází lze vytvořit následujícím postupem:

„Vezme se signální skupina s_1 , přidá se s_i s nejmenším indexem taková, že jsou spojeny hranou, pak se k nim přidá (pokud existuje) další signální skupina s_j s nejmenším indexem taková, že spolu s předešlými tvoří kompletní graf atd. pokud to jde, až se další signální skupina nedá přidat a máme jednu maximální fázovou skupinu. Pak v ní poslední signální skupinu vynecháme a zkusíme najít jinou s vyšším indexem takovou, aby s předešlými opět tvořila kompletní graf. Když ji najdeme, přidáme ji a zkusíme ještě přidat další atd. Když po vynechání poslední signální skupiny se již žádná „vyšší“ přidat nedá, vynecháme i předposlední atd.“ [02]

3.4.3 Výběr minimálního počtu fázových skupin

V dalším kroku přicházíme k dílčímu optimalizačnímu problému – výběru minimálního počtu fází, pokrývajících všechny proudy z množiny proudů. Tím se minimalizuje počet fázových přechodů v signálním plánu, které generují nevyužití křižovatky (kvůli nutnosti umístění maximálního mezičasu mezi dvěma fázemi, aby byla zajištěna bezkoliznost kolizních proudů sousedních fází). [02] Optimalizační úlohu budeme řešit lineárním programováním. Vstupy tvoří množina proudů I , množina fází J vytvořená podle zásad uvedených v podkapitole 3.4.2. Do úlohy se zavede množina bivalentních proměnných označených např. jako z_j , přičemž počet těchto proměnných odpovídá počtu fází vytvořených v předchozím kroku. Když po skončení optimalizačního výpočtu platí, že $z_j = 1$, potom fáze $j \in J$ byla vybrána do výsledného fázového schématu, když po skončení optimalizačního výpočtu platí, že $z_j = 0$, potom fáze $j \in J$ nebyla vybrána do výsledného fázového schématu.

Při výběru minimálního počtu fází řešíme následující model:

$$\min f(z) = \sum_{j \in J} z_j \quad (2.1)$$

za podmínek:

$$\sum_{j \in J_i} z_j \geq 1 \quad \text{pro } i \in I \quad (2.2)$$

$$z_j \in \{0; 1\} \quad \text{pro } j \in J \quad (2.3)$$

Funkce (2.1) reprezentuje optimalizační kritérium, kterým je celkový počet vybraných fází. Aby se každý proud dostal do křižovatky, musí být vybrána alespoň jedna z fází, která jej obsahují, tedy alespoň jedna z proměnných, odpovídajících výběru fáze, musí nabýt hodnoty 1. Tuto skutečnost zajistí skupina omezujících podmínek (2.2). Počet omezujících podmínek v této skupině odpovídá počtu proudů. Skupina omezujících podmínek (2.3) vymezuje definiční obory proměnných vystupujících v modelu. Přitom je možný vznik několika řešení o stejném minimálním počtu fází.

3.4.4 Optimalizace pořadí fázových skupin

Dále je nutno určit optimální pořadí vybraných fází (řešení z předchozího kroku). Vytvoří se množina všech možných pořadí fází, za dodržení pravidla, že je-li stejný proud obsažen ve více fázích, musí se tyto fáze uspořádat tak, aby následovaly bezprostředně za sebou. Každému proudu v modelu je vyčleněn pouze jeden začátek a jeden konec. [02] Optimalizačním kritériem výběru pořadí fází je součet takzvaných rozhodujících mezičasů v daném pořadí fází. Rozhodujícím mezičasem se

rozumí mezičas mezi dvěma fázemi o nejvyšší hodnotě. Z množiny možných pořadí fází se vybere to pořadí, které generuje minimální součet rozhodujících mezičasů. Z optimálního pořadí fází vyplyne optimální pořadí vstupů proudů do křižovatky, tedy indikuje, které hodnoty mezičasů je nutno použít v modelech (1.1) – (1.9) nebo (1.2) – (1.8) a (1.10) – (1.11).

4. Příprava vstupních dat pro optimalizační výpočet – intenzity dopravy a mezičasy


Vstupními daty je projektová dokumentace k světelnému signalizačnímu zařízení na křižovatce Adámkova – Resslerova v Hlinsku, která byla vypracována společností Patriot s. r. o. v Brně a pro účely zpracované práce byla zprostředkována panem Milošem Jansou z firmy Miloš Jansa, která se o provoz SSZ v Hlinsku stará. Současné signální plány uvedené v této dokumentaci jsou uvedeny v příloze č. 1.

4.1 Proudění vstupující do křižovatky

Za proudění v této práci považují jednotlivé signální skupiny, neboť právě pro ně je sestavován signální plán. V dokumentaci je určeno čtrnáct signálních skupin vstupujících do křižovatky. Jsou označeny číslem a zkratkou v souladu se zásadami Označování signálních skupin v Technických podmínkách 81. Tyto říkají: *„Základní označení každého signálu je tvořeno dvěma symboly, a to typem signálu a jeho pořadím (pořadí vjezdu). Pro označení typu signálu se používají velká písmena abecedy. Pořadí signálu se označuje velkými písmeny (A, B, C) nebo arabskými číslicemi (1, 2, 3), a to za označením typu signálu, a odpovídá pořadí vjezdu do křižovatky. Na jedné křižovatce se jednotlivé vjezdy označují postupně od zvoleného (severního) vjezdu ve smyslu otáčení ve směru pohybu hodinových ručiček (např. VA, VB, VC, VD nebo V1, V2, V3, V4). ... Signál opakovacího návěstidla (resp. dalších návěstidel stejné signální skupiny) se označuje stejně jako signál základní a rozlišuje se: - čárkovaným označením pořadí nebo pruhem (např. základní návěstidlo VA, opakovací návěstidla VA', VA"), - nebo číslicí (VA1, VA2, VA3). Signály pro chodce na dělených přechodech na výjezdech z křižovatky se označují pořadím navazujícím na již použité pořadí vjezdových částí křižovatky (např. části přechodů na vjezdech VA, VB, VC, VD se označí podle vjezdů PA, PB, PC, PD.“ [01]*

Signální skupiny jsou uvedeny v tabulce č. 1. Směr vjezdu do křižovatky označený „k Tylovu náměstí“ je druhé rameno Adámkovy třídy, směřující k Tylovu náměstí. Toto značení je převzato z dokumentace ke stávajícím signálním plánům.

Tabulka č. 1: Seznam signálních skupin

| číslo | Název skupiny | Typ signálu | Směr vjezdu do křižovatky |
|-------|---------------|--------------------------------|--|
| 1 | VA | signál pro vozidla | Adámkova třída |
| 2 | VB | signál pro vozidla | Resslova |
| 3 | VC | signál pro vozidla | k Tylovu náměstí |
| 4 | VD | signál pro vozidla | Wilsonova |
| 5 | KA | signál pro opuštění křižovatky |  Adámkova třída |
| 6 | KC | signál pro opuštění křižovatky | k Tylovu náměstí |
| 7 | KD | signál pro opuštění křižovatky | Wilsonova |
| 8 | SA | signál doplňkové zelené šipky | Adámkova třída |
| 9 | SB | signál doplňkové zelené šipky | Resslova |
| 10 | SD | signál doplňkové zelené šipky | Wilsonova |
| 11 | PA | signál pro pěší | Adámkova třída |
| 12 | PB | signál pro pěší | Resslova |
| 13 | PC | signál pro pěší | k Tylovu náměstí |
| 14 | PD | signál pro pěší | Wilsonova |

Situaci křižovatky spolu s vyznačením signálních skupin znázorňuje obrázek č. 6.



| | | | | |
|-----------------------|---|---|----------------------------------|---------------------------|
| VEDOUCÍ PROJEKTANT | ING. ONDŘEJ HÁJEK |  | PATRIOT® spol. s r. o. | |
| ZODPOVĚDNÝ PROJEKTANT | ING. ONDŘEJ HÁJEK | | | |
| VYPRACOVAL | ING. ONDŘEJ HÁJEK | | Hybešova 46 | 602 00 BRNO |
| KRESLIL | | | tel. 43 23 49 38 | fax 43 21 25 81 |
| KONTROLOVAL | ING. PAVEL KRÉSA | | DATUM | 06/98 |
| OKRESNÍ ÚŘAD | CHRUDEM | | FORMÁT | 1 x A4 |
| INVESTOR | MĚSTO HLINSKO | | MĚŘITKO | 1 : 500 |
| NÁZEV AKCE | HLINSKO SSZ ADÁMKOVA - RESSLLOVA | | STUPEŇ | DSP |
| | | | Č. ZAKÁZKY | |
| | | | ARCHIVNÍ Č. | |
| NÁZEV VÝKRESU | SITUACE SSZ | | Č. SOUPRAVY | Č. VÝKRESU 10.2 |

Obr. č. 6: Situace SSZ [04]

4.2 Intenzity proudů

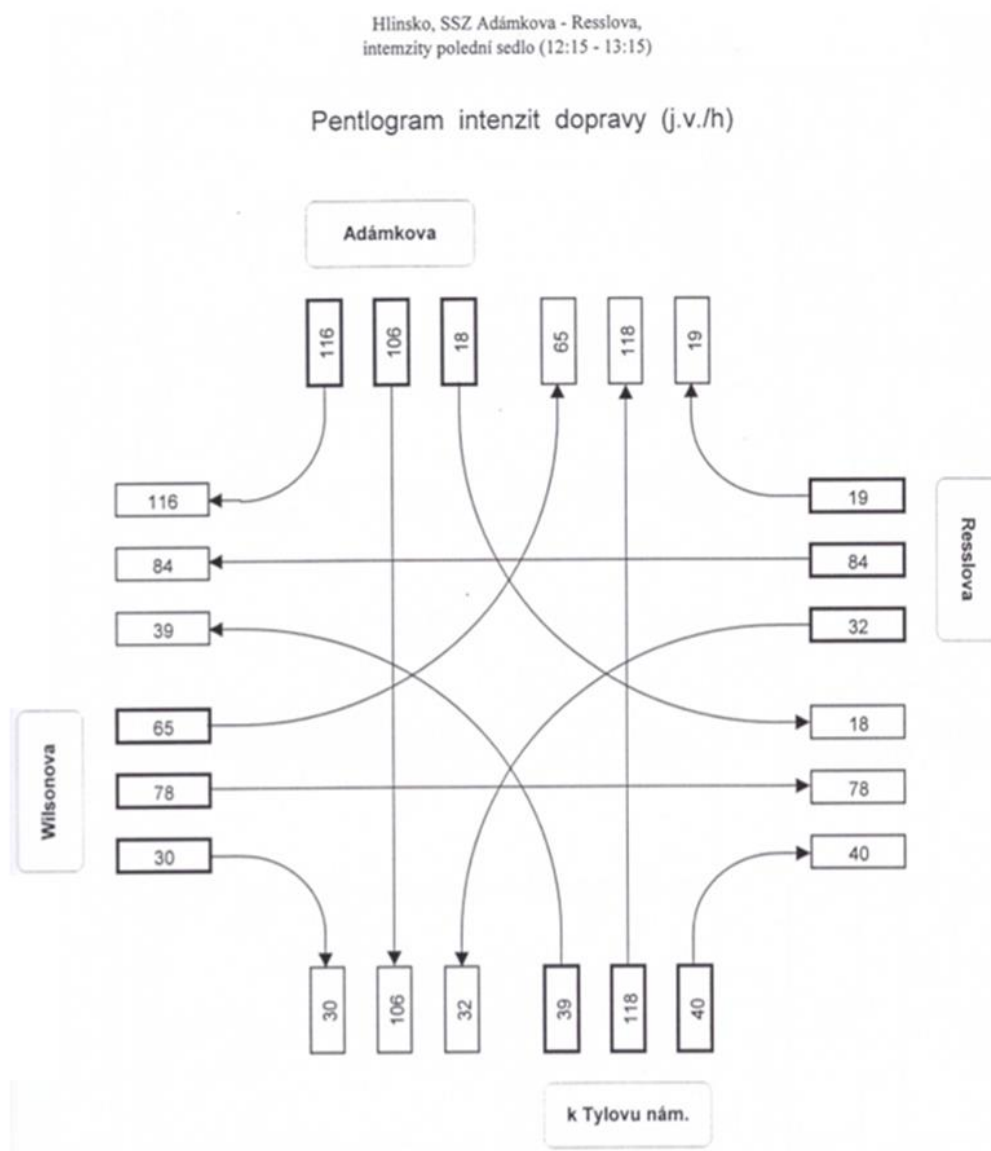
Křižovatka je řízena v režimu výběru z několika pevných signálních plánů podle času. V projektové dokumentaci jsou uvedeny intenzity provozu pro tři signální plány:

PL1 s délkou 60 s určený pro sedlo pracovního dne

PL2 s délkou 75 s určený pro řízení v období zvýšeného provozu ve všední dny

PL3 s délkou 75 s určený pro řízení v období zvýšeného provozu v sobotu.

