



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Petra Staňková

**SÍŤOVÁ ČASOVÁ KOORDINACE SPOJŮ MĚSTSKÉ
HROMADNÉ DOPRAVY V PARDUBICÍCH**

Diplomová práce

2020



K617 **Ústav logistiky a managementu dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Petra Staňková

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – LA – Logistika a řízení dopravních procesů

Název tématu (česky): **Sít'ová časová koordinace spojů městské hromadné dopravy v Pardubicích**

Název tématu (anglicky): **Nets Time Coordination Public Transportation in Pardubice**

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- analýza přestupních vazeb ve vybrané části linkové sítě veřejné hromadné dopravy v Pardubicích,
- identifikace základních provozních faktorů ovlivňujících časovou koordinaci spojů v podmínkách města Pardubice,
- obecná charakteristika optimalizačních přístupů vhodných pro řešení problému,
- návrh matematického modelu pro sít'ovou časovou koordinaci spojů veřejné hromadné dopravy v podmínkách města Pardubice,
- výpočetní část - výpočetní experimenty s navrženými matematickými modely,
- zhodnocení výsledků dosažených ve výpočetních experimentech,
- návrh implementace výsledků do reálného provozu.



- Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 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
Surovec, P.: Tvorba systému mestskej hromadnej dopravy. Žilinská univerzita v Žiline, Žilina, 1999

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

Datum zadání diplomové práce: **29. června 2019**

(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 diplomové práce: **18. května 2020**

- 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. Tomáš Horák, Ph.D.

vedoucí

Ústavu logistiky a managementu dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.

děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Petra Staňková

jméno a podpis studenta

V Praze dne29. června 2019

Poděkování

Ráda bych zde poděkovala vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Dušanu Teichmannovi PhD. za odborné vedení a konzultování diplomové práce a předání mnoha znalostí. Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Kamilovi Nenutilovi z Dopravního podniku města Pardubice za poskytnutí podkladů k vypracování této práce. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

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 9. srpna 2020

.....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

SÍŤOVÁ ČASOVÁ KOORDINACE SPOJŮ MĚSTSKÉ HROMADNÉ DOPRAVY V
PARDUBICÍCH

diplomová práce

srpen 2020

Petra Staňková

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce Síťová časová koordinace spojů městské hromadné dopravy v Pardubicích je analyzovat přestupní vazby ve vybrané části linkové sítě veřejné hromadné dopravy v Pardubicích, charakterizovat optimalizační přístupy vhodné k řešení tohoto problému, dále navrhnout matematický model pro síťovou časovou koordinaci spojů veřejné hromadné dopravy v podmínkách města Pardubice, na jeho základu provést výpočetní experiment a zhodnotit výsledky dosažené ve výpočetních experimentech.

ABSTRACT

This diploma thesis Nets time coordination public transportation in Pardubice deals with problems of a nets time coordination of transfer linkage in conditions of the system of a public transport in Pardubice. The subject of this diploma thesis is to analyze the present condition of the transfer linkage, characterize suitable optimization methods for this matter, design a mathematical model of the nets time coordination, made a computing experiment on its base and compare the calculated solution with the existing solution.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

SÍŤOVÁ ČASOVÁ KOORDINACE SPOJŮ MĚSTSKÉ HROMADNÉ DOPRAVY V
PARDUBICÍCH

diplomová práce

srpen 2020

Petra Staňková

KLÍČOVÁ SLOVA

- Pardubice, městská hromadná doprava, přestupní vazby, přestupní uzel, optimalizace, matematický model, Xpress-IVE

KEY WORDS

- Pardubice, public transport, transfer linkage, transfer hub, optimization, mathematical model, Xpress-IVE

Obsah

Obsah.....	5
1. Úvod	7
2. Charakteristika sítě linek MHD v Pardubicích	8
2.1. Historie Dopravního podniku města Pardubic	8
2.2. Vývoj sítě trolejbusových linek DPmP	9
2.3. Současná síť linek MHD v Pardubicích	13
3. Analýza koordinovaných přestupních vazeb.....	14
3.1. Cíle koordinace	14
3.2. Charakteristika vybraných přestupních uzlů	15
3.3. Charakteristika koordinovaných linek MHD.....	17
3.4. Analýza přestupních vazeb vybraných linek MHD v Pardubicích.....	20
4. Charakteristika použitého optimalizačního exaktního přístupu	25
4.1. Základní model časové koordinace přestupů – vstupní údaje a užívané proměnné	25
4.2. Základní model časové koordinace přestupů – obecný matematický model	27
5. Matematický model pro časovou koordinaci spojů v podmínkách města Pardubic	31
5.1. Označení vstupních údajů a proměnných užívaných v upraveném modelu.....	31
5.2. Rozšíření modelu o podmínky provozních požadavků.....	33
5.3. Vstupní data pro optimalizační výpočet.....	35
5.4. Kompletní matematický model.....	38
6. Optimalizační software Xpress-IVE	42
6.1. Pracovní prostředí Xpress-IVE a jeho funkce	42
6.2. Transformace matematického modelu do jazyku Mosel.....	43
6.3. Text programu v optimalizačním software Xpress-IVE	46
6.4. Výpis výsledků optimalizačního výpočtu.....	55
6.5. Zhodnocení dosažených výsledků výpočetního experimentu	63
7. Závěr.....	66
8. Použitá literatura.....	68
9. Seznam obrázků	69
10. Seznam tabulek.....	70

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

MHD městská hromadná doprava

DpM P Dopravní podnik města Pardubic

1. Úvod

Pardubice jsou krajským městem s 90 000 obyvateli a rozlohou 78 km² [1]. Městská hromadná doprava zde funguje od roku 1950 a postupně se rozvíjela s nárůstem rozlohy města a počtu obyvatel. Síť linek MHD nebyla nikdy systematizována, a proto obsahuje pouze linky radiální a diametrální, reflektující trasy prvních linek, ke kterým byly přidávány dle potřeby nové linky. Z toho důvodu není obsluha nejvýznamnějších center občanské vybavenosti optimální.

Hromadná osobní doprava má významnou roli v plnění základních funkcí osídlených oblastí. Zlepšování kvality hromadné dopravy, její techniky, technologie a organizace může vést k ovlivnění dělby přepravní práce v její prospěch což je při současném postavení individuální automobilové dopravy významné nejen z hlediska úspory energií a kapacity komunikací, ale i ochrany životního prostředí. [2]

V této práci se budu zabývat zlepšením přestupních vazeb oblasti Pardubičky, kde se nachází Krajská nemocnice Pardubice a významná průmyslová zóna, s ostatními částmi města. V současnosti je tato oblast obsluhována jen jednou páteřní linkou, se kterou budou tvořeny přestupní vazby s jinými páteřními linkami.

Cílem práce je vytvořit přestupní vazby mezi určenými linkami na základě matematického modelu časové koordinace spojů v přestupním uzlu vytvořeného v roce 2007 prof. RNDr. Jaroslavem Janáčkem CSc. z Fakulty řízení a informatiky Žilinské univerzity v Žilině.

V práci je charakterizována síť MHD v Pardubicích včetně historické souvislosti jejího vývoje, analyzovány přestupní vazby ve vybrané části linkové sítě MHD a jsou identifikovány základní provozní faktory ovlivňující časovou koordinaci spojů v podmínkách města Pardubice. Dále je charakterizován optimalizační přístup vhodný pro řešení časové koordinace spojů a podrobně popsán návrh matematického modelu pro síťovou časovou koordinaci spojů veřejné dopravy v podmínkách města Pardubice. V závěru jsou zhodnoceny výsledky dosažené výpočetními experimenty.

2. Charakteristika sítě linek MHD v Pardubicích

2.1. Historie Dopravního podniku města Pardubic

V roce 1845 byla zprovozněna parostrojní železnice z Vídně přes Olomouc a Pardubice do Prahy. Následně byly budovány další železniční tratě do Hradce Králové a do Havlíčkova Brodu. Díky těmto významným dopravním tepnám se Pardubice na počátku 19. století začaly rychle rozvíjet a posléze svým významem zastínily i tehdejší krajské město Chrudim. Spolu s rozvojem techniky se na přelomu 19. a 20. století začaly budovat elektrické městské pouliční dráhy a zájem o městskou dopravu se projevil i v Pardubicích.

Obecně lze konstatovat, že nejprve byla prosazována tramvajová doprava, která v té době primárně spojovala nádraží, často se nacházející na okraji města, s jeho centrem. Staré nádraží v Pardubicích se však tehdy nacházelo poměrně blízko nově vznikajícího centra, a proto bylo v projektu Ing. Arnošta Rosy uvažováno kromě dráhy na území města i s propojením Pardubic s Chlumcem nad Cidlinou přes Bohdaneč jako suplementace nerealizované železnice. V té době se do popředí zájmu dostala i levnější verze elektrické dráhy bezkolejové a mezi akcionáři projektu tramvajové malodráhy vznikly spory, které budování elektrické dráhy odsunuly téměř o padesát let.

První pravidelnou dopravou na území Pardubic se tak v roce 1908 stala autobusová doprava prostřednictvím dvou linek Pardubice – Holice a Pardubice – Bohdaneč, které byly provozovány c.k. rakousko-uherskou poštou. Později vzniklo několik autobusových linek ČSD, jejich nabídka však byla malá a nebyl proto o ně ze strany obyvatel velký zájem. Významný návrat k myšlence výstavby pouliční městské dráhy nastal až po druhé světové válce, kdy v listopadu 1945 Východočeské elektrárny zpracovaly studii na vybudování sítě trolejového vedení. Ta počítala s třemi okružními a dvěma příměstskými trolejbusovými linkami s vedením:

- nádraží – Skřivánek – Na Zavadilce – letiště – Popkovice – Svítkov – PARAMO – Palackého – nádraží
- nádraží – Skřivánek – Slovany – Kostelíček – Stalinova tř. – nádraží
- nádraží – Skřivánek – krematorium – Nemošice – Pardubičky – nemocnice – Kostelíček – Stalinova tř. – nádraží
- nádraží – Stalinova tř. – Sv. Josef – Trnová – Doubravice – Explosia Semtín – Horka – Bohdaneč
- nádraží – Stalinova tř. – Na Židově – Hůrka – Počaply – Sezemice

Dále mělo vzniknout spojení závodu Explosie přes Rosice nad Labem do Starého Hradiště a smyčka Brozany, Ráby, Kunětická hora a Hradiště na Písku a několik tratí na území dnešního sídliště Polabiny.

V roce 1949 byla vypracována nová výrazně střízlivější a proveditelnější studie stavby trolejbusových tratí a bylo rozhodnuto o její realizaci. 1. dubna 1950 byl založen Dopravní komunální podnik města Pardubic, který měl za cíl vybudovat a provozovat síť trolejbusových linek. První národní správce pan Ladislav Holubář prosadil původně neplánované zavedení autobusové dopravy na trase připravované trolejbusové linky A (později linka č. 1) z Jesničánek přes staré nádraží k nemocnici již měsíc po založení DPmP, aby podnik již od svého počátku mohl sloužit obyvatelům Pardubic. Postupně přibyla linka č. 2, zpočátku též obsluhována autobusy, a konečně první trolejbusová linka č. 3. Poté následovaly další linky, které se dnes řadí mezi páteřní. V roce 1953 byla zkolaudována první část vozovny a dílenského zázemí na Dukle, kde dopravní podnik sídlí dodnes. [3]

2.2. Vývoj sítě trolejbusových linek DPmP

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, první linkou byla autobusová linka č. 1, která jezdila od začátku května 1950 na trase Jesničánky – (staré) nádraží – divadlo – nemocnice. Současně s jejím uvedením do provozu začala výstavba první trolejbusové trati do Semtína a Bohdanče a tzv. městské trati z Jesničánek k nemocnici. Až o tři roky později v červnu 1953 se tato linka změnila z autobusové na trolejbusovou se shodným vedením. V roce 1959 byla přesunuta konečná stanice této linky na Slovany. Linka č. 1 na trase Jesničánky – Masarykovo náměstí – divadlo – Slovany jezdí dodnes.

Rok po vytvoření první linky byla přidána druhá linka, též zpočátku obsluhována autobusy, na trase Svítkov – Dukla – divadlo – Slovany. Tato trasa měla být později vybavena trolejovým vedením, to se ale nikdy nestalo a Svítkov je i dnes obsluhován pouze autobusy. Trolejbusová linka č. 2 začala fungovat až v roce 1954 a obsluhovala pouze část původní trasy linky č. 2 – úsek Jesničánky – divadlo – Slovany. Úsek Svítkov – divadlo byl obsluhován novou autobusovou linkou č. 4. V roce 1958 byla trolejbusová linka č. 2 načas zrušena a její provoz se obnovil o rok později s pozměněnou trasou (nové) nádraží – divadlo – nemocnice. K dnešní podobě se trolejbusová linka č. 2 přiblížila v roce 1996, kdy byla její konečná protažena z nádraží až do zastávky Polabiny konečná. Konečně v roce 2017 byla prodloužena trasa linky č. 2 do nově postaveného obratiště Zámeček do její aktuální podoby.