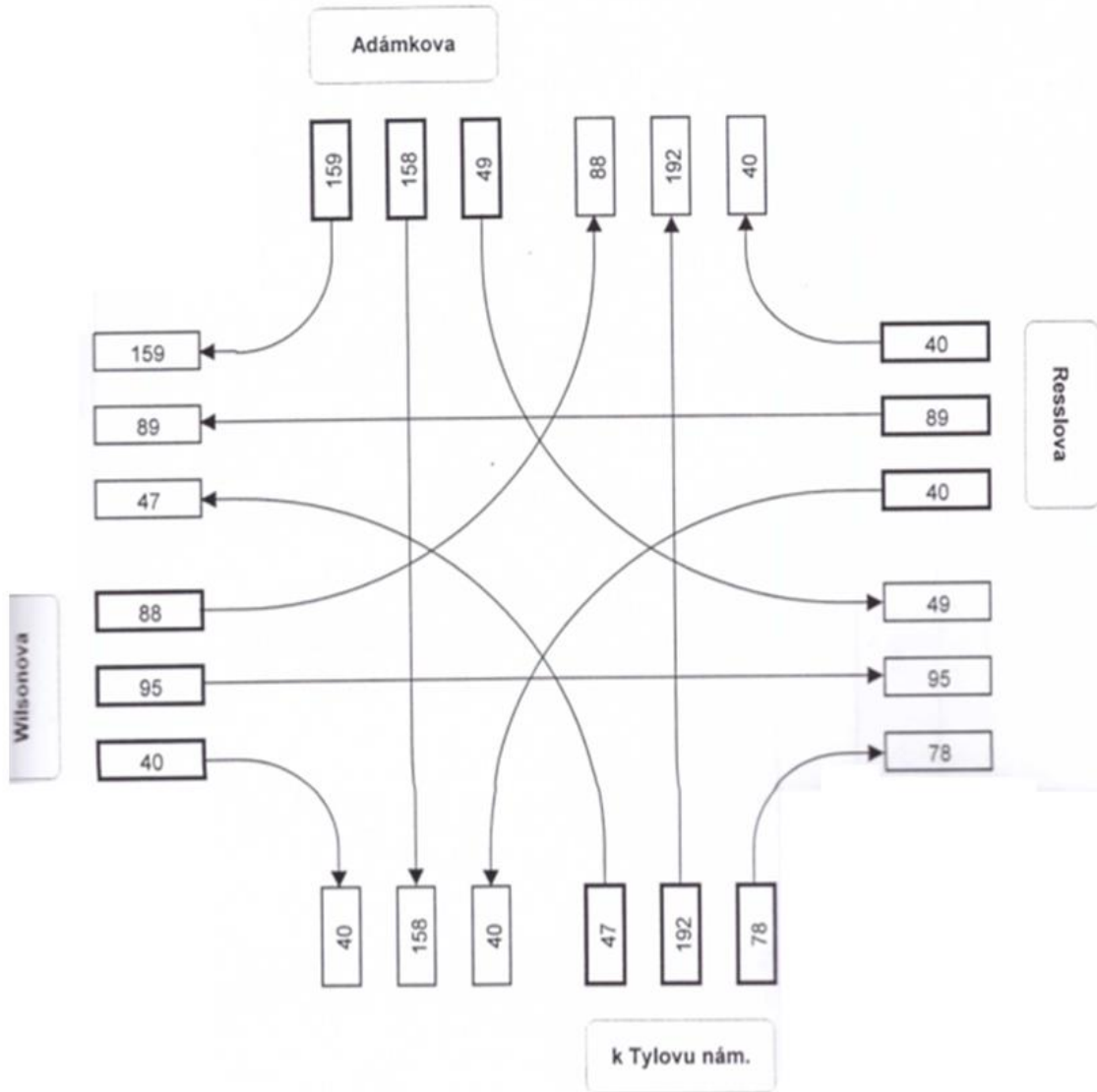
Intenzity, uvedené v dokumentaci, jsou znázorněny formou pentlogramů intenzit dopravy a jsou uvedeny v následujícím obrázku č. 7 je znázorněn pentlogram intenzit pro polední sedlo pracovního dne, na obrázku č. 8 pentlogram intenzit odpolední špičky pracovního dne a na obrázku č. 9 je znázorněn pentlogram intenzit pro sobotní špičku.



Obr. č. 7: Pentlogram intenzit – polední sedlo pracovního dne [04]

Hlinsko, SSZ Adámkova - Resslerova,
 intenzity odpolední špička (14:00 - 15:00)

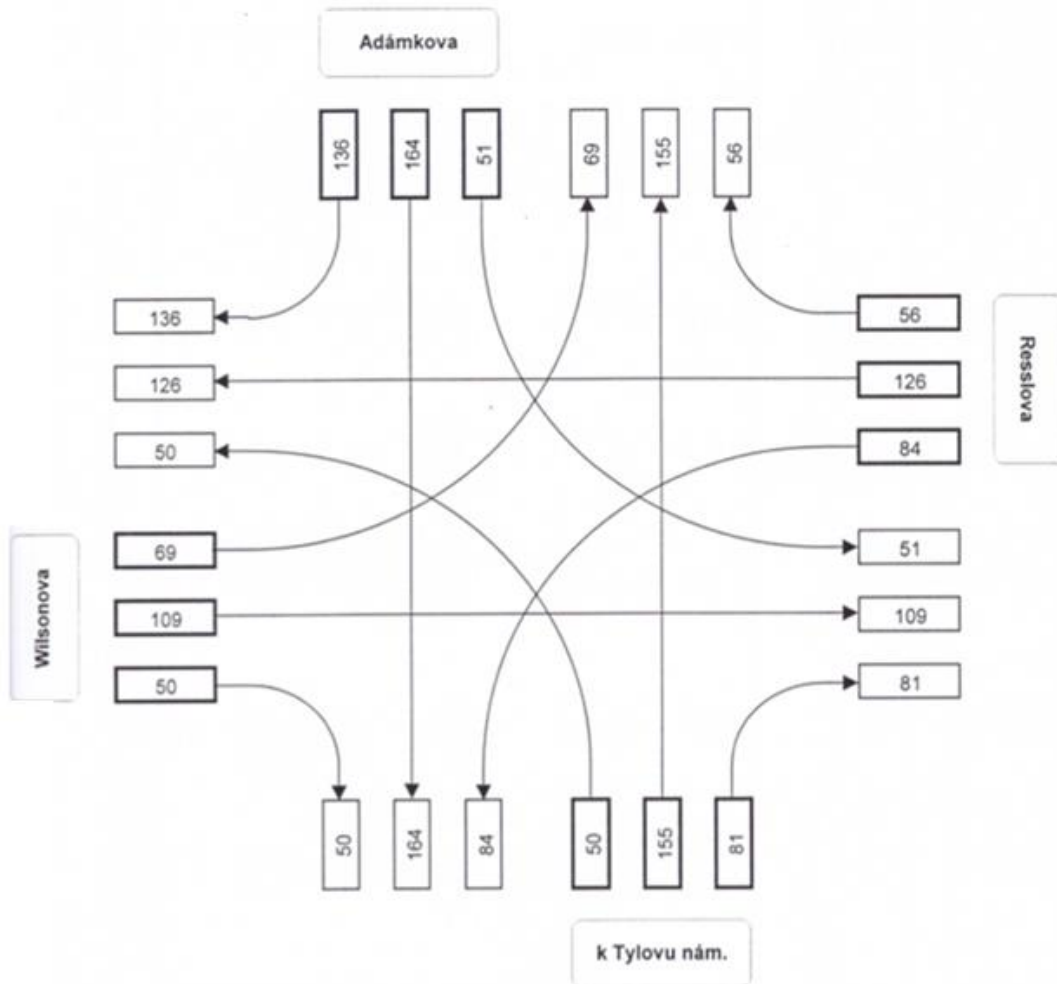
Pentlogram intenzit dopravy (j.v./h)



Obr. č. 8: Pentlogram intenzit – odpolední špička pracovního dne [04]

Hlinsko, SSZ Adámkova - Resslerova,
intenzity sobotní špička (09:00 - 10:00)

Pentlogram intenzit dopravy (j.v./h)

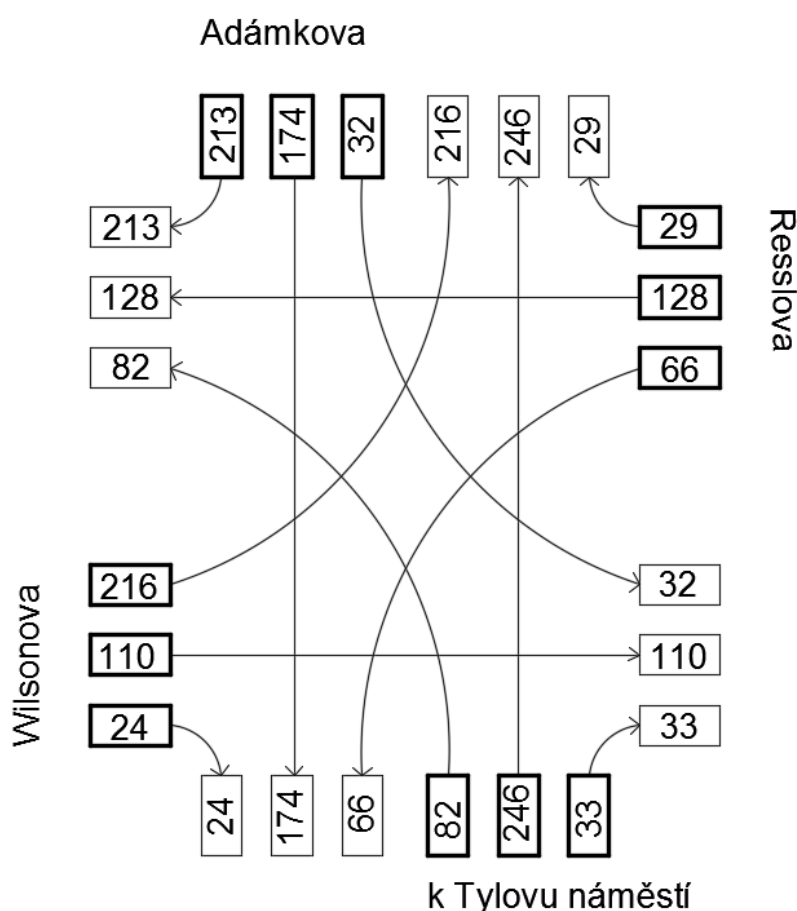


Obr. č. 9: Pentlogram intenzit – sobotní špička [04]

V rámci této práce byl také proveden zkrácený dopravní průzkum zaměřený na získání aktuálních hodnot intenzity dopravy. Měření bylo provedeno dne 26. 4. 2018 mezi 11:15 – 16:00. Provoz byl zaznamenán kamerou a poté ze záznamu byla sčítána vozidla pro daný směr a čas. Intenzity byly sečteny po čtvrthodinách a čtvrt hodiny dále sčítány do hodin. Počátek každé další hodiny byl posunut vždy o čtvrt hodinu. Poté byly vybrány nejvyšší hodinové intenzity pro období poledního sedla 11:15 – 14:15 (v dokumentaci ke stávajícím signálním plánům je polední sedlo určeno v 12:15 – 13:15) a období odpolední špičky 13:00 – 16:00 (v dokumentaci ke stávajícím signálním plánům je odpolední špička pracovního dne vymezena časovým intervalem 14:00 – 15:00).

Pro nově naměřená data byly hodnoty intenzit pro polední sedlo určeny v 13:15 – 14:15 s celkovým počtem 1 353 projetých jednotkových vozidel a hodnoty intenzit pro odpolední špičku určeny v 14:30 – 15:30 s celkovým počtem 1 611 jednotkových vozidel. Konkrétní naměřené hodnoty jsou uvedeny na obrázcích č. 10 a 11. Pentlogram aktuálních intenzit pro polední sedlo na obrázku č. 10 a pentlogram aktuálních intenzit pro odpolední špičku na obrázku č. 11.

Pentlogram intenzit dopravy (j.v./h.) polední sedlo (13:15 - 14:15)

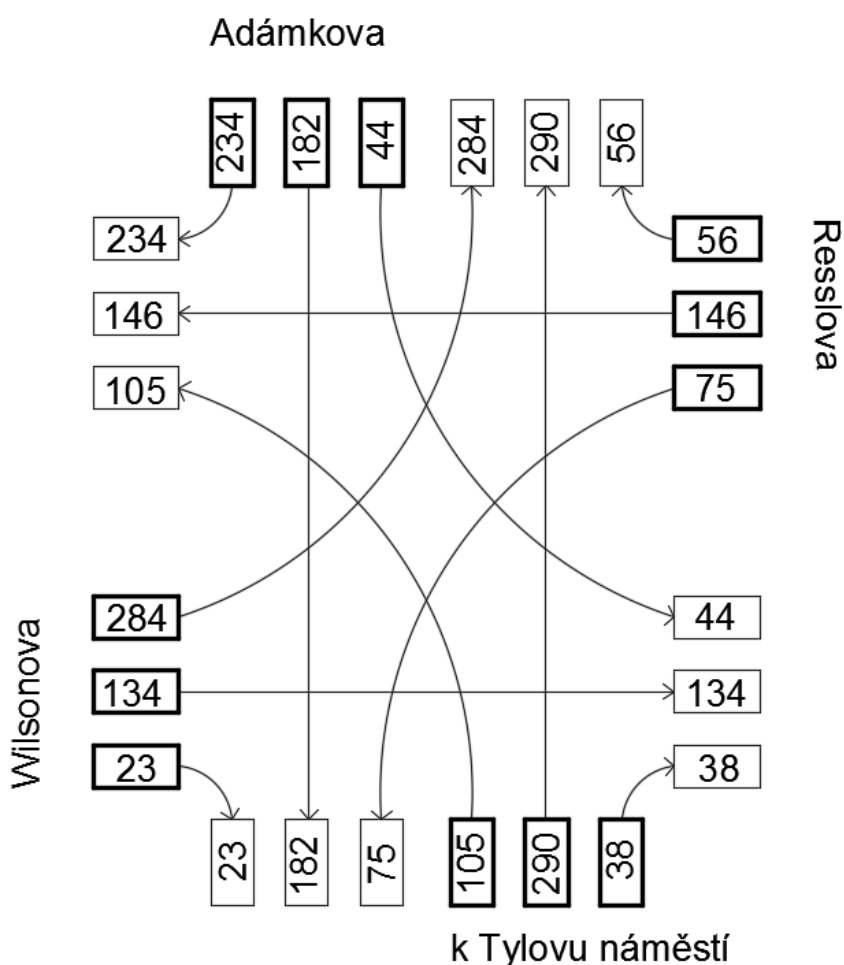


Obr. č. 10: Pentlogram aktuálních intenzit – polední sedlo pracovního dne

Intenzita provozu se výrazně zvýšila především ve směrech projíždějících křižovatkou v přímém směru. Ze směru Resslerova došlo k nárůstu o 106 %, podobně (108 %) ze směru k Tylovu náměstí a u odbočení vlevo na Wilsonovu ulici (110 %). K lehkému poklesu zhruba o 20 % došlo jen u dvou proudů – pravého odbočení z Tylova náměstí na Resslerovu a z Wilsonovy ulice k Tylovu náměstí. Překvapivé je ale nejvýraznější zesílení intenzity levého odbočení z ulice Wilsonovy na Adámkovu třídu. Jde o nárůst o 232 %. Původně spíše průměrná intenzita toho proudu se stala druhou nejvyšší. To mohlo být způsobeno změnou na dopravní síti.

Pentlogram intenzit dopravy (j.v./h.)

odpolední špička (14:30 - 15:30)



Obr. č. 11: Pentlogram aktuálních intenzit – odpolední špička pracovního dne

Pentlogram intenzit dopravy v odpolední špičce pracovního dne vykazuje stejně tendence, jako předešlý, jen pokles intenzity u zmíněných dvou proudů odbočujících vpravo je výraznější. V případě odbočky do Resslerovy ulice jde dokonce o pokles o 51 %, u druhého proudu pak o 43 %. Celkově je zřejmý nárůst významu Wilsonovy ulice, dříve byly nejzatíženější ulice Adámkova třída a k Tylovu náměstí, dnes jsou to však Adámková třída a Wilsonova.

Z každého ramene křižovatky byly určeny intenzity jednotkových vozidel, podle následujícího postupu. Vstupuje-li proud v rámci jedné signální skupiny do křižovatky ve více jízdnicích pruzích samostatně pro různé směry, potom se určí intenzity v jednotlivých proudech a vybere se z nich maximální.


Například skupina VA signálního plánu PL1a je tvořena proudy pohybujícími se ve dvou jízdnicích – samostatném jízdnicím pruhu pro odbočení vpravo a společném jízdnicím pruhu pro přímý směr a odbočení vlevo. V samostatném jízdnicím pruhu pro odbočení vpravo byla zaznamenána intenzita 213 j.v./h. a ve společném jízdnicím pruhu pro přímý směr a pro odbočení vlevo byla zaznamenána intenzita $32+174 = 206$ j.v./h. Protože po skončení doby zelené pro příslušnou signální skupinu by neměla zůstat před křižovatkou vozidla (počítáno s průměrnými hodnotami) je nutno volit vyšší hodnotu, tedy 213 j.v./h.

Pro proudy chodců P11 – P14 není intenzita provozu v dokumentaci ke stávajícím signálním plánům určena. Aby byl zachován stejný způsob výpočtu signálních plánů, vycházející ze stejného rozsahu dat, nebyly intenzity provozu pěších určeny ani při měření aktuální intenzity provozu dopravy.

4.3 Tabulka mezičasů a vstupní doby jednotkových vozidel

Tabulka mezičasů byla převzata ze stávající dokumentace ke světelné signalizaci. Rychlost chodců byla stanovena na 1,4 m/s. Tabulka mezičasů je uvedena na Obrázku č. 12. Minimální doba zelené t_i je určena v TP 81 Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení provozu na pozemních komunikacích jako 5 s pro vozidla, chodce, cyklisty a tramvaje. [01] Vstupní doba jednotkového vozidla do křižovatky byla zvolena jako 2 s.

| SIG SKUP | VA | VB | VC | VD | KA | KC | KD | SA | SB | SD | PA | PB | PC | PD |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| VA | | 8 | | 5 | 6 | 4 | | | 4 | 4 | | 7 | | |
| VB | 4 | | 7 | | 4 | 7 | 6 | 3 | | | 4 | | 4 | 6 |
| VC | 4 | 4 | | 8 | 3 | | 8 | | 4 | | 7 | | 4 | |
| VD | 7 | | 4 | | 7 | 4 | | | | | | 6 | | 4 |
| KA | | 4 | 1 | 1 | | | 1 | | | | | 4 | | |
| KC | 2 | 1 | | 4 | | | 4 | 2 | | | | | | 4 |
| KD | 5 | 2 | 1 | | 7 | 1 | | | 2 | | 5 | | | |
| SA | | 3 | | | | 3 | | | | | 4 | | | |
| SB | | | 2 | | | | 3 | | | | | 4 | | |
| SD | 2 | | | | | | | | | | | | | 4 |
| PA | 10 | | 7 | | | | 7 | 10 | | | | | | |
| PB | | 12 | | 7 | 7 | | | | 12 | | | | | |
| PC | 5 | | 8 | | | | | | | | | | | |
| PD | | 7 | | 14 | | 7 | | | | 14 | | | | |

| | | | |
|-----------------------|--|---|--|
| VEDOUcí PROJEKTANT | ING. ONDŘEJ HÁJEK |  | PATRIOT® spol. s r.o. Hybešova 46 602 00 BRNO tel. 43 23 49 38 fax 43 21 25 81 |
| ZODPOVĚDNÝ PROJEKTANT | ING. ONDŘEJ HÁJEK | | |
| VYPRACOVAL | ING. ONDŘEJ HÁJEK | | |
| KRESEL | | | |
| KONTROLOVAL | VÍT PLEVA | | |
| OKRESNÍ ÚŘAD | CHRUĐIM | | DATUM 06/98 |
| INVESTOR | MĚSTO HLINSKO | | FORMAT 1 x A4 |
| NÁZEV AKCE | HLINSKO SSZ ADÁMKOVA - RESSLOVA | | MĚŘÍTKO |
| | | | STUPEŇ DSP |
| | | | Č. ZAKÁZKY |
| | | | ARCHIVNÍ Č. |
| NÁZEV VÝKRESU | TABULKA MEZIČASŮ | Č. VÝKRESU | 10.5 |

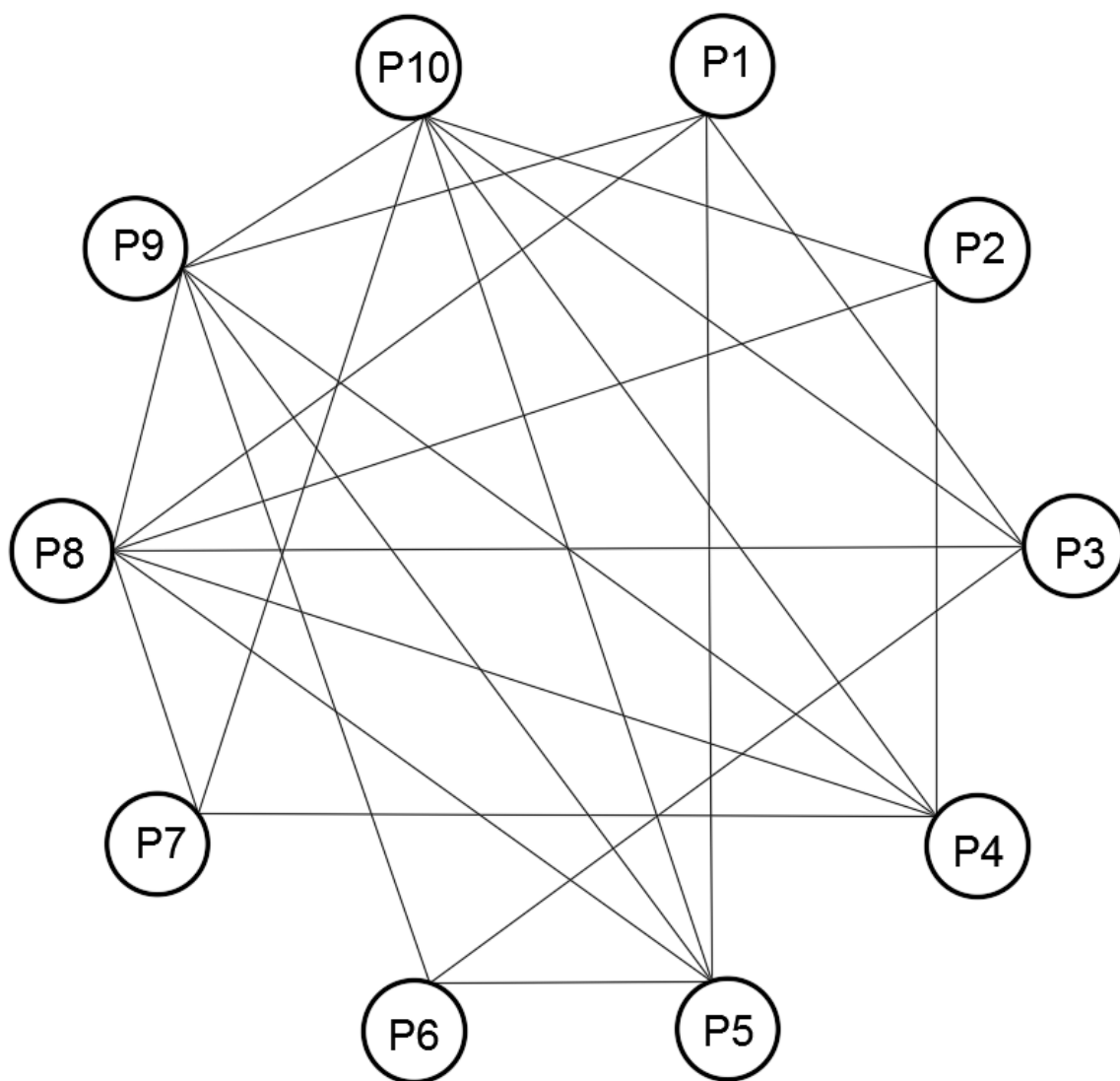
Obr. č. 12: Tabulka mezičasů [04]

5. Příprava vstupních dat pro optimalizační výpočet – tvorba mezičasových podmínek

Aby bylo možno vytvořit mezičasové podmínky pro matematický model uvedený v kapitole 3, je nutno určit optimální pořadí fází, čemuž je věnována kapitole 5. Vstupními daty pro vytvoření optimálního pořadí fází jsou množina proudů a hodnoty mezičasů.

5.1 Graf bezkoliznosti

Graf bezkoliznosti byl vytvořen na základě zásad uvedených výše v teoretické části. Pro zjednodušení byly v grafu vynechány signální skupiny pro pěší pro zjednodušení orientace, doplněny budou až ve vybraných fázích. Graf bezkoliznosti je uveden na obrázku č. 13.



Obr. č 13: Graf bezkoliznosti

5.2 Množina fází

Na základě grafu bezkoliznosti byla určena množina všech možných fází signálního plánu – klik grafu (maximálních kompletních podgrafů).

Soupis fází:

$$F_1 = \{P_1, P_5, P_8, P_9\}$$

$$F_2 = \{P_1, P_3, P_8\}$$

$$F_3 = \{P_2, P_4, P_9, P_{10}\}$$

$$F_4 = \{P_3, P_6, P_{10}\}$$

$$F_5 = \{P_4, P_7, P_8, P_{10}\}$$

$$F_6 = \{P_5, P_8, P_9, P_{10}\}$$

$$F_7 = \{P_5, P_6, P_9, P_{10}\}$$

$$F_8 = \{P_3, P_8, P_{10}\}$$

$$F_9 = \{P_4, P_8, P_9, P_{10}\}$$

Z těchto fází byl následně proveden výběr minimálního počtu fází obsahujícího všechny signální skupiny (viz 3.4.3 Výběr minimálního počtu fázových skupin).

5.3 Výběr minimálního počtu fází

Výběr minimálního počtu fází probíhá prostřednictvím řešení matematického modelu ve tvaru:

$$\min f(z) = \sum_{j=1}^9 z_j$$

za podmínek:

$$z_1 + z_2 \geq 1$$

$$z_3 \geq 1$$

$$z_2 + z_4 + z_8 \geq 1$$

$$z_3 + z_5 + z_9 \geq 1$$

$$z_1 + z_6 + z_7 \geq 1$$

$$z_4 + z_7 \geq 1$$

$$z_5 \geq 1$$

$$z_1 + z_2 + z_5 + z_6 + z_8 + z_9 \geq 1$$

$$z_1 + z_3 + z_6 + z_7 + z_9 \geq 1$$

$$z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7 + z_8 + z_9 \geq 1$$

$$z_j \in \{0; 1\} \text{ pro } j = 1, \dots, 9$$

Text programu v optimalizačním software Xpress-IVE na základě kterého byl vybrán minimální počet fází má tvar:

```
model vyber_fazi
uses "mmxprs";
declarations
faze=1..9
z:array(faze)of mpvar
end-declarations
z(1)+z(2)>=1
z(3)>=1
z(2)+z(4)+z(8)>=1
z(3)+z(5)+z(9)>=1
z(1)+z(6)+z(7)>=1
z(4)+z(7)>=1
z(5)>=1
z(1)+z(2)+z(5)+z(6)+z(8)+z(9)>=1
z(1)+z(3)+z(6)+z(7)+z(9)>=1
z(3)+z(4)+z(5)+z(6)+z(7)+z(8)+z(9)>=1
suma:=sum (j in faze)z(j)
minimize(suma)
writeln("Vybrane faze jsou: ",getobjval)
forall(i in faze)writeln("z(",i,")=",getsol(z(i)))
```

end-model

Výpis výsledků tohoto modelu:

Vybrane faze jsou: 4

$$z(1)=1$$

$$z(2)=0$$

$$z(3)=1$$

$$z(4)=1$$

$$z(5)=1$$

$$z(6)=0$$

$$z(7)=0$$

$$z(8)=0$$

$$z(9)=0$$

Řešení I.

$$F_1 = \{P_1, P_5, P_8, P_9\}$$

$$F_3 = \{P_2, P_4, P_9, P_{10}\}$$

$$F_4 = \{P_3, P_6, P_{10}\}$$

$$F_5 = \{P_4, P_7, P_8, P_{10}\}$$

Jak je patrné, každému proudu bude umožněn vstup do křižovatky.