Linka č. 3, jejíž provoz byl zahájen v lednu 1952, byla první trolejbusovou linkou v Pardubicích. Její trasa byla (staré) nádraží – letní stadion – Trnová – Semtín – UMA – Lázně Bohdaneč. Po dostavbě vozovny na Dukle byla na čas prodloužena z nádraží až na vozovnu, později však byla z úsporných opatření opět zkrácena a její konečná změněna ze starého nádraží na nové nádraží. V roce 1988 po opravě mostu P. Wonky získala trasa této linky dnešní podobu: nádraží – náměstí Budovatelů (dnes Masarykovo náměstí) – Stavařov – Trnová – Semtín – UMA – Lázně Bohdaneč.

Linka č. 4 byla doplňkovou autobusovou linkou k lince č. 2, jak je uvedeno výše. Až v roce 1990 se stala trolejbusovou a její trasa byla změněna do podoby nádraží – náměstí Budovatelů – Polabiny konečná. Později došlo ke zkrácení trasy na třídu Míru a linka získala polookružní charakter s trasou Polabiny – třída Míru – Masarykovo náměstí – Polabiny. Dnes slouží jako doplňková linka k linkám č. 2 a 11.

V roce 1956 byla přidána ke stávající síti trolejbusová linka č. 5 Dukla vozovna – divadlo – Slovany. Po dostavbě dvou nových trolejových úseků v roce 1965 byla prodloužena do stanice Dukla točna a Sakařovou ulicí na Židov a na této trase jezdí dodnes s prodloužením do točny Dubina sever, od roku 2002, kdy byla tato točna dokončena.

Linka č. 6, která byla v provozu od roku 1958 na trase nové nádraží – divadlo – Židov, byla první autobusovou linkou, která nebyla později změněna na trolejbusovou. O dva roky později byla prodloužena až na Hůrka, ale rok nato byla kvůli rekonstrukci Dašické ulice a výstavbě nadjezdu u nemocnice zrušena. Znovu vyjela v roce 1962 na nové trase krematorium – Skřivánek – Anenský podjezd – divadlo a později prodloužena ze zastávky divadlo přes Trnovou do Ohrazenic. Od roku 1970 má aktuální podobu Dukla náměstí – Koněvovo nám. (dnes Zborovské nám.) – krematorium – divadlo – nádraží – Polabiny – Kréta.

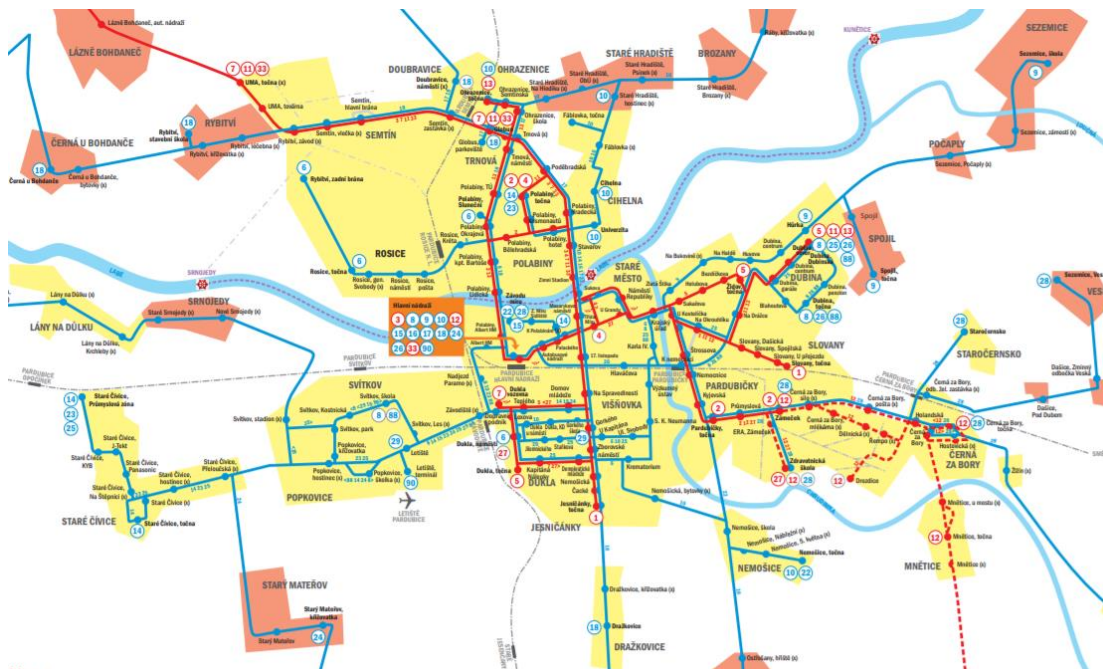
Číslem 7 byly původně označovány výpomocné spoje zajišťující dopravu zaměstnanců Východočeských chemických závodů do chemické oblasti v Semtíně. Jako regulérní trolejbusová linka vyjela až v roce 1960 na trase Dukla vozovna – tř. Míru – Trnová – Semtín – UMA. Později byla ze tř. Míru přesměrována na nám. Budovatelů a až v roce 2003 získala svou aktuální podobu Dukla vozovna – Zborovské náměstí – Masarykovo náměstí – Globus –

Semtín – UMA. V tomtéž roku jako linka č. 7 vznikla i autobusová linka č. 8 s trasou Dukla náměstí – Skřivánek – Veselka – nádraží a o rok později i pomocná autobusová linka č. 9, která byla zavedena během stavby nadjezdu u nemocnice a později opět zrušena. Jako stálá linka se objevuje opět v roce 1963 na trase Rosice nám. – nádraží – divadlo. V roce 1962 byla vytvořena i autobusová linka č. 10 nádraží – Dukla náměstí – Koněvovo náměstí. Trasy všech třech autobusových linek prošly mnohými změnami a byly významně prodlouženy až do dnešní podoby příměstských linek. Linka č. 8 má dnes polookružní trasu Dubina – Masarykovo nám. – nádraží – Svítkov – nádraží – Masarykovo náměstí – Dubina, linka č. 9 trasu nádraží – Masarykovo náměstí – halda – Dubina – Spožil – Sezemice a linka č. 10 trasu Ostřešany – Nemošice – Dukla – nádraží – Masarykovo náměstí – Cihelna – Fáblovka – Staré Hradiště – Ohrazenice.

Provoz trolejbusové linky č. 11 byl zahájen v roce 1964 a její trasa byla v souběhu s linkou č. 3 až do Trnové, odkud pokračovala na točnu zřízenou u železniční zastávky Semtín. Později byla označena za přebytečnou a vzhledem k problémům s trolejovým vedením v oblasti semtínské točny byla změněna na autobusovou linku a prodloužena do Pardubiček. V roce 2003 byla její trasa významně změněna do současné podoby Dubina – Drážka – nám. Republiky – Polabiny – Globus – UMA. Poslední páteřní trolejbusovou linkou se stala linka č. 13, která vznikla až s dokončením výstavby trolejového vedení na novém sídlišti Dubina a jezdila na trase Dubina – Drážka – Masarykovo náměstí – nádraží – Polabiny a později byla prodloužena až do Ohrazenic. [4] Později byly přidány ještě dvě trolejbusové linky – posilová linka č. 27 jezdící pouze ve všední dny a doplňková linka č. 33. Celou síť pak postupně doplnily autobusové linky č. 12, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23, 24, 25, 26 a 28. Plán sítě MHD v Pardubicích z roku 1980 je znázorněn na obrázku č. 1. Při porovnání s aktuálním plánem sítě MHD na obrázku č. 2 je zřetelné, že se síť téměř nezměnila, pouze některé linky byly prodlouženy (např. linka č. 9 původně končící ve Spojilu dnes zajíždí až do Sezemice).



Obr. č. 1: Dobové schéma MHD v Pardubicích z roku 1980 [5]



Obr. č. 2: Aktuální schéma MHD v Pardubicích z roku 2019 [6]

2.3. Současná síť linek MHD v Pardubicích

Jak je naznačeno v přechozí kapitole, síť linek MHD v Pardubicích vznikala postupně ode dvou nejstarších linek, ke kterým byly dle potřeby rozrůstajícího se města přidávány nové linky. Přestože se trasy linek v průběhu let měnily, šlo obvykle pouze o úpravu jejich původní trasy, která byla dle potřeby zkrácena, prodloužena či částečně přesměrována. Zcela novou trasu však linky získaly pouze výjimečně a šlo převážně o linky doplňkové, příkladem může být linka č. 4, původně sloužící k propojení Svítkova s centrem Pardubic a dnes sloužící jako doplňkové spojení sídliště Polabiny s centrem města.

Trasy linek nebyly nikdy systematicky měněny a dle číslování linek lze snadno určit pořadí, ve kterém vznikaly. Většina linek je radiálních, popřípadě diametrálních a protínají se ve dvou zastávkách tvořících hlavní přestupní body sítě MHD – na zastávce Hlavní nádraží, odkud vychází většina radiálních linek a některé diametrální linky ji protínají a v jejíž blízkosti se nachází i autobusové nádraží, a na zastávce Masarykovo náměstí, které se nachází přibližně v geografickém centru města, které je současně i centrem města ekonomickým.

V současnosti je v Pardubicích provozováno 27 linek denních, 2 linky noční, účelová linka č. 90 zajišťující spojení mezi letištěm a hlavním nádražím navázaná na odlety a přílety dopravních letadel na pardubické letiště, výpomocný spoj zajišťující svoz a odvoz žáků Praktické školy Svítání a dvě nostalgické linky obsluhované historickými vozidly pouze několik dní v roce. Z denních linek je 6 linek posilových, které fungují pouze v pracovní dny (linky č. 4, 22, 25, 26, 27, 29) a dalších 8 linek je doplňkových, které o víkendu jezdí méně než šestkrát denně a slouží ke spojení některé z menších okrajových částí města nebo přilehlých obcí s centrem Pardubic (linky č. 12, 16, 17, 23, 24, 28, 33, 88). Mezi páteřní linky tak patří většina linek trolejbusových (linky č. 1, 2, 3, 5, 7, 11, 13) a část autobusových linek (linky č. 6, 8, 9, 14, 15, 18).

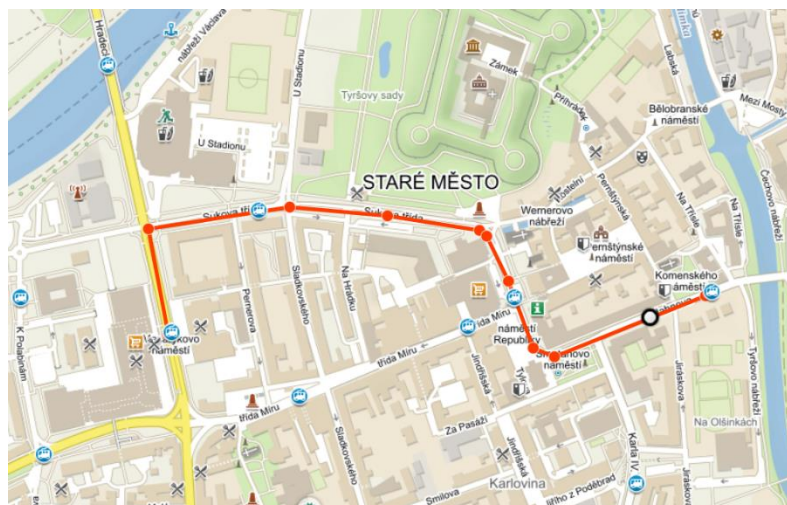
3. Analýza koordinovaných přestupních vazeb

3.1. Cíle koordinace

Cílem koordinace je zlepšit přestupní vazby primárně mezi oblastí Pardubiček (jihovýchod města), kde sídlí krajská Pardubická nemocnice (zastávka Nemocnice) a kde se nachází velká průmyslová zóna včetně jednoho z nejvýznamnějších zaměstnavatelů ve městě, společnosti Foxconn (zastávky Průmyslová, Zámeček) s ostatními částmi města, které nejsou spojeny s Pardubičkami přímou linkou. Tyto jsou severozápadní oblast (Semtín, Rybitví, Ohrazenice a potažmo i sousední město Lázně Bohdaneč, do kterého zajíždí linka č. 3) sídliště Dubina a Slovany na severovýchodě města a sídliště Dukla, Višňovka a Jesničánky na jihu města. Na význam spojení nemocnice s ostatními částmi města poukazuje i trasa první linky MHD v Pardubicích, která toto spojení staré nádraží – centrum – nemocnice původně zajišťovala. Kromě toho byla ke koordinaci určena i linka č. 1 obsluhující východ až jih města s linkou č. 3, která obsluhuje sever města a mezi nimiž existuje silný přestupní proud. Koordinace bude řešena pouze pro jízdní řád platný o víkendu, kdy jsou intervaly mezi spoji delší, a tedy zkrácení přestupní doby má vyšší význam a dále také z důvodu špatné dopravní situace ve městě, kdy se ve špičkách ve všední dny tvoří výrazné kongesce a zachování přestupních vazeb v reálném provozu by z důvodu častých a výrazných zpoždění spojů nebylo možné.

Ke koordinaci byly vybrány páteřní linky, které obsluhují zmiňované části města a jezdí o víkendu v sedle v taktu alespoň 30 minut. Konkrétně jde o trolejbusové linky: linku č. 1 Jesničánky, točna – Slovany, točna, linku č. 2 Polabiny, točna – Zámeček, linku č. 3 Hlavní nádraží – Lázně Bohdaneč, točna, linku č. 11 UMA, točna – Dubina, sever a autobusovou linku č. 6 Rosice, točna – Dukla, náměstí. Vybrané linky se protínají v zastávce Masarykovo náměstí a část z nich (linky č. 1, 2 a 11) též na zastávce Krajský úřad, která je jejich první společnou zastávkou v obou směrech pro linky směřující z oblasti Pardubiček a ze severovýchodní části města (Dubina, Slovany). Proto byly jako přestupní uzly určeny tyto dvě zastávky. Úsek mezi Krajským úřadem a Masarykovým náměstím o délce asi 1,2 km je linkami č. 1 a 2 pojížděn společně a je vyznačen na obrázku č. 3. Vlevo se nachází zastávka Masarykovo náměstí, vpravo pak Krajský úřad. Linka č. 11 také obsluhuje většinu tohoto úseku, ale na křižovatce

ulic Hradecká a Sukova třída neodbočuje vlevo na Masarykovo náměstí, ale vpravo ve směru Polabiny.



Obr. č. 3: Znáznornění společně pojížděného úseku linkami č. 1, 2, 11 [7]

3.2. Charakteristika vybraných přestupních uzlů

Zastávka Masarykovo náměstí je významným přestupním uzlem, kde se protíná většina linek MHD a část linek regionálních autobusů. Masarykovo náměstí se nachází přibližně v geografickém centru města u významné křižovatky ulic Palackého třída a 17. listopadu, po které vede průtah silnice druhé třídy II/324, která Pardubicemi prochází z jihu na sever přes Masarykovo náměstí a propojuje města Městec Králové, Nový Bydžov, Hradec Králové, Pardubice a Chrudim.

Ve směru ze severu na jih bylo vybudováno pouze jedno nástupiště MHD označené jako nástupiště č. 2, které je dimenzováno na zastavení dvou vozidel (ať už trolejbusů či autobusů) současně. V opačném směru je nástupiště rozděleno na dvě části – nástupiště č. 1, které používají linky projíždějící na následující světelné křižovatce rovně ulicí Hradecká přes Wonkův most do Polabin a dále na sever města a na nástupiště č. 3, sloužící linkám odbočujícím vpravo na Sukovu třídu a směřujícím na východ, případně severovýchod města (Dubina, Slovany, Pardubičky). Obě tato nástupiště mají kapacitu dvou vozidel. V každém směru je pak jedno nástupiště určené pro regionální autobusové linky. Nejdelší možná doba přesunu mezi nástupišti vzniká při potřebě přemístit se z nástupiště č. 2 na nástupiště č. 3. Je třeba ujít asi 80 m a přejít přes přechod osazený světelnou signalizací s tlačítkem pro nárokování signálu volno pro chodce. Hodnota minimální doby přestupu je proto stanovena na 3 minuty. Rozložení nástupišť na zastávce Masarykovo náměstí je znázorněno na obrázku č. 4.



Obr. č. 4: Zastávka Masarykovo náměstí [7]

Zastávka Krajský úřad se nachází u historického centra města na Jahnově ulici u Komenského náměstí a je od Masarykova náměstí vzdálena asi 1,2 km východním směrem. Mezi Masarykovým náměstím a Krajským úřadem se nachází zastávka Náměstí Republiky, kterou obsluhují koordinované linky č. 1, 2, 11 a zastávka Sukova. Tuto zastávku z koordinovaných linek obsluhuje linka č. 11 pouze ve směru A (Globus – Dubina) a linka č. 6 pouze ve směru B (Dukla – Polabiny).

Krajský úřad je zastávka společná pro linky obsluhující východní a severovýchodní část města a centrum. Za zastávkou se nachází Prokopův most, který jako jediný most přes řeku Chrudimku je osazený trolejovým vedením a umožňuje trolejbusům řeku překonat a obsloužit východní část Pardubic. Nástupiště jsou v obou směrech dimenzována na zastavení dvou vozidel současně. Přesun mezi nástupišti má délku zhruba 150 m (využití přechodu pro chodce na západ i na východ od zastávky vychází přibližně stejně). Hodnota minimální doby přestupu byla stanovena na 4 minuty. Rozložení nástupišť na zastávce Krajský úřad je znázorněno na obrázku č. 5.



Obr. č. 5: Zastávka Krajský úřad [7]

3.3. Charakteristika koordinovaných linek MHD

Protože bude koordinace provedena pouze pro jízdní řád platný o víkendu, budou linky charakterizovány pouze z hlediska jejich provozu o víkendu. Dopolední špička je o víkendu přibližně mezi 8:00 – 11:00 a odpolední špička přibližně mezi 14:00 – 19:00. Z pěti koordinovaných linek jízdní řády tří linek (linky č. 1, 2, 6) respektují období špičky snížením intervalu mezi spoji. Kompletní linkové vedení koordinovaných linek ve směru A je uvedeno v tabulce č. 1. Schéma tras koordinovaných linek je zobrazeno na obrázku č. 6.

Linka č. 1 je trolejbusová páteřní linka obsluhující jižní část města Jesničanky a Višňovku, centrum a severovýchodní sídliště Slovany. Linka je o víkendu v provozu od 4 do 23 hodin, v období sedla jezdí s intervalem 30 minut, v období špičky pak s intervalem 20 minut. Jízdní doba této linky je v obou směrech 19 minut. Linka č. 1 obsluhuje oba koordinované přestupní uzly. Na Masarykově náměstí bude koordinován přestup s linkou č. 3 ve směru Lázně Bohdaneč – Slovany a naopak. Na Krajském úřadě bude koordinován přestup s linkou č. 2 pro propojení oblastí Slovany – Pardubičky.

Linka č. 2 je linka, která jako jediná z páteřních trolejbusových linek obsluhuje oblast Pardubičky, a tedy zajíždí k nemocnici a dále do průmyslové zóny v Pardubičkách. Jsou s ní koordinovány všechny linky, u kterých je požadavek na vznik vazby nemocnice – jiná část města, konkrétně linky č. 1, 3, 6 a 11. Linka č. 2 obsluhuje severní sídliště Polabiny, hlavní nádraží, centrum města a dále východní oblast Pardubiček. Ve špičce má tato linka interval

20 minut, v sedle pak 30 minut. Linka je provozována od 5 do 23 hodin. Jízdní doba ve směru A je 29 minut, ve směru B 27 minut. Tato linka obsluhuje oba přestupní uzly.

Páteřní trolejbusová linka č. 3 začíná na zastávce Hlavní nádraží, obsluhuje centrum města, severní oblast Polabiny a Trnová a dále severozápadní okraj města – Semtín, obec Rybitví a sousední město Lázně Bohdaneč, které propojuje s Pardubicemi. Linka je provozována od 5 do 23 hodin po celý den s intervalem 30 minut (s výjimkou tří večerních spojů v 20:30, 22:30 a 23:30). Jízdní doba této linky je 26 minut ve směru A a 25 minut ve směru B. Linka č. 3 obsluhuje pouze přestupní uzel Masarykovo náměstí, zde bude koordinován přestup na linku č. 2 ve směru Lázně Bohdaneč – Nemocnice a naopak, a dále přestup na linku č. 1 ve směru Lázně Bohdaneč – Slovany a naopak.

Linka č. 6 je páteřní autobusová linka obsluhující severozápadní část města Rosice, Polabiny, centrum a dále jižní část města Višňovku a Duklu. Část spojů označených v jízdním řádu písmenem P končí již na zastávce Polabiny, Sluneční (neobsluhuje tedy Rosice); ostatní končí na zastávce Rosice točna. Linka je v provozu od 5 do 23 hodin. V období špičky má tato linka interval 20 minut, v sedle pak 30 minut. Jízdní doba této linky ve směru A z Rosic je 35 minut, na zkrácené trase z Polabin pak 25 minut. Ve směru B je jízdní doba 31 minut, na zkrácené trase pak 26 minut. Tato linka obsluhuje pouze přestupní uzel Masarykovo náměstí, zde bude koordinován přestup na linku č. 2 ve směru Dukla (Višňovka) – Nemocnice a naopak.

Trolejbusová páteřní linka č. 11 obsluhuje severní část města – Semtín, Trnová, Polabiny, centrum a severovýchodní sídliště Dubina. O víkendu je její trasa zkrácena do zastávky Globus a neobsluhuje tedy Semtín. Linka je v provozu od 5 do 20 hodin a po celý den má interval 30 minut. Jízdní doba této linky ve směru A je 20 minut, ve směru B pak 19 min. Tato linka obsluhuje pouze přestupní uzel Krajský úřad, kde bude koordinován přestup na linku č. 2 ve směru Dubina – Nemocnice a naopak. [8]

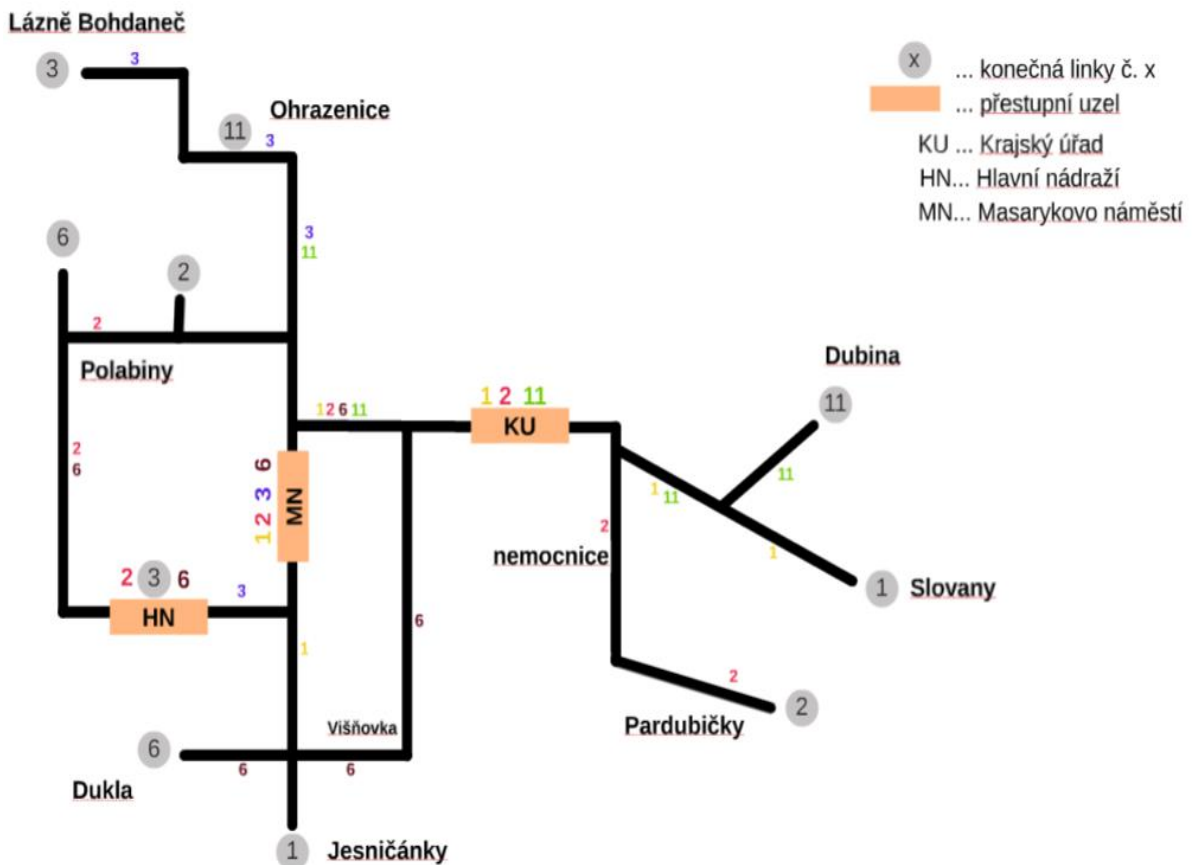
Tabulka č. 1: Kompletní vedení koordinovaných linek k 28. 4. 2020