Protože však Program Xpress-IVE ukončí optimalizační výpočet při nalezení prvního optima, nevypíše alternativní optima, pokud existují. Bylo tedy hledáno, zda neexistuje alternativní optimální řešení. Toto alternativní optimum bylo nalezeno a má tvar:

Řešení II.

$$F_2 = \{P_1, P_3, P_8\}$$

$$F_3 = \{P_2, P_4, P_9, P_{10}\}$$

$$F_5 = \{P_4, P_7, P_8, P_{10}\}$$

$$F_7 = \{P_5, P_6, P_9, P_{10}\}$$

Následně bylo prostřednictvím optimalizačního software Xpress-IVE ověřeno, zda je dané řešení opravdu řešením optimálním. To se provádí tak, že uvažované řešení se formou dodatečných podmínek doplní do textu programu, optimalizační výpočet se znovu provede a prostřednictvím hodnoty účelové funkce se zkontroluje dosažení stejné hodnoty.

Text programu v optimalizačním software Xpress-IVE, ověřující platnost druhé varianty řešení má tvar:

```
model vyber_fazi
uses "mmxprs";
declarations
faze=1..9
z:array(faze)of mpcvar
end-declarations
z(1)+z(2)>=1
z(3)>=1
z(2)+z(4)+z(8)>=1
z(3)+z(5)+z(9)>=1
z(1)+z(6)+z(7)>=1
z(4)+z(7)>=1
z(5)>=1
z(1)+z(2)+z(5)+z(6)+z(8)+z(9)>=1
z(1)+z(3)+z(6)+z(7)+z(9)>=1
z(3)+z(4)+z(5)+z(6)+z(7)+z(8)+z(9)>=1
z(2)=1
z(3)=1
z(5)=1
z(7)=1
suma:=sum (j in faze)z(j)
minimize(suma)
writeln("Vybrane faze jsou: ",getobjval)
forall(i in faze)writeln("z(",i,")=",getsol(z(i)))
end-model
```

Výpis výsledků tohoto modelu:

Vybrane faze jsou: 4

$$z(1)=0$$

$$z(2)=1$$

$$z(3)=1$$

$$z(4)=0$$

$$z(5)=1$$

$$z(6)=0$$

$$z(7)=1$$

$$z(8)=0$$

$$z(9)=0$$

Byla tedy zjištěna dvě optimální řešení s minimálním počtem fází 4.

Následně byly vybrané fáze doplněny o pěší proudy. Protože by se mohlo stát, že některý proud nebude obsažen v žádné z vybraných fází (příčinou toho je, že pěší proudy byly vynechány v grafu bezkoliznosti a tedy následně i v modelu), muselo být dodatečně ověřeno, že obě tato řešení obsahují všech 14 signálních skupin (tedy včetně skupin chodců). Bylo zjištěno, že obě řešení zahrnovala všechny pěší proudy.

5.4 Určení pořadí fází a optimálního řešení

Byla vytvořena všechna možná pořadí fází v obou řešeních, přičemž byla dodržena základní podmínka bezprostřední návaznosti fází obsahujících stejný proud. Dodržením návaznosti se rozumí nutnost řadit tyto fáze vedle sebe, avšak v libovolném pořadí. Například, obsahují-li stejný proud fáze F_3 a F_5 , potom bezprostřední návazností fází se rozumí pořadí $F_3 - F_5$ (fáze F_5 následuje bezprostředně po fázi F_3) nebo také pořadí $F_5 - F_3$ (fáze F_3 následuje bezprostředně po fázi F_5). Níže jsou barevně vyznačeny stejné proudy nacházející se ve více fázích zároveň:

Řešení I.

$$F_1 = \{P_1, P_5, P_8, P_9, P_{14}\}$$

$$F_3 = \{P_2, P_4, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{13}\}$$

$$F_4 = \{P_3, P_6, P_{10}, P_{12}\}$$

$$F_5 = \{P_4, P_7, P_8, P_{10}, P_{13}\}$$

U Řešení I. toto znamená nutnost dodržet návaznost fází F_3 a F_5 , F_1 a F_5 , F_1 a F_3 a také bezprostřední návaznost F_3 , F_4 a F_5 . Tyto uvedené bezprostřední návaznosti se však vzájemně vylučují, z vybraného minimálního počtu fází tak nelze stanovit pořadí fází, které by splňovalo požadavek na všechny bezprostřední návaznosti.

Řešení II.

$$F_2 = \{P_1, P_3, P_8, P_{12}, P_{14}\}$$

$$F_3 = \{P_2, P_4, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{13}\}$$

$$F_5 = \{P_4, P_7, P_8, P_{10}, P_{13}\}$$

$$F_7 = \{P_5, P_6, P_9, P_{10}\}$$

U Řešení II. jsou podmínky návaznosti mezi fázemi: F_3 a F_5 , F_2 a F_5 , F_3 a F_7 a také bezprostřední návaznost F_3 , F_5 a F_7 . Z tohoto vyplynou dvě možná řešení uvedená v tabulce č. 2.

Tabulka č. 2: Možná pořadí fází

| označení řešení | pořadí fází | součet rozhodujících mezičasů |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| II.1 | $F_2 - F_5 - F_3 - F_7 / F_2$ | 30 |
| II.2 | $F_5 - F_2 - F_7 - F_3 / F_5$ | 36 |

Pro obě pořadí fází vypočítáme součet rozhodujících mezičasů, který je optimalizačním kritériem pro určení optimálního pořadí. Z vypočítaných součtů rozhodujících mezičasů vybereme minimální. Protože součet rozhodujících mezičasů je minimální u pořadí II.1, je optimálním pořadím fází zachovávajícím základní podmínku přípustnosti (fáze obsahující stejný proud musí následovat bezprostředně za sebou) pořadí II.1.

Bohužel, v případě řešené křižovatky není situace tak jednoduchá, protože vstupují do hry ještě další faktory. Vyskytují se v ní totiž typy signálů, které musejí v navrhovaném signálním plánu zachovat určitá pořadí. K těmto typům signálů patří signály – Doplňková šipka a Vyklizovací šipka.

Skupiny jejichž název začíná písmenem S jsou skupiny jejichž návěstidlo je takzvaná Doplňková šipka (S5). „Šipka svítící současně se signálem s červeným světlem „Stůj!“ nebo se žlutým světlem „Pozor!“ znamená pro řidiče možnost pokračovat v jízdě jen ve směru, kterým šipka nebo šipky ukazují; přitom řidič musí dát přednost v jízdě vozidlům a jezdcům na zvířatech jedoucím ve volném směru a útvarům chodců jdoucím ve volném směru; přitom nesmí ohrozit ani omezit přecházející chodce.“ [14] V algoritmu se skupinami tohoto typu pracují jako s proudem typu V, přičemž jejich

hodnotu intenzit uvažují jako hodnotu intenzity proudu odbočujícího vpravo v daném rameni křižovatky. Tento signál slouží k nabídnutí možnosti odbočit vpravo i mimo zelený signál hlavního návěstidla, protože odbočení vpravo je s většinou proudů nekolizní (nekoliznost je v rámci algoritmu uvažována i v případě, kdy dle zákona dává tento proud druhému proudu přednost).

Posledním typem skupin jsou skupiny označené písmenem K, které mají funkci vyklizovací šipky. Vyklizovací šipka neboli Signál pro opuštění křižovatky S6, umístěná v protilehlém rohu křižovatky znamená, že „*neplatí pro odbočování vlevo povinnost dát přednost v jízdě protijedoucím motorovým i nemotorovým vozidlům, jezdcům na zvířeti, protijedoucím organizovaným útvarům chodců a průvodcům hnaných zvířat se zvířaty, tramvajím jedoucím v obou směrech a vozidlům jedoucím ve vyhrazeném jízdním pruhu, pro něž je tento jízdni pruh vyhrazen*“. [15] Tento signál umožní vozidlům, která najela do křižovatky ve snaze odbočit vlevo a nemohla tak konat kvůli silnému protijedoucímu proudu směřujícímu rovně, bezpečně opustit křižovatku před začátkem další (kolizní) fáze. Tento signál může být použit současně s hlavním návěstidlem pro vozidla, pak ovšem musí být zajištěno bezkolizní odbočení vlevo, neboť vozidla v tomto směru nemusejí dávat přednost. Dále signál vyklizovací šipky může navazovat na konec zeleného signálu návěstidla pro vozidla a slouží k popsanému vyklizení křižovatky. To ale znamená, že je nutné, aby skupiny s funkcí vyklizovací šipky se nacházely ve stejné fázi, jako signální skupina typu V (vždy pro dané rameno křižovatky, ze kterého vozidla najíždí), a dále aby signál vyklizovací šipky byl umístěn ve stejné fázi nebo v poslední z několika následujících fází obsahujících signál typu V.

Z výše zmíněného plyne nutnost při hledání optimálního pořadí fází zařadit dvě dodatečné podmínky. První zajišťuje, aby byly skupiny daného ramene křižovatky typu V a K ve stejné fázi. Znamená to nutnost využít jen tu variantu vybraných fází, která obsahuje fáze toto splňující. Tedy konkrétně musí být v jedné fázi proudy P_1 a P_5 (tedy VA – KA), P_3 a P_6 (VC – KC), P_4 a P_7 (VD – KD). Toto splňuje pouze řešení I., které však bylo vyhodnoceno jako nevyhovující, protože nesplňuje základní podmínku přípustnosti týkající se bezprostřední návaznosti fází obsahujících stejný proud.

Řešení I.:

$$F_1 = \{P_1, P_5, P_8, P_9, P_{14}\}$$

$$F_3 = \{P_2, P_4, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{13}\}$$

$$F_4 = \{P_3, P_6, P_{10}, P_{12}\}$$

$$F_5 = \{P_4, P_7, P_8, P_{10}, P_{13}\}$$

Jak bylo však uvedeno výše, podmínky návaznosti proudů se navzájem vylučují a nelze tak vytvořit pořadí proudů. Proto je nutné počet požadavků na bezprostřední návaznost fází obsahujících stejný proud snížit, aby vytvoření takového pořadí bylo možné. Zároveň je však nutno zachovat i původní pořadí, protože takové pořadí respektuje rozmístění signálů Doplnková šipka a Vyklizovací šipka uvedené v předchozím odstavci.

K odstranění problému, kdy není možno vytvořit pořadí fází splňující základní podmínku bezprostřední návaznosti, však existuje jednoduchý postup. Jeho princip spočívá ve vytvoření fiktivních signálních skupin, které budou druhými díly dob zelených původních proudů, pro které nebylo možno fáze je obsahující seřadit bezprostředně za sebou.

Pro rozdělení jsem zvolila proud číslo 9 SB. Jde o doplňkovou šipku, tedy její rozdělení do dvou proudů není na závadu (na rozdíl od rozdělení skupiny typu V) a hodnota intenzity pro tuto skupinu je nízká. Do řešení bude tedy zařazen nový proud P15. V důsledku vzniku nového proudu bude nutno soustavu omezujících podmínek doplnit o další podmínky.

Po rozdělení proudu P9 na dva proudy P9 a P15 bude vypadat upravené řešení I. (dále značené jako Řešení III.) takto:

$$F_1 = \{P_1, P_5, P_8, P_9, P_{14}\}$$

$$F_3 = \{P_2, P_4, P_{15}, P_{10}, P_{11}, P_{13}\}$$

$$F_4 = \{P_3, P_6, P_{10}, P_{12}\}$$

$$F_5 = \{P_4, P_7, P_8, P_{10}, P_{13}\}$$

Je pak nutno dodržet jen čtyři podmínky návaznosti místo původních pěti: $F_3 - F_5$, $F_1 - F_5$, a $F_3 - F_4 - F_5$. Poté je už možno vytvořit dvě možná pořadí uvedená v tabulce č. 3. Tato řešení jsou označena jako III.1 a III.2.

Tabulka č. 3: Možná pořadí fází v Řešení III

| označení řešení | pořadí fází | součet rozhodujících mezičasů |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| III.1 | $F_4 - F_3 - F_5 - F_1 / F_4$ | 43 |
| III.2 | $F_1 - F_5 - F_3 - F_4 / F_1$ | 39 |

Současně je však nutné uvažovat i další požadavek a sice nutnost toho, aby u proudu typu V, který je obsažen ve více fázích řazených za sebou (v tomto případě jde pouze o proud č. 4 – VD) byl

proud KD k němu náležící zařazen do poslední z navazujících fází. Tedy je nutné dodržet pořadí fází $F_3 - F_5$ a nelze je zaměnit. Toto však splňuje pouze řešení III.1, byť má vyšší součet rozhodujících mezičasů.

Protože všechny podmínky omezující určení optimálního pořadí fází splňuje pouze jediné řešení, není defacto v tomto případě nutné součet rozhodujících mezičasů počítat. Nicméně, pro názornost je možno konkrétní postup výpočtu součtu rozhodujících mezičasů u výsledného Řešení III.1 uvést.

Pro sečtení rozhodujících mezičasů je nutné znát mezičasy pro jednotlivé fázové přechody. Ty se zjistí z tabulky mezičasů vždy pro daný fázový přechod a proudy ve fázích obsažené. Prvky matice mezičasů vztažené k fázovému přechodu $F_4 - F_3$ obsahuje tabulka č. 4, prvky matice mezičasů vztažené k fázovému přechodu $F_3 - F_5$ obsahuje tabulka č. 5, prvky matice mezičasů vztažené k fázovému přechodu $F_5 - F_1$ obsahuje tabulka č. 6 a prvky matice mezičasů vztažené k poslednímu fázovému přechodu $F_1 - F_4$ jdoucímu přes hranici cyklu obsahuje tabulka č. 7. Rozhodující (tedy maximální) mezičasy v uvedených tabulkách jsou podbarveny.

Tabulka č. 4: Fázový přechod $F_4 - F_3$

| končí \ začíná | | F3 | | | | | |
|----------------|-----|----|----|----|-----|-----|-----|
| | | P2 | P4 | P9 | P10 | P11 | P13 |
| F4 | P3 | 4 | 8 | 4 | | 7 | 4 |
| | P6 | 1 | 4 | | | | |
| | P10 | | | | | | |
| | P12 | 12 | 7 | 12 | | | |

Tabulka č. 5: Fázový přechod $F_3 - F_5$

| končí \ začíná | | F5 | | | | |
|----------------|-----|----|----|----|-----|-----|
| | | P4 | P7 | P8 | P10 | P13 |
| F3 | P2 | | 6 | 3 | | |
| | P4 | | | | | |
| | P9 | | 3 | | | |
| | P10 | | | | | |
| | P11 | | 7 | 10 | | |
| | P13 | | | | | |

Tabulka č. 6: Fázový přechod $F_5 - F_1$

| končí \ začíná | | F1 | | | | |
|----------------|-----|----|----|----|-----|-----|
| | | P1 | P5 | P8 | P15 | P14 |
| F5 | P4 | 7 | 7 | | | 4 |
| | P7 | 5 | 7 | | 2 | |
| | P8 | | | | | |
| | P10 | 2 | | | | 4 |
| | P13 | 5 | | | | |

Tabulka č. 7: Fázový přechod $F_1 - F_4$

| končí \ začíná | | F4 | | | |
|----------------|-----|----|----|-----|-----|
| | | P3 | P6 | P10 | P12 |
| F1 | P1 | | 6 | 4 | |
| | P5 | 1 | | | 4 |
| | P8 | | 3 | | |
| | 15 | 2 | | | 4 |
| | P14 | | 7 | 14 | |

Součet rozhodujících mezičasů je tedy $12 + 10 + 7 + 14 = 43$ s.

Nyní tedy známe přesné pořadí fází, které slibuje optimální řešení a je možno z něj určit soustavu mezičasových podmínek. Ty tvoříme na základě jednotlivých tabulek fázových přechodů, obsahujících mezičasy. Sloupce v tabulkách mezičasů značí proudy ve fázích, které začínají a řádky v tabulkách mezičasů reprezentují proudy obsažené v končících fázích. Proto při tvaru mezičasové podmínky $x_j - y_i \geq m_{ij}$ za index j dosadíme index proudu v sloupci tabulky a index i nahradíme indexem proudu v daném řádku tabulky. Za hodnotu m_{ij} je pak dosazena číselná hodnota mezičasu. Například v tabulce č. 4 je mezičas o hodnotě 4 sekundy v sloupci P2 a řádku P3. Mezičasová podmínka pro tento mezičas pak má tvar: $x_2 - y_3 \geq 4$.

Pro poslední fázový přechod přes hranici cyklu se pak používají upravené mezičasové podmínky tvaru: $x_j + c - y_i \geq m_{ij}$. Platí opět stejné zásady doplnění indexů i hodnot mezičasů. Uvedu opět na konkrétním příkladu: v tabulce č. 7 je hodnota mezičasu v sloupci P6 a řádku P1 6 sekund. Mezičasová podmínka pro tento mezičas pak má tvar: $x_6 + c - y_1 \geq 6$. Níže je uvedena soustava všech mezičasových podmínek.

Soustava mezičasových podmínek:

$$\begin{array}{lll}
 x_2 - y_3 \geq 4 & x_4 - y_3 \geq 8 & x_9 - y_3 \geq 4 \\
 x_{11} - y_3 \geq 7 & x_{13} - y_3 \geq 4 & x_2 - y_6 \geq 1 \\
 x_4 - y_6 \geq 4 & x_2 - y_{12} \geq 12 & x_4 - y_{12} \geq 7 \\
 x_9 - y_{12} \geq 12 & x_7 - y_2 \geq 6 & x_8 - y_2 \geq 3 \\
 x_7 - y_9 \geq 3 & x_7 - y_{11} \geq 7 & x_8 - y_{11} \geq 10 \\
 x_1 - y_4 \geq 7 & x_5 - y_4 \geq 7 & x_{14} - y_4 \geq 4 \\
 x_1 - y_7 \geq 5 & x_5 - y_7 \geq 7 & x_{15} - y_7 \geq 2 \\
 x_1 - y_{10} \geq 2 & x_{14} - y_{10} \geq 4 & x_1 - y_{13} \geq 5 \\
 x_6 + c - y_1 \geq 6 & x_{10} + c - y_1 \geq 4 & x_3 + c - y_5 \geq 1 \\
 x_{12} + c - y_5 \geq 4 & x_6 + c - y_8 \geq 3 & x_3 + c - y_{15} \geq 2 \\
 x_{12} + c - y_{15} \geq 4 & x_6 + c - y_{14} \geq 7 & x_{10} + c - y_{14} \geq 14
 \end{array}$$

Kromě mezičasových podmínek je však nutno ještě v modelu provést ještě další dvě úpravy. První úprava souvisí s rozdělením proudu P9 na proudy P9 a P15. Předně je nutno zachovat, aby i proud P15 měl splněnu podmínku minimální doby zelené, tedy bude doplněna podmínka:

$$y_{15} - x_{15} \geq 5$$

a dále, že průměrně požadovaná doba zelené pro proud P9 bude pokryta nabízenými dobami zelených pro proudy P9 a P15, tedy

$$(y_{15} - x_{15}) + (y_9 - x_9) \geq \frac{T_9 * q_9 * c * u}{3600}$$

Druhá úprava vyplývá z podmínek pro zavádění Vyklizovací šipky do signálních plánů. Jak bylo již výše uvedeno, tyto skupiny musí začínat v průběhu (tedy nejdříve společně se začátkem a nejdéle s koncem) zelené signálů pro vozidla V. Toto je zajištěno následujícími podmínkami:

$$x_1 \leq x_5 \leq y_1$$

$$x_3 \leq x_6 \leq y_3$$

$$x_4 \leq x_7 \leq y_4$$

Doba zelené pro proudy K musí končit nejdříve zároveň s koncem žluté proudů V, případně trvat déle. Délka žluté je stanovena na 3 sekundy, což je minimální doba signálu Pozor (žlutá) pro vozidla určená v TP 81. [01] Toto je zajištěno podmínkami:

$$y_5 \geq y_1 + 3$$

$$y_6 \geq y_3 + 3$$

$$y_7 \geq y_4 + 3$$

Obecně je doporučená délka zelené u signálu pro opuštění křižovatky alespoň 7 sekund, i toto bylo tedy zajištěno pomocí podmínek:

$$y_5 - x_5 \geq 7$$

$$y_6 - x_6 \geq 7$$

$$y_7 - x_7 \geq 7$$

Dále byla doplněna podmínka:

$$x_{14} \geq y_7$$

Tato podmínka zajišťuje, aby nebyl současně řazen zelený signál pro proud pěších PD a vyklizovací šipku KD (proud číslo 14 PD může začít nejdříve zároveň s koncem proudu č. 7 KD). Tyto proudy jsou navzájem kolizní – pro signál pro opuštění křižovatky neplatí povinnost dát přednost v jízdě protijedoucím motorovým i nemotorovým vozidlům ani protijedoucím organizovaným útvarům chodců, proto nelze proud chodců PD, křížící dráhu proudu KD, řadit současně.

Délka zelených signálů pro pěší byla převzata z původních signálních plánů, protože ve stávající dokumentaci ke světelné signalizaci nejsou určeny hodnoty intenzit proudů chodců.

Využitím všech omezujících podmínek v této a předešlé podkapitole byl získán funkční matematický model, který je popsán v podkapitole 3.3 a byl zadán do programu Xpress-IVE, který vypočítal konkrétní hodnoty výsledků.

6. Matematický model posuzované křižovatky a jeho řešení

6.1 Kompletní matematický model

Kompletní matematický model pro minimalizaci délky cyklu c má tvar:

$$\min f(x, y, c) = c$$

za podmínek:

$$y_1 - x_1 \geq \frac{124}{3600} \cdot c \cdot 2 \cdot 1$$

$$y_2 - x_2 \geq \frac{103}{3600} \cdot c \cdot 2 \cdot 1$$

$$y_3 - x_3 \geq \frac{158}{3600} \cdot c \cdot 2 \cdot 1$$

$$y_4 - x_4 \geq \frac{108}{3600} \cdot c \cdot 2 \cdot 1$$

$$y_5 - x_5 \geq \frac{18}{3600} \cdot c \cdot 2 \cdot 1$$

$$y_6 - x_6 \geq \frac{39}{3600} \cdot c \cdot 2 \cdot 1$$

$$y_7 - x_7 \geq \frac{65}{3600} \cdot c \cdot 2 \cdot 1$$

$$y_8 - x_8 \geq \frac{116}{3600} \cdot c \cdot 2 \cdot 1$$

$$y_{10} - x_{10} \geq \frac{30}{3600} \cdot c \cdot 2 \cdot 1$$

$$((y_9 - x_9) + (y_{15} - x_{15})) \geq \frac{19}{3600} \cdot c \cdot 2 \cdot 1$$

$$x_2 - y_3 \geq 4$$

$$x_4 - y_3 \geq 8$$

$$x_9 - y_3 \geq 4$$

$$x_{11} - y_3 \geq 7$$

$$x_{13} - y_3 \geq 4$$

$$x_2 - y_6 \geq 1$$

$$x_4 - y_6 \geq 4$$

$$x_2 - y_{12} \geq 12$$

$$x_4 - y_{12} \geq 7$$

$$x_9 - y_{12} \geq 12$$

$$x_7 - y_2 \geq 6$$

$$x_8 - y_2 \geq 3$$

$$x_7 - y_9 \geq 3$$

$$x_7 - y_{11} \geq 7$$

$$x_8 - y_{11} \geq 10$$

$$x_1 - y_4 \geq 7$$

$$x_5 - y_4 \geq 7$$

$$x_{14} - y_4 \geq 4$$

$$x_1 - y_7 \geq 5$$

$$x_5 - y_7 \geq 7$$

$$x_{15} - y_7 \geq 2$$

$$x_1 - y_{10} \geq 2$$

$$x_{14} - y_{10} \geq 4$$

$$x_1 - y_{13} \geq 5$$

$$x_6 + c - y_1 \geq 6$$

$$x_{10} + c - y_1 \geq 4$$

$$x_3 + c - y_5 \geq 1$$

$$x_{12} + c - y_5 \geq 4$$

$$x_6 + c - y_8 \geq 3$$

$$x_3 + c - y_{15} \geq 2$$

$$x_{12} + c - y_{15} \geq 4$$

$$x_6 + c - y_{14} \geq 7$$

$$x_{10} + c - y_{14} \geq 14$$

$$x_5 \geq x_1$$

$$x_6 \geq x_3$$

$$x_7 \geq x_4$$

$$x_5 \leq y_1$$

$$x_6 \leq y_3$$

$$x_7 \leq y_4$$

$$y_5 \geq y_1 + 3$$

$$y_6 \geq y_3 + 3$$

$$y_7 \geq y_4 + 3$$

$$y_5 - x_5 \geq 7$$

$$y_6 - x_6 \geq 7$$

$$y_7 - x_7 \geq 7$$

$$y_{11} - x_{11} \geq 9$$

$$y_{12} - x_{12} \geq 8$$

$$y_{13} - x_{13} \geq 13$$

$$y_{14} - x_{14} \geq 8$$

$$x_{14} \geq y_7$$

$$y_1 - x_1 \geq 5$$

$$y_2 - x_2 \geq 5$$

$$y_3 - x_3 \geq 5$$

$$y_4 - x_4 \geq 5$$

$$y_5 - x_5 \geq 5$$

$$y_6 - x_6 \geq 5$$

$$y_7 - x_7 \geq 5$$

$$y_8 - x_8 \geq 5$$

$$y_9 - x_9 \geq 5$$

$$y_{10} - x_{10} \geq 5$$

$$y_{11} - x_{11} \geq 5$$

$$y_{12} - x_{12} \geq 5$$

$$y_{13} - x_{13} \geq 5$$

$$y_{14} - x_{14} \geq 5$$

$$y_{15} - x_{15} \geq 5$$

$$y_1 \leq c$$

$$y_2 \leq c$$

$$y_3 \leq c$$

$$y_4 \leq c$$

$$y_5 \leq c$$

$$y_6 \leq c$$

$$y_7 \leq c$$

$$y_8 \leq c$$

$$y_9 \leq c$$

$$y_{10} \leq c$$

$$y_{11} \leq c$$

$$y_{12} \leq c$$

$$y_{13} \leq c$$

$$y_{14} \leq c$$

$$y_{15} \leq c$$

$$x_1 \geq 0$$

$$x_2 \geq 0$$

$$x_3 \geq 0$$

$$x_4 \geq 0$$

$$x_5 \geq 0$$

$$x_6 \geq 0$$

$$x_7 \geq 0$$

$$x_8 \geq 0$$

$$x_9 \geq 0$$

$$x_{10} \geq 0$$

$$x_{11} \geq 0$$

$$x_{12} \geq 0$$

$$x_{13} \geq 0$$

$$x_{14} \geq 0$$

$$x_{15} \geq 0$$

$$y_1 \geq 0$$

$$y_2 \geq 0$$

$$y_3 \geq 0$$

$$y_4 \geq 0$$

$$y_5 \geq 0$$

$$y_6 \geq 0$$

$$y_7 \geq 0$$

$$y_8 \geq 0$$

$$y_9 \geq 0$$

$$y_{10} \geq 0$$

$$y_{11} \geq 0$$

$$y_{12} \geq 0$$

$$y_{13} \geq 0$$

$$y_{14} \geq 0$$

$$y_{15} \geq 0$$

$$y_i \in Z_0^+$$

$$c \geq 0$$

Hodnoty intenzit dopravy a délek zelených signálů pro pěší uvedené v kompletním matematickém modelu jsou dosazeny pro období poledního sedla pracovního dne. Pro ostatní období jsou tyto hodnoty uvedeny v podkapitole 6.2.