Linka	Linkové vedení
1	Jesničánky, točna – Nemošická – Zborovské náměstí – Gorkého – Na Spravedlnosti – 17. listopadu – Masarykovo nám. – Náměstí Republiky – Krajský úřad – U Kostelíčka – Na Okrouhlíku – Slovany, Dašická – Slovany, Spojilská – Slovany, U Přejezdu, Slovany točna
2	Polabiny, točna – Polabiny, Kosmonautů – Polabiny, Bělehradská, Polabiny, Kpt. Bartoše – Polabiny, Lidická – Polabiny, Albert HM – Hlavní nádraží – Autobusové nádraží – Palackého – Masarykovo nám. – Náměstí Republiky – Krajský úřad – U Kostelíčka – Štrossova – Nemocnice – Kyjevská – Pardubičky, točna – Průmyslová – Zámeček
3	Hlavní nádraží – Autobusové nádraží – Palackého – Masarykovo nám. – Zimní stadion – Stavařov – Polabiny, Hradecká – Poděbradská – Trnová – Globus – Semtín, zastávka – Semtín, hlavní brána – Semtín, vlečka – Rybitví, závod – UMA, továrna – UMA, točna – Lázně Bohdaneč, aut. nádr. – Lázně Bohdaneč, náměstí – Lázně Bohdaneč, točna
6	Rosice, točna – Rosice, Gen. Svobody – Rosice, náměstí – Rosice, pošta – Rosice, Kréta – Polabiny, Okrajová ¹ – Polabiny, Kpt. Bartoše – Polabiny, Lidická – Polabiny, Albert HM – Hlavní nádraží – Autobusové nádraží – Palackého – Masarykovo nám. – Náměstí Republiky – Karla IV. – Výzkumný ústav – S.K. Neumanna – Ulice Svobody ² – U Kapitána ² – Krematorium – Zborovské náměstí – Gorkého, škola – Dukla, KD – Dukla, u náměstí – Dukla, náměstí
11	Globus – Trnová – Poděbradská – Polabiny, točna – Polabiny, Kosmonautů – Polabiny, hotel – Stavařov – Zimní stadion – Sukova ³ – Náměstí republiky – Krajský úřad – U Kostelíčka – Na Okrouhlíku – Na Drážce – Dubina, garáže – Dubina, centrum – Dubina, sever

¹ Část spojů začíná na zastávce Polabiny, Sluneční a pokračuje do zastávky Polabiny, Kpt. Bartoše a dále po trase

² Část spojů ve večerních a brzkých ranních hodinách jede po zkrácené trase S.K. Neumanna – Ulice Svobody – U Kapitána – Gorkého, škola místo delší trasy S.K. Neumanna – Krematorium – Zborovské náměstí – Gorkého, škola

³ Zastávka Sukova je obsluhována pouze v tomto směru



Obr. č. 6: Schéma tras koordinovaných linek

3.4. Analýza přestupních vazeb vybraných linek MHD v Pardubicích

V současnosti přestupní vazby mezi vybranými linkami v podstatě neexistují; vznikají velmi nahodile jen u malé části vybraných linek. V následujících dvou tabulkách jsou uvedeny současné celkové doby čekání při přestupu mezi vybranými linkami, to je celková doba mezi příjezdem linky č. x a odjezdem linky č. y. V tabulce č. 2 jsou uvedeny hodnoty pro přestupy v přestupním uzlu Masarykovo náměstí, v tabulce č. 3 pak pro přestupy v přestupním uzlu Krajský úřad. Dvě hodnoty oddělené lomítkem značí různé doby čekání dle kombinace spojů vzniklé přestupem mezi linkami s odlišnými intervaly spojů (20 a 30 minut). Tyto se vyskytují pouze v období špičky. V období sedla mají všechny koordinované linky interval 30 minut, tedy tento problém nevzniká. Hodnota uvedená v závorce je doba čekání do dalšího následujícího odjíždějícího spoje za předpokladu, že by cestující nestihl přestup – je uvedena pro doby čekání nižší než minimální určená přestupní doba (pro přestupní uzel Masarykovo náměstí jde o hodnotu 3 minuty, pro Krajský úřad o hodnotu 4 minuty).

Tabulka č. 2: Celkové doby čekání – současný stav – Masarykovo náměstí

Masarykovo náměstí (špička)		
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Celková doba čekání [min]
3 (Lázně Bohdaneč)	2 (Pardubičky)	8/18
2 (Pardubičky)	3 (Lázně Bohdaneč)	20/0 (30)/10
6 (Dukla)	2 (Pardubičky)	1 (21)
2 (Pardubičky)	6 (Dukla)	4
1 (Slovany)	3 (Lázně Bohdaneč)	11/1
3 (Lázně Bohdaneč)	1 (Slovany)	19/9
Masarykovo náměstí (sedlo)		
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Celková doba čekání [min]
3 (Lázně Bohdaneč)	2 (Pardubičky)	18
2 (Pardubičky)	3 (Lázně Bohdaneč)	0 (30)
6 (Dukla)	2 (Pardubičky)	16
2 (Pardubičky)	6 (Dukla)	16
1 (Slovany)	3 (Lázně Bohdaneč)	21
3 (Lázně Bohdaneč)	1 (Slovany)	29

Tabulka č. 3: Celkové doby čekání – současný stav – Krajský úřad

Krajský úřad (špička)		
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Celková doba čekání [min]
1 (Slovany)	2 (Pardubičky)	14
2 (Pardubičky)	1 (Slovany)	14
11 (Dubina)	2 (Pardubičky)	12/2 (22)
2 (Pardubičky)	11 (Dubina)	9/19
Krajský úřad (sedlo)		
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Celková doba čekání [min]
1 (Slovany)	2 (Pardubičky)	4
2 (Pardubičky)	1 (Slovany)	24
11 (Dubina)	2 (Pardubičky)	22
2 (Pardubičky)	11 (Dubina)	19

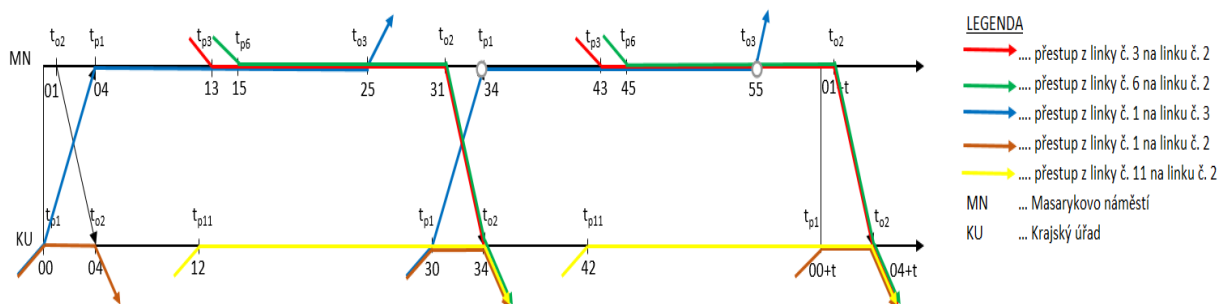
Aktuální situaci přestupování znázorňují následující grafická schémata. Jsou uvedena zvlášť pro období špičky a období sedla, které se u některých linek liší intervaly mezi spoji, a dále jsou rozdělena na směr 1 a směr 2. Směr 1 odpovídá lince č. 2 ve směru A (Polabiny – Pardubičky) a všem ostatním linkám, které jsou na ni v tomto směru navázány přestupními vazbami. Směr 1 odpovídá vždy prvnímu řádku dané kombinace spojů, mezi kterými má vzniknout přestupní vazba v předchozích tabulkách č. 2 a 3. Konkrétně tedy směr 1 zahrnuje pět následujících přestupních vazeb: Lázně Bohdaneč – Pardubičky (linka č. 3 – linka č. 2), Dukla – Pardubičky (linka č. 6 – linka č. 2), Slovany – Bohdaneč (linka č. 1 – linka č. 3), Slovany – Pardubičky (linka č. 1 – linka č. 2), Dubina – Pardubičky (linka č. 11 – linka

č. 2), z toho první tři přestupy proběhnou na Masarykově náměstí a ostatní na Krajském úřadu. Směr 2 pak zahrnuje pět předchozích uvedených přestupních vazeb v opačném směru, pro první kombinaci tedy např. Pardubičky – Lázně Bohdaneč (linka č. 2 – linka č. 3).

Na schématech jsou vždy znázorněny dvě časové osy pro přestupní uzly Masarykovo náměstí (značeno MN) a Krajský úřad (značeno KU). Na těchto osách jsou vyznačeny časy příjezdů spojů tp_i , ve kterých cestující do daného přestupního uzlu přijíždí, a odjezdů spojů to_j , na které cestující přeseďají a z daného přestupního uzlu odjíždí. Jednotlivé přestupní vazby jsou znázorněny plnou barevnou čarou vždy ve směru zleva doprava. Šikmá část čáry značí příjezd či odjezd spojů linek, mezi kterými je žádoucí přestupní vazba, část vodorovná s časovou osou značí celkovou délku čekání cestujících přestupujících mezi danými dvěma spoji. Jednotlivé přestupní vazby jsou barevně odlišeny. Přerušovaná barevná čára značí, že je doba mezi příjezdem a odjezdem daných linek menší než minimální přestupní doba, a tedy by pravděpodobně nebylo možné přestup uskutečnit a bylo by nutné čekat na následující odjíždějící spoj dané linky. Černá šikmá šipka nacházející se mezi oběma časovými osami znázorňuje přejezd daného spoje mezi přestupními uzly. Schéma je vždy uvedeno pro období jedné hodiny, přičemž počátek (00 minut) a konec (60 minut) tohoto období je značen svislou tenkou černou čarou spojující obě časové osy. Spoje, které jsou uvedeny po konci tohoto období mají čas značen ve tvaru $xy + t$, kde xy je počet minut v době jejich odjezdu/příjezdu a t značí 1 časové období, tedy 1 hodinu.

Na obr. č. 7 je uvedeno schéma přestupních vazeb pro směr 1 a období sedla. Ze schématu vyplývá, že zde vychází přestup velmi dobře pouze z linky č. 1 na linku č. 2 (hnědá barva). V tomto případě činí doba na přestup 4 minuty, což odpovídá minimální přestupní době stanovené pro Krajský úřad. Ostatní přestupní vazby v tomto směru a období defacto nevznikají.

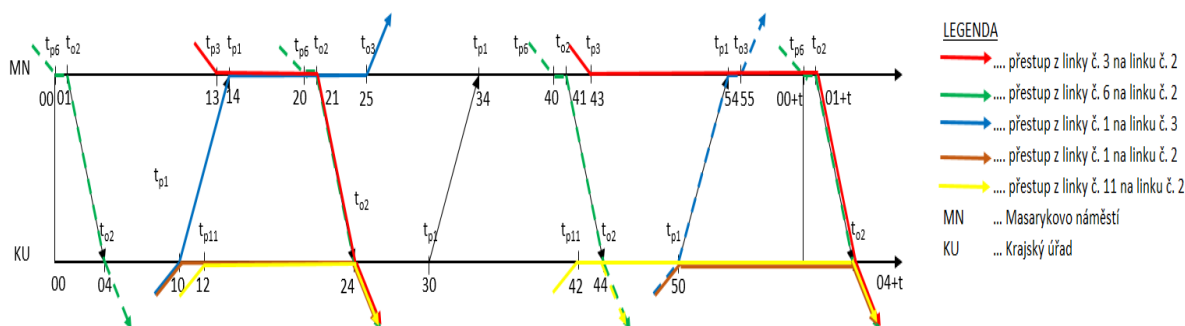
SMĚR 1 SEDLO



Obr. č. 7: Schéma přestupních vazeb dle současných jízdních řádů – směr 1, období sedla

V období špičky pro směr 1 vychází dobře přestup z linky č. 3 na linku č. 2 (červená čára) s celkovou dobou čekání 6 minut, avšak jde pouze o každý první ze dvou možných přestupů v rámci období jedné hodiny. Pro ostatní přestupní vazby je celková doba čekání delší než deset minut, respektive kratší než minimální přestupní doba (všechny přestupy z linky č. 6 na linku č. 2 – zelená přerušovaná čára a druhý přestup z linky č. 1 na linku č. 3 – modrá přerušovaná čára), tedy přestupní vazba nevzniká. Schéma pro toto období a směr je uvedeno na obr. č. 8.

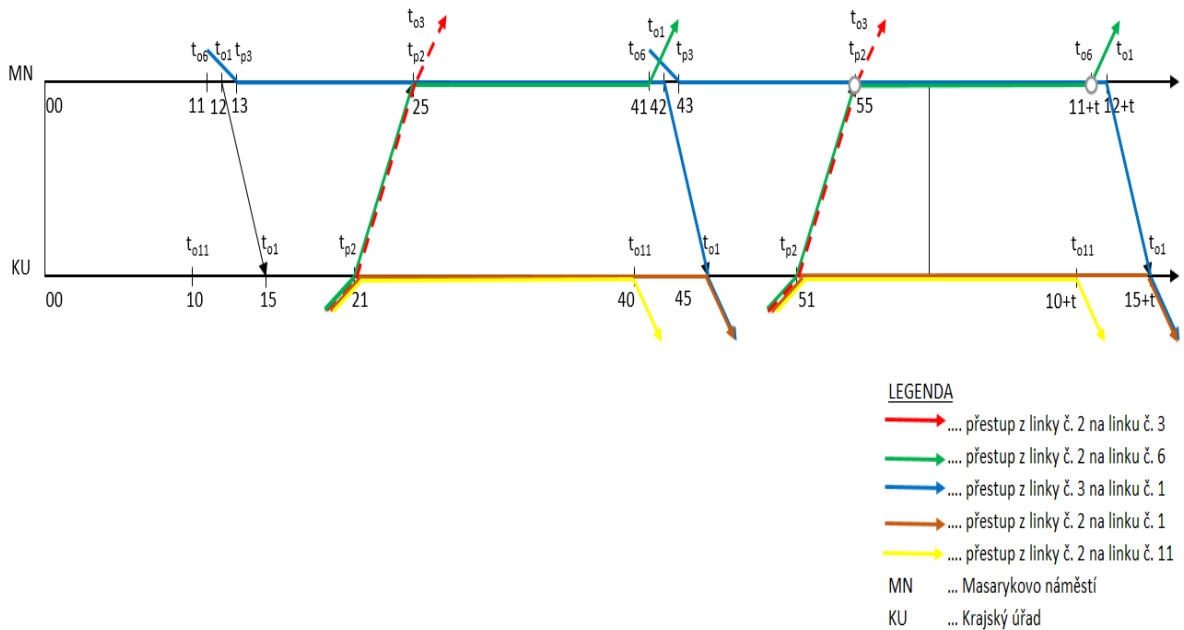
SMĚR 1 ŠPIČKA



Obr. č. 8: Schéma přestupních vazeb dle současných jízdních řádů – směr 1, období špička

V období sedla ve směru 2 nevzniká ani jedna z požadovaných přestupních vazeb – celková doba čekání je u všech přestupních vazeb delší než 15 minut. Čas odjezdu linky č. 3 je stejný jako čas příjezdu linky č. 2, proto jsou tyto uvedeny u časové osy nad sebou. Z toho také vyplývá, že by cestující přestup mezi linkou č. 2 a linkou č. 3 nestihli vykonat a byli by nuceni čekat na následující odjíždějící spoj za 30 minut (značeno červenou přerušovanou čarou). Schéma pro toto období a směr je uvedeno na obr. č. 9.