6.2 Text programu v optimalizačním software Xpress-IVE

Text programu v optimalizačním software Xpress-IVE, na základu kterého bude ověřena kvalita stávajícího signálního plánu pro období sedla všedního dne má tvar:

```
model Krizovatka_signalni_plan
uses "mmxprs"
declarations
proud=1..15
q:array(proud)of real
tau:array(proud)of real
tmin:array(proud)of real
x:array(proud)of mpvar
y:array(proud)of mpvar
c:mpvar
end-declarations

u:=1
q::[124,103,158,108,18,39,65,116,19,30]
tau::[2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2]
tmin::[5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5]
forall(i in proud)y(i)-x(i)>=tmin(i)
forall(i in 1..8)y(i)-x(i)>=q(i)*c*tau(i)*u/3600
forall(i in 10..14)y(i)-x(i)>=q(i)*c*tau(i)*u/3600
(y(15)-x(15))+y(9)-x(9)>=q(9)*c*tau(9)*u/3600
x(2)-y(3)>=4
x(4)-y(3)>=8
x(9)-y(3)>=4
x(11)-y(3)>=7
```


$$x(13)-y(3)\geq 4$$

$$x(2)-y(6)\geq 1$$

$$x(4)-y(6)\geq 4$$

$$x(2)-y(12)\geq 12$$

$$x(4)-y(12)\geq 7$$

$$x(9)-y(12)\geq 12$$

$$x(7)-y(2)\geq 6$$

$$x(8)-y(2)\geq 3$$

$$x(7)-y(9)\geq 3$$

$$x(7)-y(11)\geq 7$$

$$x(8)-y(11)\geq 10$$

$$x(1)-y(4)\geq 7$$

$$x(5)-y(4)\geq 7$$

$$x(14)-y(4)\geq 4$$

$$x(1)-y(7)\geq 5$$

$$x(5)-y(7)\geq 7$$

$$x(15)-y(7)\geq 2$$

$$x(1)-y(10)\geq 2$$

$$x(14)-y(10)\geq 4$$

$$x(1)-y(13)\geq 5$$

$$x(6)+c-y(1)\geq 6$$

$$x(10)+c-y(1)\geq 4$$

$$x(3)+c-y(5)\geq 1$$

$$x(12)+c-y(5)\geq 4$$

$$x(6)+c-y(8)\geq 3$$

$$x(3)+c-y(15)\geq 2$$

$$x(12)+c-y(15)\geq 4$$

$$x(6)+c-y(14)\geq 7$$

$$x(10)+c-y(14)\geq 14$$

$$x(5)\geq x(1)$$

$$x(6)\geq x(3)$$

```

x(7)>=x(4)
x(5)<=y(1)
x(6)<=y(3)
x(7)<=y(4)
y(5)>=y(1)+3
y(6)>=y(3)+3
y(7)>=y(4)+3
y(5)-x(5)>=7
y(6)-x(6)>=7
y(7)-x(7)>=7
y(11)-x(11)>=9
y(12)-x(12)>=8
y(13)-x(13)>=13
y(14)-x(14)>=8
x(14)>=y(7)
forall(i in proud)y(i)<=c
forall(i in proud)x(i)is_integer
forall(i in proud)y(i)is_integer
delka_cyklu:=c
minimize(delka_cyklu)
writeln("minimální délka cyklu je: ", getobjval," s ")
writeln("začátky zelených pro jednotlivé proud jsou")
forall(i in proud)writeln("x(",i,")=",getsol(x(i)))
writeln("konce zelených pro jednotlivé proudy jsou")
forall(i in proud)writeln("y(",i,")=",getsol(y(i)))
writeln("délky dob zelených jsou")
forall(i in proud)writeln("y(",i,")-x(",i,")=",getsol(y(i)-x(i)))
end-model

```

Texty programů pro ověření ostatních stávajících signálních plánů a návrhy signálních plánů pro intenzity získané zkráceným dopravním průzkumem jsou analogické, liší se pouze v hodnotách intenzit a hodnotách délky zeleného signálu pro pěší.

Pro období poledního sedla pracovního dne jsou dle dokumentace ke stávajícímu signálnímu plánu dosazovány intenzity:

q::[124,103,158,108,18,39,65,116,19,30]

Pro období odpolední špičky pracovního dne jsou dle dokumentace ke stávajícímu signálnímu plánu dosazovány intenzity:

q::[207,129,270,135,49,47,88,159,40,40]

Pro období špičky v sobotu jsou dle dokumentace ke stávajícímu signálnímu plánu dosazovány intenzity:

q::[215,182,236,159,51,50,69,136,56,50]

Pro období poledního sedla pracovního dne jsou dle aktuálně naměřených hodnot dosazovány intenzity:

q::[213,157,279,216,32,82,216,213,29,24]

Pro období odpolední špičky pracovního dne jsou dle aktuálně naměřených hodnot dosazovány intenzity:

q::[234,202,328,284,44,105,284,234,56,23]

Pro období poledního sedla pracovního dne jsou dle dokumentace k stávající SSZ dosazovány podmínky určující hodnotu délky zeleného signálu pro pěší:

$$y_{11} - x_{11} \geq 9 \quad y_{12} - x_{12} \geq 8 \quad y_{13} - x_{13} \geq 13 \quad y_{14} - x_{14} \geq 8$$

Pro období odpolední špičky pracovního dne jsou dle dokumentace k stávající SSZ dosazovány podmínky určující hodnotu délky zeleného signálu pro pěší:

$$y_{11} - x_{11} \geq 12 \quad y_{12} - x_{12} \geq 10 \quad y_{13} - x_{13} \geq 13 \quad y_{14} - x_{14} \geq 10$$

Pro období špičky v sobotu jsou dle dokumentace k stávající SSZ dosazovány podmínky určující hodnotu délky zeleného signálu pro pěší:

$$y_{11} - x_{11} \geq 12 \quad y_{12} - x_{12} \geq 10 \quad y_{13} - x_{13} \geq 15 \quad y_{14} - x_{14} \geq 10$$

6.3 Výpis výsledků optimalizačního výpočtu

Výpis výsledků optimalizačního výpočtu pro období poledního sedla pracovního dne (PL1):

| | | |
|------------|------------|------------------|
| $x(1)=43$ | $y(1)=48$ | $y(1)-x(1)=5$ |
| $x(2)=20$ | $y(2)=25$ | $y(2)-x(2)=5$ |
| $x(3)=0$ | $y(3)=5$ | $y(3)-x(3)=5$ |
| $x(4)=15$ | $y(4)=31$ | $y(4)-x(4)=16$ |
| $x(5)=45$ | $y(5)=52$ | $y(5)-x(5)=7$ |
| $x(6)=0$ | $y(6)=8$ | $y(6)-x(6)=8$ |
| $x(7)=31$ | $y(7)=38$ | $y(7)-x(7)=7$ |
| $x(8)=31$ | $y(8)=36$ | $y(8)-x(8)=5$ |
| $x(9)=20$ | $y(9)=25$ | $y(9)-x(9)=5$ |
| $x(10)=4$ | $y(10)=9$ | $y(10)-x(10)=5$ |
| $x(11)=12$ | $y(11)=21$ | $y(11)-x(11)=9$ |
| $x(12)=0$ | $y(12)=8$ | $y(12)-x(12)=8$ |
| $x(13)=9$ | $y(13)=22$ | $y(13)-x(13)=13$ |
| $x(14)=38$ | $y(14)=46$ | $y(14)-x(14)=8$ |
| $x(15)=40$ | $y(15)=45$ | $y(15)-x(15)=5$ |

Výpis výsledků optimalizačního výpočtu pro období odpolední špičky pracovního dne (PL2):

| | | |
|------------|------------|------------------|
| $x(1)=49$ | $y(1)=56$ | $y(1)-x(1)=7$ |
| $x(2)=26$ | $y(2)=31$ | $y(2)-x(2)=5$ |
| $x(3)=1$ | $y(3)=10$ | $y(3)-x(3)=9$ |
| $x(4)=21$ | $y(4)=37$ | $y(4)-x(4)=16$ |
| $x(5)=52$ | $y(5)=59$ | $y(5)-x(5)=7$ |
| $x(6)=3$ | $y(6)=13$ | $y(6)-x(6)=10$ |
| $x(7)=37$ | $y(7)=44$ | $y(7)-x(7)=7$ |
| $x(8)=53$ | $y(8)=59$ | $y(8)-x(8)=6$ |
| $x(9)=26$ | $y(9)=31$ | $y(9)-x(9)=5$ |
| $x(10)=9$ | $y(10)=14$ | $y(10)-x(10)=5$ |
| $x(11)=17$ | $y(11)=29$ | $y(11)-x(11)=12$ |
| $x(12)=4$ | $y(12)=14$ | $y(12)-x(12)=10$ |
| $x(13)=14$ | $y(13)=27$ | $y(13)-x(13)=13$ |
| $x(14)=44$ | $y(14)=54$ | $y(14)-x(14)=10$ |
| $x(15)=46$ | $y(15)=46$ | $y(15)-x(15)=0$ |

Výpis výsledků optimalizačního výpočtu pro období špičky v sobotu (PL3):

| | | |
|------------|------------|------------------|
| $x(1)=47$ | $y(1)=55$ | $y(1)-x(1)=8$ |
| $x(2)=22$ | $y(2)=29$ | $y(2)-x(2)=7$ |
| $x(3)=0$ | $y(3)=9$ | $y(3)-x(3)=9$ |
| $x(4)=17$ | $y(4)=35$ | $y(4)-x(4)=18$ |
| $x(5)=49$ | $y(5)=58$ | $y(5)-x(5)=9$ |
| $x(6)=0$ | $y(6)=12$ | $y(6)-x(6)=12$ |
| $x(7)=35$ | $y(7)=42$ | $y(7)-x(7)=7$ |
| $x(8)=38$ | $y(8)=43$ | $y(8)-x(8)=5$ |
| $x(9)=22$ | $y(9)=27$ | $y(9)-x(9)=5$ |
| $x(10)=4$ | $y(10)=10$ | $y(10)-x(10)=6$ |
| $x(11)=16$ | $y(11)=28$ | $y(11)-x(11)=12$ |
| $x(12)=0$ | $y(12)=52$ | $y(12)-x(12)=10$ |
| $x(13)=13$ | $y(13)=49$ | $y(13)-x(13)=15$ |
| $x(14)=42$ | $y(14)=54$ | $y(14)-x(14)=10$ |
| $x(15)=44$ | $y(15)=46$ | $y(15)-x(15)=5$ |

Výpis výsledků optimalizačního výpočtu pro období poledního sedla pracovního dne na základě aktuálně naměřených hodnot intenzit dopravy (PL1a):

| | | |
|------------|-------------|------------------|
| $x(1)=46$ | $y(1)=53$ | $y(1)-x(1)=7$ |
| $x(2)=23$ | $y(2)=28$ | $y(2)-x(2)=5$ |
| $x(3)=0$ | $y(3)=9$ | $y(3)-x(3)=9$ |
| $x(4)=18$ | $y(4)=34$ | $y(4)-x(4)=16$ |
| $x(5)=48$ | $y(5)=56$ | $y(5)-x(5)=8$ |
| $x(6)=2$ | $y(6)=12$ | $y(6)-x(6)=10$ |
| $x(7)=34$ | $y(7)=41$ | $y(7)-x(7)=7$ |
| $x(8)=35$ | $y(8)=42$ | $y(8)-x(8)=7$ |
| $x(9)=23$ | $y(9)=28$ | $y(9)-x(9)=5$ |
| $x(10)=6$ | $y(10)=11$ | $y(10)-x(10)=5$ |
| $x(11)=16$ | $y(11)=25$ | $y(11)-x(11)=9$ |
| $x(12)=3$ | $y(12)=811$ | $y(12)-x(12)=8$ |
| $x(13)=13$ | $y(13)=26$ | $y(13)-x(13)=13$ |

| | | |
|------------|------------|-----------------|
| $x(14)=41$ | $y(14)=49$ | $y(14)-x(14)=8$ |
| $x(15)=43$ | $y(15)=48$ | $y(15)-x(15)=5$ |

Výpis výsledků optimalizačního výpočtu pro období odpolední špičky pracovního dne na základě aktuálně naměřených hodnot intenzit dopravy (PL2a):

| | | |
|------------|------------|------------------|
| $x(1)=56$ | $y(1)=65$ | $y(1)-x(1)=9$ |
| $x(2)=26$ | $y(2)=34$ | $y(2)-x(2)=8$ |
| $x(3)=1$ | $y(3)=14$ | $y(3)-x(3)=13$ |
| $x(4)=22$ | $y(4)=40$ | $y(4)-x(4)=18$ |
| $x(5)=61$ | $y(5)=68$ | $y(5)-x(5)=7$ |
| $x(6)=3$ | $y(6)=17$ | $y(6)-x(6)=14$ |
| $x(7)=40$ | $y(7)=51$ | $y(7)-x(7)=11$ |
| $x(8)=59$ | $y(8)=68$ | $y(8)-x(8)=9$ |
| $x(9)=26$ | $y(9)=31$ | $y(9)-x(9)=5$ |
| $x(10)=7$ | $y(10)=12$ | $y(10)-x(10)=5$ |
| $x(11)=21$ | $y(11)=33$ | $y(11)-x(11)=12$ |
| $x(12)=4$ | $y(12)=14$ | $y(12)-x(12)=10$ |
| $x(13)=18$ | $y(13)=31$ | $y(13)-x(13)=13$ |
| $x(14)=51$ | $y(14)=61$ | $y(14)-x(14)=10$ |
| $x(15)=53$ | $y(15)=53$ | $y(15)-x(15)=0$ |

Tabulka č. 8 obsahuje hodnoty současných a optimalizačním výpočtem získaných dob cyklů podle jednotlivých signálních plánů.

Tabulka č. 8: Výpis výsledků – délka cyklů

| Plán | Současná délka cyklu [s] | Optimalizačním výpočtem navrhovaná délka cyklu [s] |
|------|--------------------------|--|
| PL1 | 60 | 56 |
| PL2 | 75 | 59 |
| PL3 | 75 | 62 |
| PL1a | – | 57 |
| PL2a | – | 68 |

Ve všech třech případech původních signálních plánů došlo na základě výsledku optimalizačního výpočtu ke zkrácení délky cyklu. I při zvýšených intenzitách získaných ze zkráceného dopravního průzkumu nedošlo k překročení současných délek cyklů v signálních plánech PL1 a PL2. Protože

vypočítané hodnoty délek cyklů nejsou kratší o více než 10 s, lze konstatovat, že současné signální plány se z hlediska délky cyklu příliš neliší od délek cyklu zjištěných optimalizačním výpočtem na základě intenzit získaných při zkráceném dopravním průzkumu.

Tabulka č. 9 obsahuje stávající (v současných signálních plánech) a optimalizačním výpočtem navrhované hodnoty dob zelených v sekundách pro jednotlivé signální plány PL1, PL2 a PL3.

Tabulka č. 9: Výpis výsledků

| Proud | PL1 | | | PL2 | | | PL3 | | |
|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | Současnost | Návrh | Změna | Současnost | Návrh | Změna | Současnost | Návrh | Změna |
| P1 | 12 | 5 | -7 | 14 | 7 | -7 | 16 | 8 | -12 |
| P2 | 9 | 5 | -4 | 12 | 5 | -7 | 14 | 7 | -7 |
| P3 | 12 | 5 | -7 | 20 | 9 | -11 | 18 | 9 | -9 |
| P4 | 15 | 16 | +1 | 20 | 16 | -4 | 20 | 18 | -2 |
| P5 | 16 | 7 | -9 | 18 | 7 | -11 | 20 | 9 | -11 |
| P6 | 15 | 8 | -7 | 23 | 10 | -13 | 21 | 12 | -9 |
| P7 | 7 | 7 | 0 | 9 | 7 | -2 | 7 | 7 | 0 |
| P8 | 5 | 5 | 0 | 7 | 6 | -1 | 7 | 5 | -2 |
| P9 | 7 | 10 | +3 | 15 | 5 | -10 | 15 | 5 | -10 |
| P10 | 14 | 5 | -9 | 27 | 5 | -22 | 25 | 6 | -19 |
| P11 | 9 | 9 | 0 | 12 | 12 | 0 | 12 | 12 | 0 |
| P12 | 8 | 8 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 10 | 0 |
| P13 | 13 | 13 | 0 | 13 | 13 | 0 | 15 | 15 | 0 |
| P14 | 8 | 8 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 10 | 0 |

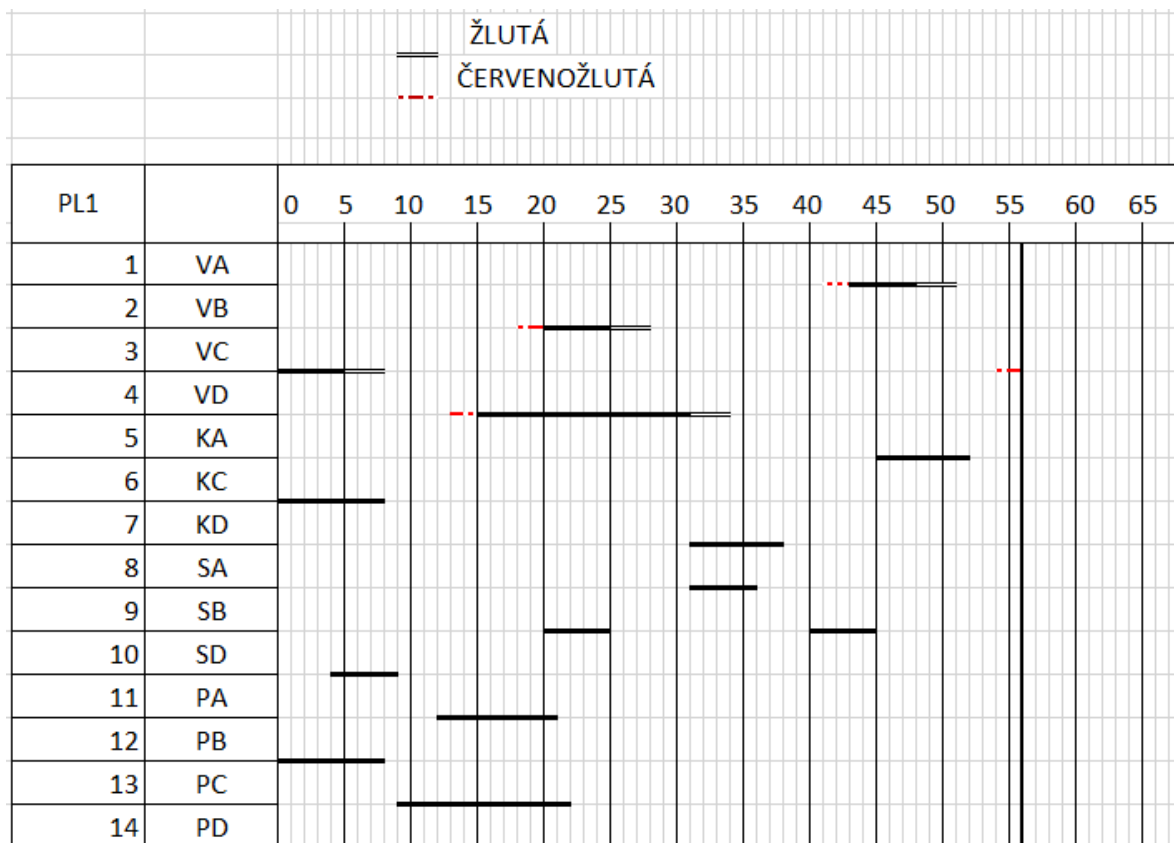
V 4,8 % případů došlo k prodloužení dob zelených i při zkrácení celkových délek cyklu.

Tabulka č. 10 obsahuje optimalizačním výpočtem navrhované hodnoty dob zelených v sekundách pro jednotlivé signální plány PL1a, PL2a.

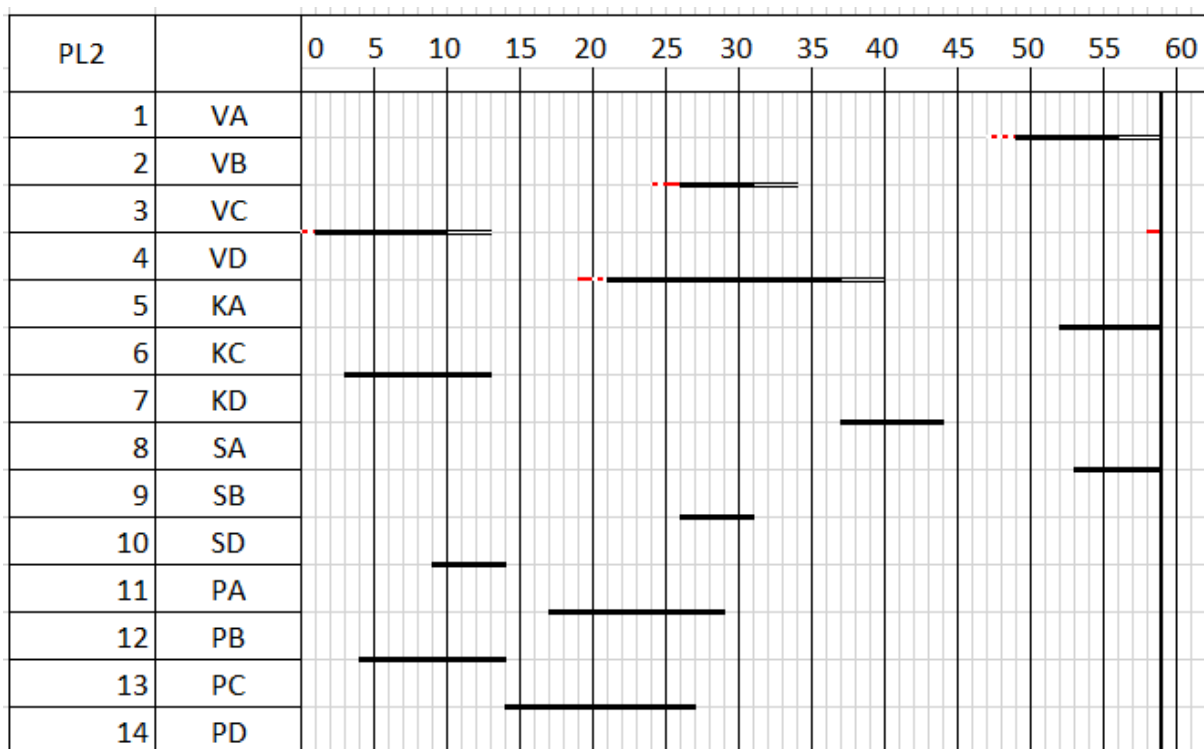
Výsledky výpočtu byly graficky znázorněny v jednotlivých signálních plánech: signální plán PL1 jako obrázek č. 14, signální plán PL2 jako obrázek č. 15, signální plán PL3 jako obrázek č. 16, signální plán PL1a jako obrázek č. 17 a signální plán PL2a jako obrázek č. 18.

Tabulka č. 10: Výpis výsledků signálních plánů PL1a a PL2a

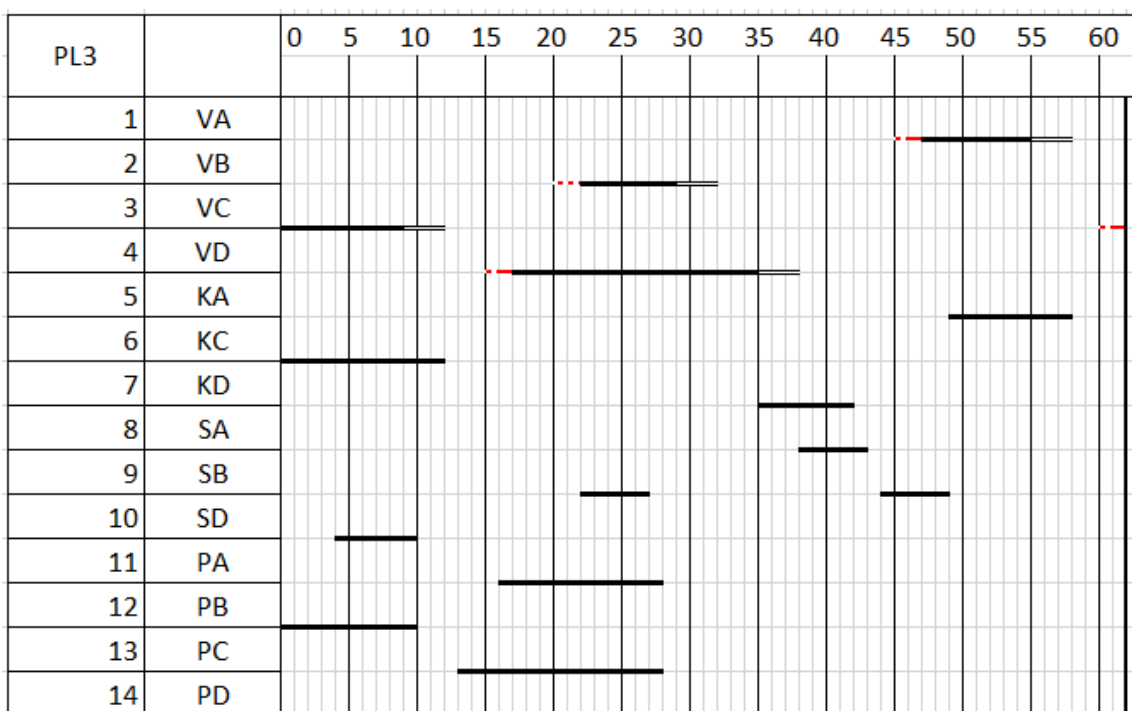
| Proud | PL1a | PL2a |
|-------|-------|-------|
| | Návrh | Návrh |
| P1 | 7 | 9 |
| P2 | 5 | 8 |
| P3 | 9 | 13 |
| P4 | 16 | 18 |
| P5 | 8 | 7 |
| P6 | 10 | 14 |
| P7 | 7 | 11 |
| P8 | 7 | 9 |
| P9 | 10 | 5 |
| P10 | 5 | 5 |
| P11 | 9 | 12 |
| P12 | 8 | 10 |
| P13 | 13 | 13 |
| P14 | 8 | 10 |



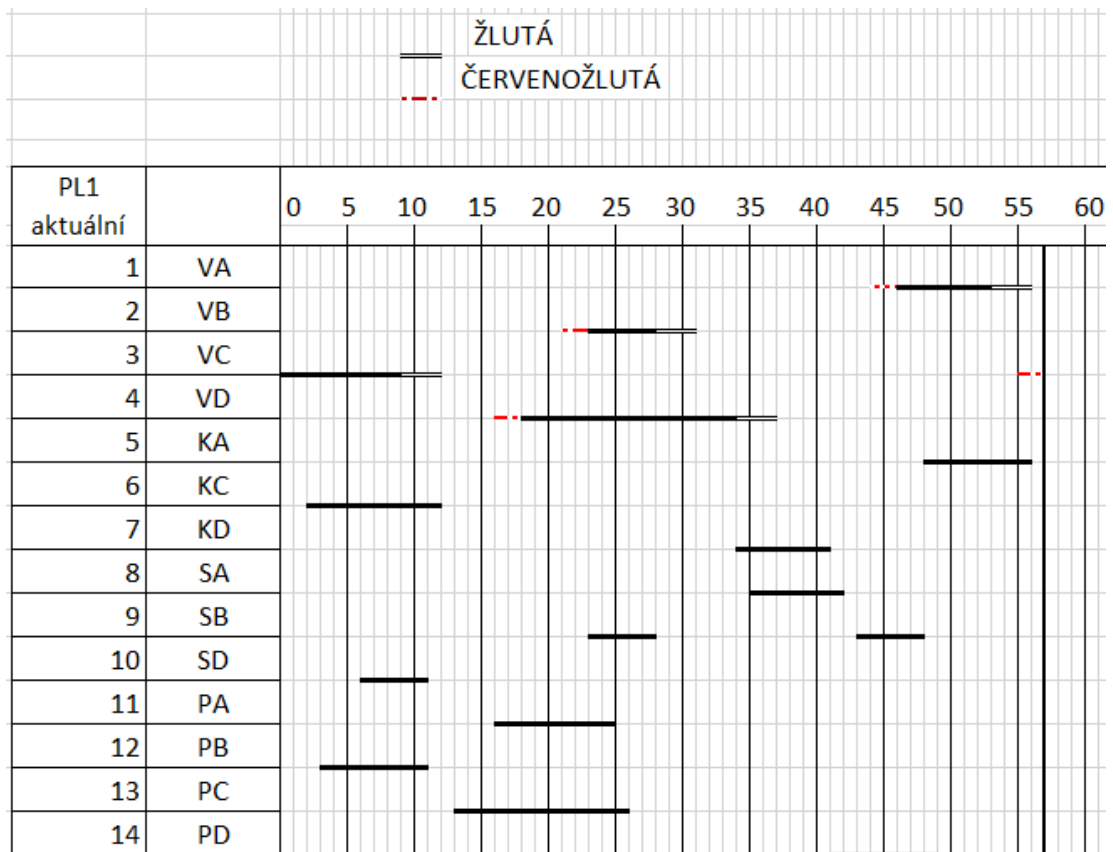
Obr. č. 14: Signální plán PL1 vytvořený na základě výsledků optimalizačního výpočtu