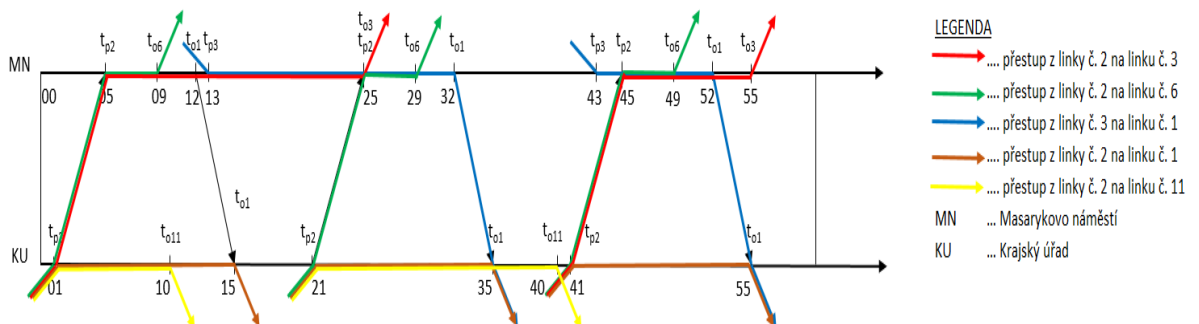
SMĚR 2 SEDLO



Obr. č. 9: Schéma přestupních vazeb dle současných jízdních řádů – směr 2, období sedla

Ve směru 2 a v období špičky vychází dobře přestup z linky č. 2 na linku č. 6 (zelená plná čára) s celkovou dobou čekání 4 minuty a relativně akceptovatelně přestup z linky č. 2 na linku č. 11 (9 minut, žlutá plná čára), avšak pouze pro první přestup v dané hodině. Pro ostatní přestupní vazby je celková doba čekání delší než deset minut, tedy přestupní vazba nevzniká. Schéma pro toto období a směr je uvedeno na obr. č. 10.

SMĚR 2 ŠPIČKA



Obr. č. 10: Schéma přestupních vazeb dle současných jízdních řádů – směr 2, období špičky

4. Charakteristika použitého optimalizačního exaktního přístupu

K časové koordinaci spojů v přestupních uzlech je v této práci využita optimalizační metoda lineárního programování, která je univerzálním řešícím nástrojem pro množství různých typů optimalizačních úloh. Při řešení optimalizační úlohy je sestaven lineární matematický model, který je zpravidla řešen vhodným optimalizačním softwarem. V této práci byl využit software XPress-IVE od společnosti FICO. Základ modelu časové koordinace spojů v přestupních uzlech tvoří model prof. RNDr. Jaroslava Janáčka, CSc., z Fakulty řízení a informatiky Žilinské univerzity v Žilině vytvořený v roce 2007.

V této kapitole bude představen základní model časové koordinace spojů v izolovaném uzlu a jeho modifikace pro koordinaci spojů ve dvou přestupních uzlech. Koordinace bude nejprve řešena zvlášť pro oba směry jízdy v obou přestupních uzlech při zanedbání provozních požadavků, poté budou propojeny do jednoho modelu a doplněny podmínky pro respektování nutných provozních požadavků.

4.1. Základní model časové koordinace přestupů – vstupní údaje a užívané proměnné

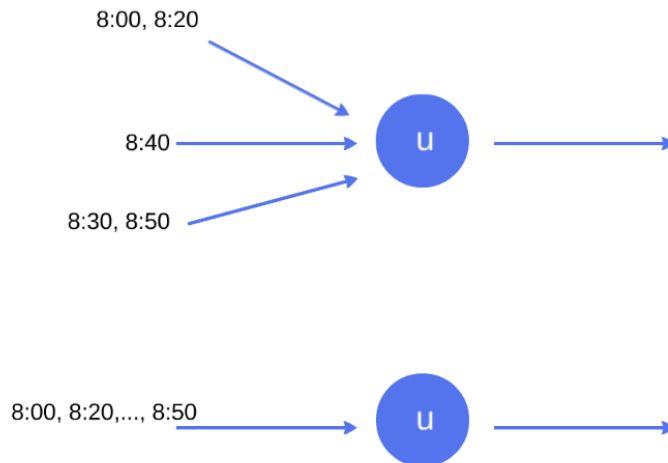
Základní model je definován pro izolovaný přestupní uzel, do kterého přijíždí množina spojů ze stejného směru a odjíždí množina spojů do stejného směru a mezi nimiž má vzniknout přestupní vazba.

V modelu vystupují tyto vstupní údaje:

- množina přijíždějících spojů I
- množina odjíždějících spojů J
- intenzita cestujících f_{ij} přestupujících ze spoje $i \in I$ na spoj $j \in J$
- nejdříve možný odjezd to_j spoje $j \in J$
- nejdříve možný příjezd tp_i spoje $i \in I$
- maximální povolený časový posun a_i spoje $i \in I$, vztaheno k nejdříve možné časové poloze příjezdu tp_i
- maximální povolený posun b_j spoje $j \in J$, vztaheno k nejdříve možné časové poloze odjezdu to_j
- přestupní doba $tprest$

- pomocná konstanta M

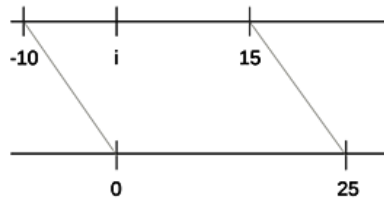
Model lze použít i v případě, že množina příjezdějících spojů I zahrnuje spoje příjezdějící z více směrů. Protože je koordinován přestup z množiny spojů I na množinu odjíždějících spojů J a není kladen důraz na jednotlivé linky či jejich charakter, lze spoje z více směrů sloučit do jedné časové posloupnosti příjezdů spojů beze změny úlohy a jejího principu. Tento postup je naznačen na obrázku č. 11.



Obr. č. 11: Schéma slučování spojů z různých směrů

Pro účely koordinace je nutné intervaly, ve kterých lze provádět časový posun spojů, vhodně upravit následujícím způsobem. Před začátkem optimalizace jsou všechny časy příjezdů a odjezdů spojů posunuty do nejdříve možných krajních časových poloh a k původnímu maximálnímu povolenému časovému posunu spoje je přičtena doba, o kterou byl spoj posunut. Tento postup je nutno aplikovat z důvodu neschopnosti modelu práce se zápornými čísly, při které by došlo k porušení lineárního tvaru modelu. Postup bude demonstrován na následujícím příkladu: v čase i přijíždí do uzlu spoj s , který lze posunout v časovém intervalu $\langle -10; 15 \rangle$. Jako nejdříve možný příjezd tp_s spoje s bude určen čas $i - 10$, který bude pro účely modelu označen jako čas 0. Časový interval, ve kterém bude možné spoj posunout, je pak určen jako původní časový interval, ke kterému je přičtena hodnota posunu, tedy levá mez nového časového intervalu bude $-10 + 10 = 0$ a pravá mez intervalu $15 + 10 = 25$ a nový časový interval $\langle 0, 25 \rangle$, který již splňuje podmínku nezápornosti čísel vystupujících v modelu. Maximální povolený časový posun a_s , vztažený k nejdříve možné časové poloze příjezdu tp_s bude tedy 25 minut. Posun časového intervalu je graficky naznačen na obr. č. 12. V celém modelu jsou časové polohy spojů značeny ve tvaru počtu minut uplynulých od stanoveného nulového bodu, čímž je zaručena nezápornost čísel. Přestupní doba $tp_{rest_{ij}}$ se může lišit

pro různé kombinace přestupních vazeb mezi příjezdějším spojem $i \in I$ a odjíždějším spojem $j \in J$. Pomocná konstanta M je velmi vysoké nezáporné číslo, např. s hodnotou 10 000.



Obr. č. 12: Schéma posunu času příjezdu spoje

V modelu jsou používány proměnné:

- x_i [min] – časový posun spoje $i \in I$ vzhledem k nejdříve možnému příjezdu spoje tp_i
- y_j [min] – časový posun spoje $j \in J$ vzhledem k nejdříve možnému příjezdu spoje to_j
- h_i [min] – doba čekání cestujícího přestupujícího ze spoje $i \in I$
- z_{ij} [-] – pomocná bivalentní proměnná určující vznik přestupní vazby z příjezdějího spoje $i \in I$ na odjíždějí spoj $j \in J$ [9]

4.2. Základní model časové koordinace přestupů – obecný matematický model

Matematický model časové koordinace spojů v přestupním uzlu má tvar:

$$\min f(x, y, h, z) = \sum_{i \in I} f_i h_i \quad (1.1)$$

za podmínek:

$$to_j + y_j - (tp_i + x_i + t_{prest}) \geq M \cdot (z_{ij} - 1) \quad (1.2)$$

$$to_j + y_j - (tp_i + x_i + t_{prest}) \leq h_i + M \cdot (1 - z_{ij}) \quad (1.3)$$

$$x_i \leq a_i \quad \text{pro } i \in I \quad (1.4)$$

$$y_j \leq b_j \quad \text{pro } j \in J \quad (1.5)$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (1.6)$$

$$y_j \geq 0 \quad \text{pro } j \in J \quad (1.7)$$

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

$$z_{ij} \in \{0; 1\} \quad (1.9)$$

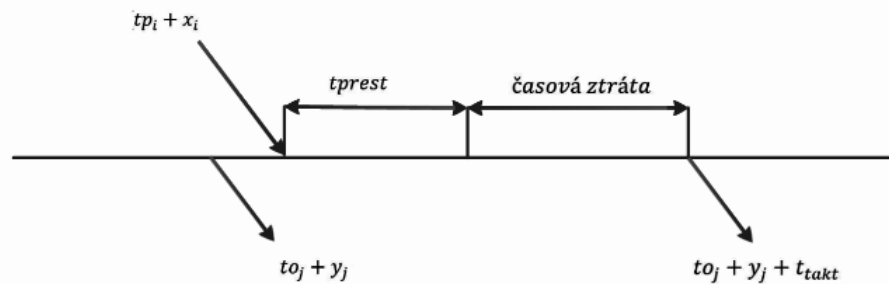
Funkce (1.1) reprezentuje optimalizační kritérium – celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících. Intenzita cestujících f_{ij} přestupujících ze spoje $i \in I$ na spoj $j \in J$

v optimalizačním kritériu rozlišuje důležitost přestupů mezi různými kombinacemi příjíždějícího spoje $i \in I$ a odjíždějícího spoje $j \in J$. Nejvyšší důležitost má přestupní vazba s nejvyšším počtem přestupujících cestujících – model se pak snaží minimalizovat přestupní dobu primárně pro tuto kombinaci spojů, dále kombinaci spojů s druhou nejvyšší intenzitou přestupů atd. V případě, že nejsou hodnoty počtu přestupujících známy nebo není žádoucí přestupy rozlišovat dle jejich důležitosti, je možné intenzitu cestujících v modelu vynechat nebo ji pro všechny přestupy uvést rovnou jedné, všechny kombinace přestupů mezi spoji pak budou uvažovány se stejnou váhou.