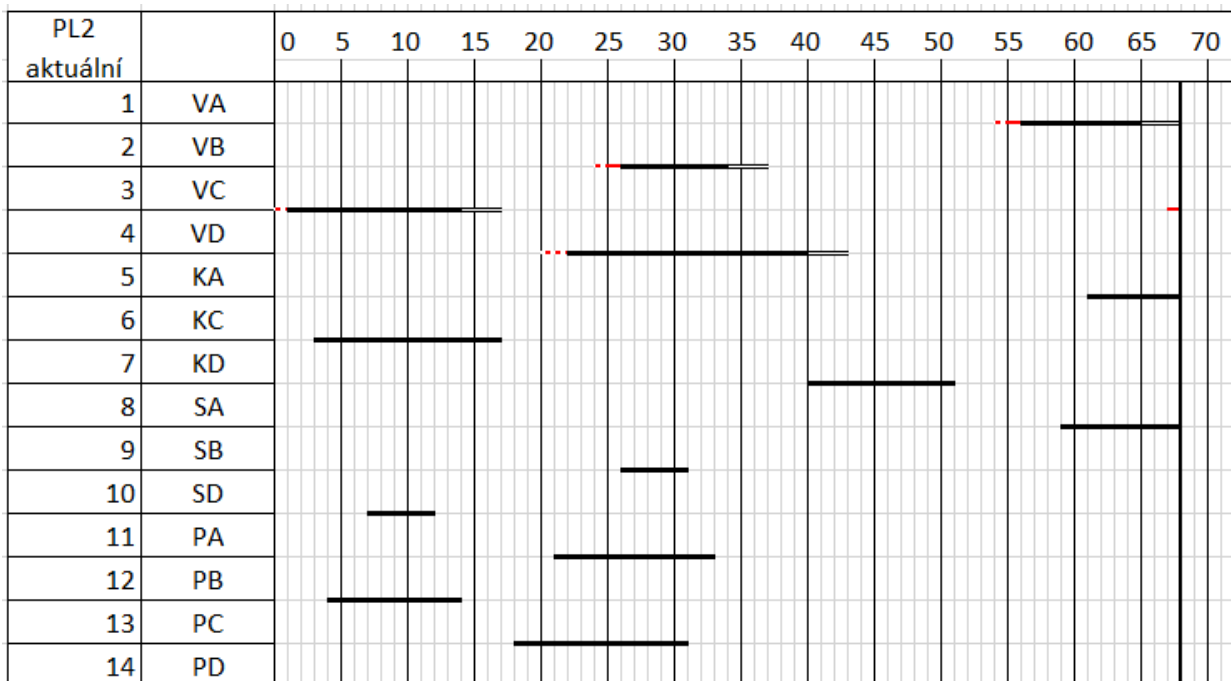
Obr. č. 15: Signální plán PL2 vytvořený na základě výsledků optimalizačního výpočtu



Obr. č. 16: Signální plán PL3 vytvořený na základě výsledků optimalizačního výpočtu



Obr. č. 17: Signální plán P1La vytvořený na základě výsledků optimalizačního výpočtu



Obr. č. 18: Signální plán P2La vytvořený na základě výsledků optimalizačního výpočtu

7. Závěr

Práce se zabývá ověřením optimality signálního plánu křižovatky Adámkova – Resslerova v Hlinsku pomocí exaktního přístupu navrženého v minulosti pracovníky Výzkumného ústavu dopravního v Žilině pod vedením prof. RNDr. Jana Černého, DrSc., Dr. h. c. Tento postup je v práci obecně přiblížen. Dále je charakterizována řešená křižovatka a její blízké i vzdálené okolí. Práce obsahuje návrh matematického modelu řešené křižovatky a jeho úpravy, výpočetní experiment s tímto modelem, dosažené výsledky a jejich zhodnocení.

Křižovatka Adámkova – Resslerova v Hlinsku je specifická velkým množstvím doplňkových signálů. Kromě čtyř návěstidel pro hlavní vozidla jsou zde tři doplňkové šipky a tři vyklizovací, což vyvolalo nutnost doplnit původní optimalizační model o další skupiny podmínek. Existence doplňkových a vyklizovacích šipek také způsobila, že nebylo možno využít nejvýhodnější pořadí fází z hlediska součtu rozhodujících mezičasů (při tomto pořadí fází nebyly splněny podmínky, za kterých jsou doplňkové a vyklizovací šipky v signálním plánu aktivní).

Určité problémy při řešení se vyskytly ve fázi porovnání optimalizačním výpočtem navržených signálních plánů se současnými signálními plány. Příčiny problému lze spatřovat v tom, že tvůrce původních signálních plánů, nezpracovával tyto signální plány se vstupními daty ve stejné struktuře, jaké jsou používány při návrhu signálního plánu metodami lineárního programování.

Provozovatel současných signálních plánů nebyl schopen definovat, s jakou hodnotou poměrné rezervy tvůrce těchto plánů v době tvorby signálního plánu, uvažoval. Dále nebylo zjistitelné, s jakou hodnotou dob potřebných pro vstup jednotkových vozidel v jednotlivých proudech bylo počítáno. Na základě těchto chybějících typů dat tedy nebylo možno vypočítat požadované doby zelených pro jednotlivé proudy.

Kdyby bylo hypoteticky uvažováno s původními intenzitami vozidlových proudů a s tím, že hodnoty poměrných rezerv byly jednotkové a doby pro vstup jednotkových vozidel ve všech proudech byly 2 s, bylo by možno konstatovat, že optimalizačním výpočtem navržené signální plány přinesou zkrácení délek cyklů, a tedy jejich realizací by došlo ke zvýšení plynulosti provozu na řešené křižovatce.

Z toho lze usuzovat, že v práci použitá metoda výpočtu signálních plánů je efektivnější z hlediska délky cyklu než metody popsané v TP 81, které byly k výpočtu původních signálních plánů použity. Případně je možné, že byla použita při výpočtu stávajících signálních plánů vyšší hodnota minimální poměrné rezervy u , aby délka zelené vyhovovala zvyšování výhledových intenzit dopravy.

8. Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. č. 1: Administrativní členění Pardubického kraje..... | 7 |
| Obr. č. 2: Geografická mapa Pardubického kraje..... | 9 |
| Obr. č. 3: Poloha řešené světelné křižovatky v rámci města Hlinsko | 10 |
| Obr. č. 4: Kritérium intenzity provozu pro zavádění SSZ – původní data, odpolední špička..... | 12 |
| Obr. č. 5: Kritérium intenzity provozu pro zavádění SSZ – aktuální data, polední sedlo..... | 12 |
| Obr. č. 6: Situace SSZ..... | 22 |
| Obr. č. 7: Pentlogram intenzit – polední sedlo pracovního dne..... | 23 |
| Obr. č. 8: Pentlogram intenzit – odpolední špička pracovního dne..... | 24 |
| Obr. č. 9: Pentlogram intenzit – sobotní špička..... | 25 |
| Obr. č. 10: Pentlogram aktuálních intenzit – polední sedlo pracovního dne..... | 26 |
| Obr. č. 11: Pentlogram aktuálních intenzit – odpolední špička pracovního dne..... | 27 |
| Obr. č. 12: Tabulka mezičasů..... | 29 |
| Obr. č. 13: Graf bezkoliznosti..... | 30 |
| Obr. č. 14: Signální plán PL1 vytvořený na základě výsledků optimalizačního výpočtu..... | 53 |
| Obr. č. 15: Signální plán PL2 vytvořený na základě výsledků optimalizačního výpočtu..... | 54 |
| Obr. č. 16: Signální plán PL3 vytvořený na základě výsledků optimalizačního výpočtu..... | 54 |
| Obr. č. 17: Signální plán P1La vytvořený na základě výsledků optimalizačního výpočtu..... | 55 |
| Obr. č. 18: Signální plán P2La vytvořený na základě výsledků optimalizačního výpočtu..... | 55 |

9. Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka č. 1: Seznam signálních skupin..... | 21 |
| Tabulka č. 2: Možná pořadí fází..... | 36 |
| Tabulka č. 3: Možná pořadí fází v Řešení III..... | 38 |
| Tabulka č. 4: Fázový přechod $F_4 - F_3$ | 39 |
| Tabulka č. 5: Fázový přechod $F_3 - F_5$ | 39 |
| Tabulka č. 6: Fázový přechod $F_5 - F_1$ | 40 |
| Tabulka č. 7: Fázový přechod $F_1 - F_4$ | 40 |
| Tabulka č. 8: Výpis výsledků – délka cyklů | 51 |
| Tabulka č. 9: Výpis výsledků..... | 52 |
| Tabulka č. 10: Výpis výsledků signálních plánů PL1a a PL2a..... | 53 |

10. Seznam příloh

Příloha č. 1: Současné signální plány

11. Literatura

- [01] TP 81 „Zásady pro navrhování světelných signalizačních zařízení na pozemních komunikacích“
- [02] ČERNÁ, Anna a Jan ČERNÝ: *Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004. ISBN 80-86530-15-9.
- [03] VOLEK, Josef a Bohdan LINDA: *Teorie grafů, aplikace v dopravě a veřejné správě*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2012. ISBN 978-80-7395-225-9.
- [04] Dopravní inženýrská dokumentace k řešené křižovatce poskytnutá p. M. Jansou

12. Internetové a jiné zdroje

- [1] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD, KRAJSKÁ SPRÁVA ČSÚ V PARDUBICÍCH: *Charakteristika okresu Chrudim*. czso.cz [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z:
https://www.czso.cz/csu/xs/charakteristika_okresu_chrudim
- [2] STATISTICKÁ ROČENKA PARDUBICKÉHO KRAJE 2017: *Administrativní členění Pardubického kraje*. s. 22. [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z:
<https://www.czso.cz/documents/10180/45948594/33009217.pdf/ab30bbd0-7c0f-4f22-8738-5fc609ffb3e7?version=1.11>
- [3] PARDUBICKÝ KRAJ: *Železniční doprava*. pardubickykraj.cz [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z:
https://www.pardubickykraj.cz/externi/osrk/koncept_upvucpk/text/pz_b61b.htm
- [4] DÁLNIČNICE – SILNIČNICE.CZ: *Silnice I/37*. dalnice-silnice.cz. [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z:
<http://www.dalnice-silnice.cz/I/I-37.htm>
- [5] DÁLNIČNICE – SILNIČNICE.CZ: *Silnice I/34*. dalnice-silnice.cz. [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z:
<http://www.dalnice-silnice.cz/I/I-34.htm>
- [6] STATISTICKÁ ROČENKA PARDUBICKÉHO KRAJE 2017: *Geografická mapa Pardubického kraje*. s. 21. [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z:
<https://www.czso.cz/documents/10180/45948594/33009217.pdf/ab30bbd0-7c0f-4f22-8738-5fc609ffb3e7?version=1.11>
- [7] CHRUDIM: *Základní údaje*. chrudim.eu [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z:
<http://www.chrudim.eu/zakladni-udaje/d-6982>
- [8] OFICIÁLNÍ INTERNETOVÉ STRÁNKY MĚSTA HLINSKA: *Vítejte na stránkách města Hlinska!*. hlinsko.cz [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <http://www.hlinsko.cz/mesto>

- [9] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD, VEŘEJNÁ DATABÁZE: *Hlinsko (okres Chrudim)*. vdb.czso.cz [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=profil-uzemi&uzemiprofil=31588&u= VUZEMI 43 571393#w>
- [10] OPENSTREETMAP [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <https://www.openstreetmap.org/search?query=hlinsko#map=15/49.7627/15.9117>
- [11] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD, KRAJSKÁ SPRÁVA ČSÚ V PARDUBICÍCH: *Intenzita silniční dopravy v Pardubickém kraji v roce 2016*. czso.cz [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/xe/intenzita-silnicni-dopravy-v-pardubickem-kraji-v-roce-2016>
- [12] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD: *Statistická ročenka Pardubického kraje – 2017: Motorová a přípojná vozidla podle krajů k 31. 12. 2016*. [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/rocenky_souhrn
- [13] *Část 1: Lineární programování*. s. 1. [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <http://www2.ef.jcu.cz/~jfrieb/tspp/data/teorie/LP.pdf>
- [14] BEZPEČNÉ CESTY: *Světelné signály: Kód S 5, Doplnková šipka*. bezpecnecesty.cz. [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <https://www.bezpecnecesty.cz/cz/autoskola/dopravni-znacky/svetelne-signaly/s-5-doplňkova-zelena-sipka>
- [15] BEZPEČNÉ CESTY: *Světelné signály: Kód S 6, Signál pro opuštění křižovatky*. bezpecnecesty.cz. [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <https://www.bezpecnecesty.cz/cz/autoskola/dopravni-znacky/svetelne-signaly/s-6-signal-pro-opusteni-krizovatky>