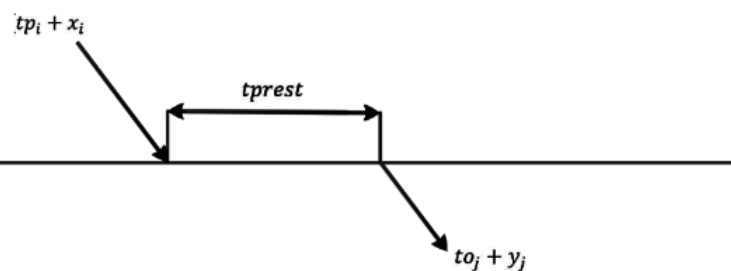
Skupina omezujících podmínek (1.2) zajišťuje, že v případě, kdy odjíždějící spoj předchází spoj příjíždějící, nevznikne přestupní vazba mezi danými spoji. První dva členy rovnice udávají čas odjezdu spoje $j \in J$ po jeho posunu, tedy čas odjezdu tohoto spoje určený modelem. Závorka na levé straně rovnice představuje nejdříve možnou časovou polohu příjezdu spoje pro $i \in I$, navýšenou o přestupní dobu mezi danými spoji a časový posun spoje $i \in I$, tedy nejdříve možný čas odjezdu spoje $j \in J$, aby cestující stihli mezi spoji přestoupit. Levá strana rovnice tedy vyjadřuje rozdíl mezi okamžikem odjezdu spoje a nejdříve možným odjezdem spoje při zachování přestupní vazby. Mohou nastat tři situace:

Pokud bude výsledek levé strany rovnice záporný, znamená to, že spoj odjel dříve než v nejdříve možném času odjezdu spoje pro zajištění přestupu, a tedy přestupujícím cestujícím ujel. Časová ztráta cestujícího je pak rovna délce čekání na následující spoj. V takovém případě je tato podmínka aktivována a pomocná bivalentní proměnná z_{ij} musí být rovna 0, což signalizuje, že přestupní vazba nevzniká. Pokud je výsledek levé strany rovnice roven nule, nastává z hlediska cestujících ideální situace – čas odjezdu je přesně roven nejdříve možnému času odjezdu spoje, tedy cestujícím nevzniká při přestupu žádná časová ztráta. V tomto případě může být hodnota bivalentní proměnné z_{ij} rovna jedné i nule, tedy není jednoznačně určeno, zda má přestup vzniknout. Třetí situace nastává, pokud je výsledek levé strany rovnice větší než nula. V tom případě je čas odjezdu spoje pozdější než nejdříve možný čas odjezdu spoje a cestujícím vzniká časová ztráta rovná rozdílu mezi těmito časy. I v tomto případě může bivalentní proměnná z_{ij} nabývat obou svých hodnot a vznik přestupní vazby tedy není jednoznačně určen. Všechny tři situace jsou graficky znázorněny na obrázku č. 13.

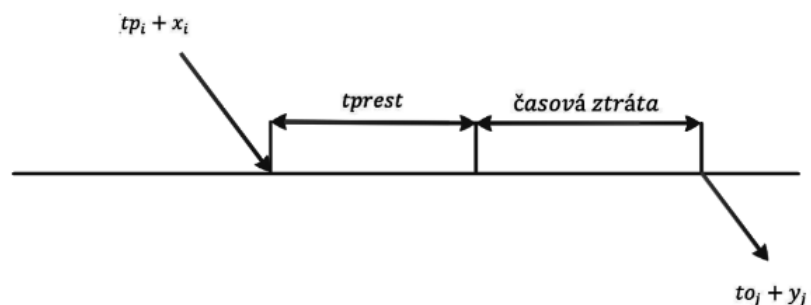
$$t_{o_j} + y_j - (t_{p_i} + x_i + t_{prest}) < 0$$



$$t_{o_j} + y_j - (t_{p_i} + x_i + t_{prest}) = 0$$



$$t_{o_j} + y_j - (t_{p_i} + x_i + t_{prest}) > 0$$



Obr. č. 13: Schéma tří možných situací, které mohou při přestupu nastat

Skupina omezujících podmínek (1.3) slouží k definování časové ztráty cestujících při dané kombinaci spojů. Levá strana rovnice je shodná s podmínkou (1.2), opět tedy mohou nastat tři situace. Pokud je výsledek levé strany rovnice záporný a tedy spoj $j \in J$ cestujícím ujede, musí být hodnota doby čekání cestujícího h_i při vzniku přestupní vazby (tedy při hodnotě 1 bivalentní proměnné z_{ij}) větší nebo rovna absolutní hodnotě tohoto zápornému výsledku levé strany rovnice, aby byla podmínka rovnice dodržena. Hodnota doby čekání cestujícího h_i však vystupuje v optimalizačním kritériu, které je minimalizováno, a proto bude vždy zvolena nejnižší možná hodnota této proměnné, tedy hodnota právě rovná absolutní hodnotě výsledku levé strany rovnice. V případě, kdy přestupní vazba nevzniká, je podmínka rovnice dodržena

díky pomocné konstantě M a hodnota čekání pak bude vzhledem k tlaku optimalizačního kritéria nulová. Při vzniku nulové časové ztráty, tedy v situaci, kdy je výsledek levé strany rovnice roven nule, nastává analogická situace k té předchozí – pro dodržení podmínky rovnice za vzniku přestupní vazby musí být hodnota doby čekání cestujícího h_i minimálně rovna nule a díky tlaku optimalizačního kritéria tedy nabyde právě tuto minimální hodnotu. Pokud je výsledek levé strany rovnice kladná hodnota, musí být hodnota doby čekání cestujícího h_i v případě vzniku přestupní vazby opět větší nebo rovna výsledku levé strany rovnice, a bude tedy nabývat právě jeho hodnoty. Tato skupina podmínek tedy vůbec neovlivňuje hodnotu bivalentní proměnné z_{ij} , přestože v ní tato proměnná vystupuje, jako je tomu v případě podmínky (1.2).

Skupina podmínek (1.4) zajišťuje, že skutečný časový posun příjezdu spoje $i \in I$ nepřekročí maximální povolený časový posun spoje vzhledem k nejdříve možné časové poloze tp_i . Skupina podmínek (1.5) je analogická pro odjíždějící spoj $j \in J$. Skupiny omezujících podmínek (1.6) – (1.9) vymezují definiční obory proměnných.

5. Matematický model pro časovou koordinaci spojů v podmínkách města Pardubic

Oproti základnímu modelu bude koordinace přestupních vazeb probíhat ve dvou přestupních uzlech – z toho vyplývá potřeba jednoznačně rozlišit všechny vstupní údaje a proměnné, které se pro jednotlivé přestupní uzly liší. Bylo tak učiněno přidáním dvou písmen za označení vstupního údaje či proměnné, a to písmen „mn“, pokud se daná veličina týká Masarykova náměstí, nebo „ku“, pokud jde o přestupní uzel Krajský úřad.

Koordinace přestupních vazeb je prováděna zvlášť pro období dopravní špičky a dopravního sedla, které se liší intervalem provozu některých linek, a dále je dělena na směr 1 a směr 2, jak byly definovány v podkapitole 3.4. Nejprve byly vytvořeny čtyři matematické modely: směr 1 sedlo, směr 1 špička, směr 2 sedlo a směr 2 špička. Po ověření funkčnosti jednotlivých modelů pro každý směr a období byly vždy spojeny dva modely pro dané období do jednoho modelu zahrnujícího oba směry. Tyto modely budou nadále značeny jako Model1_sedlo a Model1_spicka. Oba modely pro dané období jsou analogické a liší se pouze v hodnotách vstupních údajů (konkrétně v hodnotách provozního intervalu linek a maximálního povoleného časového posunu příjezdu/odjezdu linky). Z toho důvodů budou vstupní údaje a proměnné vystupující v matematickém modelu představeny pouze pro období sedla.

5.1. Označení vstupních údajů a proměnných užívaných v upraveném modelu

V modelu pro období sedla vystupují tyto vstupní údaje:

- množina příjíždějících spojů do přestupního uzlu Krajský úřad $Plku$
- množina příjíždějících spojů do přestupního uzlu Masarykovo náměstí $Plmn$
- množina odjíždějících spojů z přestupního uzlu Krajský úřad $Olku$
- množina odjíždějících spojů z přestupního uzlu Masarykovo náměstí $Olmn$
- množina všech koordinovaných linek L
- množina směrů jízdy S
- intenzita cestujících fku_{ij} přestupujících v přestupním uzlu Krajský úřad ze spoje $i \in Plku$ na spoj $j \in Olku$
- intenzita cestujících fmn_{ij} přestupujících v přestupním uzlu Masarykovo náměstí ze spoje $i \in Plmn$ na spoj $j \in Olmn$

- nejdříve možný odjezd $toku_{js}$ spoje $j \in Olku$ z přestupního uzlu Krajský úřad ve směru $s \in S$
- nejdříve možný odjezd $tomn_{js}$ spoje $j \in Olmn$ z přestupního uzlu Masarykovo náměstí ve směru $s \in S$
- nejdříve možný příjezd $tpku_{is}$ spoje $i \in Plku$ do přestupního uzlu Krajský úřad ve směru $s \in S$
- nejdříve možný příjezd $tpmn_{is}$ spoje $i \in Plmn$ do přestupního uzlu Masarykovo náměstí ve směru $s \in S$
- maximální povolený časový posun a_{is} spoje $i \in L$ ve směru $s \in S$, vztaheno k nejdříve možné časové poloze příjezdu $tpmn_{is}$ a $tpku_{is}$
- maximální povolený časový posun b_{js} spoje $j \in L$ ve směru $s \in S$, vztaheno k nejdříve možné časové poloze odjezdu $tomn_{js}$ a $toku_{js}$
- provozní interval $takt_i$ spojů linky $i \in L$
- přestupní doba v přestupním uzlu Krajský úřad $tprestku$
- přestupní doba v přestupním uzlu Masarykovo náměstí $tprestmn$
- doba jízdy mezi přestupními uzly t_j
- pomocná konstanta M

Množiny příjezdějících a odjíždějících spojů jsou definovány zvlášť pro každý přestupní uzel, protože se liší – část koordinovaných linek obsluhuje oba přestupní uzly, linka č. 3 pouze Masarykovo náměstí a linka č. 11 pouze Krajský úřad. Tyto množiny se dále liší i podle jejich směru: linky ve směru 1 příjezdějí se v opačném směru stávají linkami odjíždějícími a naopak. Nově byla zavedena množina všech koordinovaných linek L , která slouží k rozlišení vstupních údajů, které jsou definovány pro všechny koordinované linky a nelze je dále rozlišit, příkladem může být provozní interval $takt_i$. Dále byla zavedena množina směrů jízdy S , která určuje, pro který směr jsou dané veličiny definovány.

Maximální časový posun a_{is} je definován pomocí množiny všech koordinovaných linek L z toho důvodu, že se množiny příjezdějících linek na Masarykovo náměstí a Krajský úřad mezi sebou liší, a nelze tedy množinu $Plmn$ ani $Plku$ využít. Obdobně tomu je i u maximálního povoleného posunu času odjezdu b_{js} . Přestupní doba je pro všechny přestupní vazby v daném přestupním

uzlu stejná, proto postačí definovat jednu konstantu pro každý přestupní uzel – přestupní dobu v přestupním uzlu Krajský úřad t_{prestu} o hodnotě 4 minuty a přestupní dobu v přestupním uzlu Masarykovo náměstí t_{prestm} o hodnotě 3 minuty. Pomocná konstanta M je velmi vysoké nezáporné číslo, v této práci má definovanou hodnotu 10 000.

V modelu jsou používány proměnné:

- x_{is} [min] – časový posun spoje $i \in L$ ve směru $s \in S$ vzhledem k nejdříve možnému příjezdu spoje $tpku_{is}$ a $tpmn_{is}$
- y_{js} [min] – časový posun spoje $j \in L$ ve směru $s \in S$ vzhledem k nejdříve možnému odjezdu spoje $toku_{js}$ a $tomn_{js}$
- hku_{ijs} [min] – doba čekání cestujícího přestupujícího ze spoje $i \in Plku$ na spoj $j \in Olku$ ve směru $s \in S$ v přestupním uzlu Krajský úřad
- hmn_{ijs} [min] – doba čekání cestujícího přestupujícího ze spoje $i \in Plmn$ na spoj $j \in Olmn$ ve směru $s \in S$ v přestupním uzlu Masarykovo náměstí
- zku_{ijs} [-] – pomocná bivalentní proměnná určující vznik přestupní vazby mezi příjíždějícím spojem $i \in Plku$ a odjíždějícím spojem $j \in Olku$ ve směru $s \in S$ v přestupním uzlu Krajský úřad
- zmn_{ijs} [-] – pomocná bivalentní proměnná určující vznik přestupní vazby mezi příjíždějícím spojem $i \in Plmn$ a odjíždějícím spojem $j \in Olmn$ ve směru $s \in S$ v přestupním uzlu Masarykovo náměstí

Oproti základnímu modelu jsou proměnné časový posun spoje x_{is} a y_{js} nově rozlišovány i podle směru jízdy. Doba čekání cestujícího a pomocná bivalentní proměnná určující vznik přestupní vazby jsou nově rozděleny na dvě samostatné proměnné dle přestupního uzlu, ve kterém přestupní vazba, které se týkají, vzniká.

5.2. Rozšíření modelu o podmínky provozních požadavků

Po sestavení modelů Model1_sedlo a Model1_spicka a ověření jejich funkčnosti výpočetním experimentem byly přidány podmínky pro zajištění dostatku času pro přejezd vozidla mezi koordinovaným přestupním uzlem obsluženým v prvním směru na jeho točnu a přejezd zpět z točny do koordinovaného přestupního uzlu obsluženého nyní v druhém směru. Tyto rozšířené modely s provozními podmínkami budou dále značeny jako Model2_sedlo a Model2_spicka.

Pro potřeby těchto podmínek byly zavedeny následující nové konstanty:

- o [min] – doba obratu v točně
- w_i [min] – doba oběhu vozidla na lince $i \in L$
- $\varepsilon^{MN-točna-MN}$ [min] – doba jízdy vozidla v relaci Masarykovo náměstí – točna – Masarykovo náměstí
- $\varepsilon^{KU-točna-KU}$ [min] – doba jízdy vozidla v relaci Krajský úřad – točna – Krajský úřad

Hodnota doby obratu na točně byla stanovena pro všechny linky i točny jednotně jako 1 minuta. Hodnota doby oběhu vozidla dané linky stejně jako hodnoty dob jízdy v jednotlivých relacích byly stanoveny dle vozidlových jízdních řádů poskytnutých panem Ing. Nenutilem z Dopravního podniku města Pardubice. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulkách č. 4 a č. 5. U linky č. 6 byla pro zjednodušení jako točna uvažována pouze zastávka Rosice, točna ačkoliv část spojů končí už na zastávce Polabiny, Sluneční. Obdobně u linky č. 2 je za točnu považováno obratiště Zámeček, ačkoliv část spojů ze zastávky Zámeček pokračuje jako linka č. 12 až do zastávky Mnětice, točna.

Tabulka č. 4: Doby oběhů vozidel

Číslo linky	Doba oběhu [min]
1	60
2	80
3	90
6	80
11	60

Tabulka č. 5: Doba jízdy vozidel na jednotlivých relacích

Číslo linky	Relace	Točna	Doba jízdy na této relaci [min]
1	MN-JES-MN	Jesničánky, točna	17
	KU-SL-KU	Slovany, točna	13
2	KU-Z-KU	Zámeček	23
	MN-POL-MN	Polabiny, točna	25
3	MN-HLN-MN	Hlavní nádraží	8
	MN-LB-MN	Lázně Bohdaneč, točna	43
6	MN-ROS-MN	Rosice, točna	28
	MN-DUK-MN	Dukla, náměstí	32
11	KU-GL-KU	Globus	28
	KU-DB-KU	Dubina, sever	17

Obecný tvar těchto podmínek je:

$$tpmn_{iS} + x_{iS} + \varepsilon^{MN-točna-MN} + o \leq tomn_{iS} + y_{iS}$$

$$toku_{iS} + y_{iS} + \varepsilon^{KU-točna-KU} + o \leq tpku_{iS} + y_{iS} + w_i$$

První podmínka zajišťuje, aby hodnota reálného času odjezdu vozidla z Masarykova náměstí nebyla menší než reálný čas příjezdu téhož vozidla v prvním směru na Masarykovo náměstí zvětšený o dobu potřebnou na přejezd vozidla mezi Masarykovým náměstím, točnou a jeho návratem na Masarykovo náměstí a dobu obratu na točně.

Druhá podmínka zajišťuje, aby hodnota reálného času příjezdu vozidla na Krajský úřad zvětšená o dobu oběhu vozidla nebyla menší než reálný čas odjezdu téhož vozidla v prvním směru na Krajský úřad zvětšený o dobu potřebnou na přejezd vozidla mezi Krajským úřadem, točnou a jeho návratem na zastávku Krajský úřad a dobu obratu na točně. U linek, které obsluhují pouze jeden koordinovaný přestupní uzel se bude reálný čas příjezdu a odjezdu týkat pouze tohoto přestupního uzlu.

Po provedení výpočetního experimentu byla u modelu pro období špičky zjištěna potřeba upravit skupinu podmínek, které zajišťují nepřekročení maximálního povoleného posunu skutečným časovým posunem příjezdu/odjezdu spoje, zdvojnásobením maximálního povoleného časového posunu a_{LS} a b_{LS} . Tato potřeba vyplývá z rozdílných hodnot provozního intervalu linek v období špičky a ze skutečnosti, že hodnota doby oběhů u některých linek překračuje jednu hodinu.

5.3. Vstupní data pro optimalizační výpočet

Pro potřeby modelu bylo nutné koordinované linky vhodně přečíslovat. Protože jsou množiny přijíždějících či odjíždějících linek v programu XPress IVE, který byl použit k řešení matematického modelu, definovány jako data typu pole, bylo nutné zajistit, aby indexy po sobě bezprostředně následovaly. Přiřazení indexů koordinovaným linkám je uvedeno v tabulce č. 6.

Tabulka č. 6: Přechíslování koordinovaných linek pro potřeby modelu

Masarykovo náměstí					
číslo linky	1	2	3	6	-
index linky	1	2	3	4	-
Krajský úřad					
číslo linky	1	2	11	-	-
index linky	1	2	3	-	-
Všechny koordinované linky					
číslo linky	1	2	3	6	11
index linky	1	2	3	4	5

Jak je v tabulce znázorněno, bylo třeba přiřadit indexy koordinovaným linkám zvlášť pro oba koordinované uzly, protože se množiny linek, které je obsluhují, liší. Pro množinu příjíždějících linek $Plmn$ a odjíždějících linek $Olmn$ v přestupním uzlu Masarykovo náměstí je tedy použito přechíslování uvedené ve vrchní části tabulky č. 4 označené „Masarykovo náměstí“ a pro množinu příjíždějících linek $Plku$ a odjíždějících linek $Olku$ v přestupním uzlu Krajský úřad je použito přechíslování, které je uvedeno ve střední části tabulky č. 4 označené „Krajský úřad“. Přestože index 3 je použit v každém přestupním uzlu pro označení jiné linky, jde o jednoznačné určení čísla linky – linka č. 3 obsluhuje pouze přestupní uzel Masarykovo náměstí a linka č. 11 naopak pouze Krajský úřad, tedy pokud je index 3 u veličiny označené písmeny „mn“, jedná se vždy o linku č. 6 a naopak pokud je veličina označená písmeny „ku“, půjde vždy o linku č. 11. Například fmn_{32} je doba čekání cestujícího přestupujícího z linky č. 3 (index 3) na linku č. 2 (index 2) na Masarykově náměstí, zatímco fku_{32} je doba čekání cestujícího přestupujícího z linky č. 11 (index 3) na linku č. 2 (index 2) v přestupním uzlu Krajský úřad.

Jak je psáno výše, stejný index lze použít pouze u veličin rozlišovaných dle obsluhovaného přestupního uzlu, pro ostatní veličiny je tedy nutno zavést jiné číslování, ve kterém bude každému číslu linky přiřazen unikátní index – toto přechíslování je uvedeno ve spodní části tabulky č. 4 označené „Všechny koordinované linky“ a je například využito u množiny všech koordinovaných linek L nebo provozního intervalu $takt_i$ spojů linky $i \in L$.

Hodnoty intenzit cestujících přestupujících v daném přestupním uzlu uvedené v tabulce č. 6 byly převzaty z dopravního průzkumu provedeného v roce 2015 společností CZECH Consult, spol. s r. o. Ta zpracovala anketní průzkum *Počet přestupujících osob mezi jednotlivými linkami Pardubické MHD* pro zastávky Masarykovo náměstí a náměstí Republiky. Pro přestupní uzel Krajský úřad byly použity hodnoty intenzit uvedené pro zastávku náměstí

Republiky, protože jde o zastávky sousedící a obsluhují je stejné koordinované linky. Hodnoty intenzit cestujících přestupujících z linky č. 1 na linku č. 2 (a naopak) uvedené v tabulce č. 7 pro Krajský úřad (označené písmeny KU v závorce) jsou velmi nízké z toho důvodu, že v současné době zde není zaručen přestup a cestující raději přestoupí až na zastávce Masarykovo náměstí, kde je k dispozici informační tabule s informacemi o příjezdech, odjezdech a zpoždění spojů. Intenzita přestupujících z linky č. 2 na linku č. 1 na Krajském úřadu je ve směru 2 rovna nule, pro potřeby modelu je ale nutné, aby minimální hodnota intenzity přestupujících cestujících byla rovna alespoň 1 (respektive aby byla vyšší než nula), protože figuruje v kritériální funkci a pokud by byla tato intenzita rovna nule, nezapočítávala by se do optimalizačního kritéria doba čekání cestujících při daném přestupu (byla by po násobení nulovou intenzitou přestupujících vždy rovna nule). Proto zde byla do modelu dosazena hodnota 1.

Tabulka č. 7: Hodnoty intenzit přestupujících cestujících [10]

směr 1		směr 2	
přestup	intenzita přestupujících cestujících [počet os./pracovní den]	přestup	intenzita přestupujících cestujících [počet os./pracovní den]
3 - 2 (MN)	55	2 - 3 (MN)	127
6 - 2 (MN)	31	2 - 6 (MN)	134
1 - 3 (MN)	226	3 - 1 (MN)	219
11 - 2 (KU)	45	2 - 11 (KU)	15
1 - 2 (KU)	7	2 - 1 (KU)	0

Nejdříve možný odjezd a příjezd spojů byl stanoven jako nula minut pro spoje, které obsluhují pouze jeden přestupní uzel a u spojů, které obsluhují oba přestupní uzly byl stanoven nula minut v prvním obslouženém přestupním uzlu a čtyři minuty v druhém přestupním uzlu, což odpovídá času potřebnému na přejezd spoje mezi přestupními uzly. Maximální povolený časový posun spoje odpovídá intervalu mezi spoji, ve kterém spoje jezdí, sníženému o jednu minutu, tedy např. linka č. 1, která má v období sedla provozní interval 30 minut, má maximální povolený časový posun spoje a_{11} v sedle roven $30 - 1 = 29$ minut. Provozní intervaly jednotlivých linek jsou uvedeny v tabulce č. 8. Hodnota přestupní doby na Krajském úřadě byla stanovena na 4 minuty, na Masarykově náměstí pak na 3 minuty. Doba jízdy mezi přestupními uzly t_j je rovna 4 minutám a pomocná konstanta M má hodnotu 10 000.

Tabulka č. 8: Provozní intervaly koordinovaných linek

číslo linky	takt (sedlo) [min]	takt (špička) [min]
1	30	20
2	30	20
3	30	30
6	30	20
11	30	30

5.4. Kompletní matematický model

Kompletní matematický model Model2_sedlo má tvar:

$$\begin{aligned} \min f(x, y, h, z) = & fku_{12} * hku_{121} + fku_{12} * hku_{122} + fku_{32} * hku_{321} + fku_{32} * hku_{322} + fmn_{32} * hmn_{321} \\ & * fmn_{32} hmn_{322} + fmn_{42} * hmn_{421} + fmn_{42} * hmn_{422} + fmn_{13} * hmn_{131} + fmn_{13} \\ & * hmn_{132} + fku_{21} * hku_{211} + fku_{21} * hku_{212} + fku_{23} * hku_{231} + fku_{23} * hku_{232} \\ & + fmn_{23} * hmn_{231} + fmn_{23} * hmn_{232} + fmn_{24} * hmn_{241} + fmn_{24} * hmn_{242} + fmn_{31} \\ & * hmn_{311} + fmn_{31} * hmn_{312} \end{aligned}$$

za podmínek:

$$\begin{aligned} & (toku_{21} + y_{21}) - (tpku_{11} + x_{11}) - tprestku \geq M * (zku_{121} - 1) \\ & (toku_{21} + takt_2 + y_{21}) - (tpku_{11} + x_{11}) - tprestku \geq M * (zku_{122} - 1) \\ & (toku_{21} + y_{21}) - (tpku_{31} + x_{51}) - tprestku \geq M * (zku_{321} - 1) \\ & (toku_{21} + takt_2 + y_{21}) - (tpku_{31} + x_{51}) - tprestku \geq M * (zku_{322} - 1) \\ & (tomn_{21} + y_{21}) - (tpmn_{31} + x_{31}) - tprestmn \geq M * (zmn_{321} - 1) \\ & (tomn_{21} + takt_2 + y_{21}) - (tpmn_{31} + x_{31}) - tprestmn \geq M * (zmn_{322} - 1) \\ & (tomn_{21} + y_{21}) - (tpmn_{41} + x_{41}) - tprestmn \geq M * (zmn_{421} - 1) \\ & (tomn_{21} + takt_2 + y_{21}) - (tpmn_{41} + x_{41}) - tprestmn \geq M * (zmn_{422} - 1) \\ & (tomn_{31} + y_{31}) - (tpmn_{11} + x_{11}) - tprestmn \geq M * (zmn_{131} - 1) \\ & (tomn_{31} + takt_3 + y_{31}) - (tpmn_{11} + x_{11}) - tprestmn \geq M * (zmn_{132} - 1) \\ \\ & (toku_{12} + y_{12}) - (tpku_{22} + x_{22}) - tprestku \geq M * (zku_{211} - 1) \\ & (toku_{12} + takt_1 + y_{12}) - (tpku_{22} + x_{22}) - tprestku \geq M * (zku_{212} - 1) \\ & (toku_{32} + y_{52}) - (tpku_{22} + x_{22}) - tprestku \geq M * (zku_{231} - 1) \\ & (toku_{32} + takt_5 + y_{52}) - (tpku_{22} + x_{22}) - tprestku \geq M * (zku_{232} - 1) \\ & (tomn_{32} + y_{32}) - (tpmn_{22} + x_{22}) - tprestmn \geq M * (zmn_{231} - 1) \\ & (tomn_{32} + takt_3 + y_{32}) - (tpmn_{22} + x_{22}) - tprestmn \geq M * (zmn_{232} - 1) \\ & (tomn_{42} + y_{42}) - (tpmn_{22} + x_{22}) - tprestmn \geq M * (zmn_{241} - 1) \\ & (tomn_{42} + takt_4 + y_{42}) - (tpmn_{22} + x_{22}) - tprestmn \geq M * (zmn_{242} - 1) \\ & (tomn_{12} + y_{12}) - (tpmn_{32} + x_{32}) - tprestmn \geq M * (zmn_{311} - 1) \\ & (tomn_{12} + takt_1 + y_{12}) - (tpmn_{32} + x_{32}) - tprestmn \geq M * (zmn_{312} - 1) \\ \\ & (toku_{21} + y_{21}) - (tpku_{11} + x_{11}) - tprestku \leq hku_{121} + M * (1 - zku_{121}) \\ & (toku_{21} + takt_2 + y_{21}) - (tpku_{11} + x_{11}) - tprestku \leq hku_{122} + M * (1 - zku_{122}) \\ & (toku_{21} + y_{21}) - (tpku_{31} + x_{51}) - tprestku \leq hku_{321} + M * (1 - zku_{321}) \\ & (toku_{21} + takt_2 + y_{21}) - (tpku_{31} + x_{51}) - tprestku \leq hku_{322} + M * (1 - zku_{322}) \\ & (tomn_{21} + y_{21}) - (tpmn_{31} + x_{31}) - tprestmn \leq hmn_{321} + M * (1 - zmn_{321}) \end{aligned}$$

$$(tomn_{21} + takt_2 + y_{21}) - (tpmn_{31} + x_{31}) - tprestmn \leq hmn_{322} + M * (1 - zmn_{322})$$

$$(tomn_{21} + y_{21}) - (tpmn_{41} + x_{41}) - tprestmn \leq hmn_{421} + M * (1 - zmn_{421})$$

$$(tomn_{21} + takt_2 + y_{21}) - (tpmn_{41} + x_{41}) - tprestmn \leq hmn_{422} + M * (1 - zmn_{422})$$

$$(tomn_{31} + y_{31}) - (tpmn_{11} + x_{11}) - tprestmn \leq hmn_{131} + M * (1 - zmn_{131})$$

$$(tomn_{31} + takt_3 + y_{31}) - (tpmn_{11} + x_{11}) - tprestmn \leq hmn_{132} + M * (1 - zmn_{132})$$

$$(toku_{12} + y_{12}) - (tpku_{22} + x_{22}) - tprestkku \leq hku_{211} + M * (1 - zku_{211})$$

$$(toku_{12} + takt_1 + y_{12}) - (tpku_{22} + x_{22}) - tprestkku \leq hku_{212} + M * (1 - zku_{212})$$

$$(toku_{32} + y_{52}) - (tpku_{22} + x_{22}) - tprestkku \leq hku_{231} + M * (1 - zku_{231})$$

$$(toku_{32} + takt_5 + y_{52}) - (tpku_{22} + x_{22}) - tprestkku \leq hku_{232} + M * (1 - zku_{232})$$

$$(tomn_{32} + y_{32}) - (tpmn_{22} + x_{22}) - tprestmn \leq hmn_{231} + M * (1 - zmn_{231})$$

$$(tomn_{32} + takt_3 + y_{32}) - (tpmn_{22} + x_{22}) - tprestmn \leq hmn_{232} + M * (1 - zmn_{232})$$

$$(tomn_{42} + y_{42}) - (tpmn_{22} + x_{22}) - tprestmn \leq hmn_{241} + M * (1 - zmn_{241})$$

$$(tomn_{42} + takt_4 + y_{42}) - (tpmn_{22} + x_{22}) - tprestmn \leq hmn_{242} + M * (1 - zmn_{242})$$

$$(tomn_{12} + y_{12}) - (tpmn_{32} + x_{32}) - tprestmn \leq hmn_{311} + M * (1 - zmn_{311})$$

$$(tomn_{12} + takt_1 + y_{12}) - (tpmn_{32} + x_{32}) - tprestmn \leq hmn_{312} + M * (1 - zmn_{312})$$

$$tpmn_{11} + x_{11} \geq tpku_{11} + x_{11} + tj$$

$$toku_{21} + y_{21} \geq tomn_{21} + y_{21} + tj$$

$$toku_{12} + y_{12} \geq tomn_{12} + y_{12} + tj$$

$$tpmn_{22} + x_{22} \geq tpku_{22} + x_{22} + tj$$

$$tpmn_{11} + x_{11} + \varepsilon^{MN-JES-MN} + o \leq tomn_{12} + y_{12}$$

$$toku_{12} + y_{12} + \varepsilon^{KU-SL-KU} + o \leq tpku_{11} + y_{11} + w_1$$

$$tpku_{22} + x_{22} + \varepsilon^{KU-Z-KU} + o \leq toku_{21} + y_{21}$$

$$tomn_{21} + y_{21} + \varepsilon^{MN-POL-MN} + o \leq tpmn_{22} + y_{22} + w_2$$

$$tpmn_{31} + x_{31} + \varepsilon^{MN-HLN-MN} + o \leq tomn_{32} + y_{32}$$

$$tomn_{32} + y_{32} + \varepsilon^{MN-LB-MN} + o \leq tpmn_{31} + y_{31} + w_3$$

$$tpmn_{41} + x_{41} + \varepsilon^{MN-ROS-MN} + o \leq tomn_{42} + y_{42}$$

$$tomn_{42} + y_{42} + \varepsilon^{MN-DUK-MN} + o \leq tpmn_{41} + y_{41} + w_4$$

$$tpku_{31} + x_{51} + \varepsilon^{KU-GL-KU} + o \leq toku_{32} + y_{52}$$

$$toku_{32} + y_{52} + \varepsilon^{KU-DB-KU} + o \leq tpku_{31} + y_{51} + w_5$$

$$zku_{321} + zku_{322} \geq 1$$

$$zku_{121} + zku_{122} \geq 1$$

$$zmn_{131} + zmn_{132} \geq 1$$

$$zmn_{321} + zmn_{322} \geq 1$$

$$zmn_{421} + zmn_{422} \geq 1$$

$$zku_{231} + zku_{232} \geq 1$$

$$zku_{211} + zku_{212} \geq 1$$

$$zmn_{231} + zmn_{232} \geq 1$$

$$zmn_{241} + zmn_{242} \geq 1$$

$$zmn_{311} + zmn_{312} \geq 1$$

$$x_{11} \leq a_{11}$$

$$x_{31} \leq a_{31}$$

$$x_{41} \leq a_{41}$$

$$x_{51} \leq a_{51}$$

$$y_{21} \leq b_{21}$$

$$y_{31} \leq b_{31}$$

$$x_{22} \leq a_{22}$$

$$x_{32} \leq a_{32}$$

$$y_{12} \leq b_{12}$$

$$y_{32} \leq b_{32}$$

$$y_{42} \leq b_{42}$$

$$y_{52} \leq b_{52}$$

$$x_{11} \geq 0$$

$$x_{31} \geq 0$$

$$x_{41} \geq 0$$

$$x_{51} \geq 0$$

$$y_{21} \geq 0$$

$$y_{31} \geq 0$$

$$x_{22} \geq 0$$

$$x_{32} \geq 0$$

$$y_{12} \geq 0$$

$$y_{32} \geq 0$$

$$y_{42} \geq 0$$

$$y_{52} \geq 0$$

$$hku_{121} \geq 0$$

$$hku_{122} \geq 0$$

$$hku_{321} \geq 0$$

$$hku_{322} \geq 0$$

$$hmn_{131} \geq 0$$

$$hmn_{132} \geq 0$$

$$hmn_{321} \geq 0$$

$$hmn_{322} \geq 0$$

$$hmn_{421} \geq 0$$

$$hmn_{422} \geq 0$$

$$hku_{211} \geq 0$$

$$hku_{212} \geq 0$$

$$hku_{231} \geq 0$$

$$hku_{232} \geq 0$$

$$hmn_{231} \geq 0$$

$$hmn_{232} \geq 0$$

$$hmn_{241} \geq 0$$

$$hmn_{242} \geq 0$$

$$hmn_{311} \geq 0$$

$$hmn_{312} \geq 0$$

$$zku_{121} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{122} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{321} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{322} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{131} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{132} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{321} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{322} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{421} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{422} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{211} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{212} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{321} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{322} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{231} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{232} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{241} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{242} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{311} \in \{0; 1\}$$

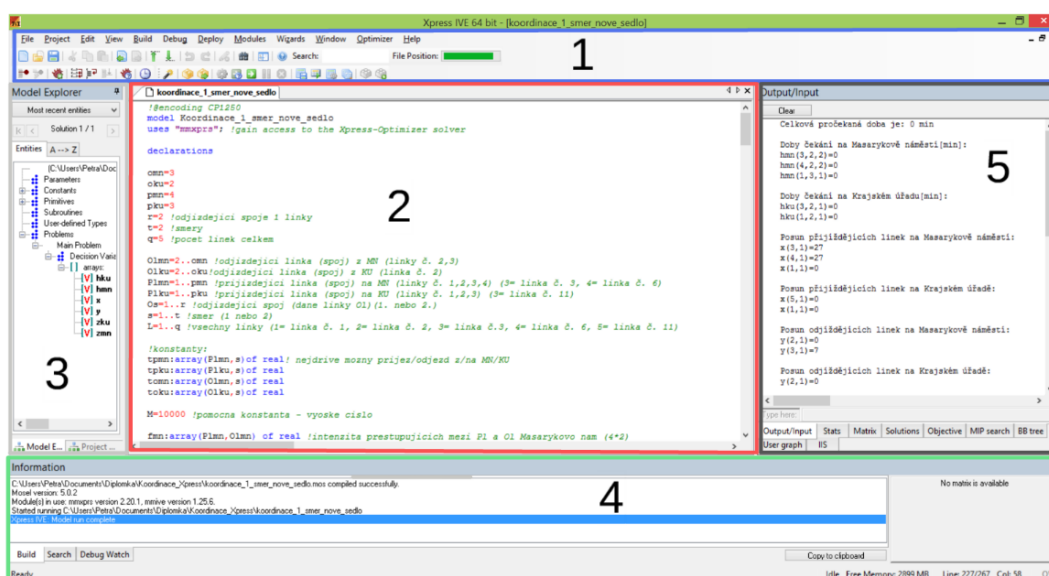
$$zmn_{312} \in \{0; 1\}$$

6. Optimalizační software Xpress-IVE

Pro řešení matematického modelu v této práci byl zvolen optimalizační software Xpress-IVE společnosti FICO. Tento software byl vyvinut pro řešení optimalizačních úloh lineárního programování a neklade na své uživatele vysoké nároky na znalost programování a programovacího jazyka. Další jeho výhodou je, že společnost FICO poskytuje studentům možnost jeho stažení a bezplatného užívání pro akademické účely.

6.1. Pracovní prostředí Xpress-IVE a jeho funkce

Pracovní prostředí software Xpress-IVE je rozděleno do pěti částí (potažmo oken), jak je naznačeno na obrázku č. 14 barevnými rámečky označenými čísly. V horní části plochy (rámeček 1) se nachází menu a lišta nástrojů. Nejdůležitějšími nástroji jsou zde tlačítka „Compile“ v podobě ozubeného kola, které slouží ke kompilaci modelu a „Run model“ v podobě zeleného tlačítka se šipkou, které spustí běh modelu. Ve střední části (rámeček 2) se nachází „editor window“, tedy okno, ve kterém se zobrazuje pracovní soubor s textem programu. Nalevo od něj lze najít okno s navigací projektu a historií příkazů (rámeček 3) – zde se zobrazují všechny prvky (veličiny) použité v modelu. Okno v dolní části obrazovky (rámeček 4) slouží k zobrazení všech hlášek souvisejících s chybnou syntaxí a jiných chyb v textu programu, které software při kompilaci modelu najde. Poslední část pracovního prostředí, nacházející se vpravo od prostředního okna (rámeček 5), je věnována vstupu a výstupu programu. Toto okno je rozděleno do jednotlivých záložek, z nichž nejdůležitější je záložka s názvem „Input/Output“ (tedy vstup/výstup), kde se po spuštění modelu vypisují výsledky, pokud tak bylo přikázáno uživatelem, a záložka „Stats“ (statistiky), kde lze najít statistiky o výpočtu řešení modelu. [11]



Obr. č. 14: Pracovní prostředí softwaru Xpress-IVE s vyznačenými jednotlivými částmi

Po vytvoření nového souboru a textu modelu uživatel spustí kompilaci, která ověří, zda se v textu programu nenachází syntaktické chyby. Pokud ano, je na ně upozorněno žlutým podbarvením příslušného řádku textu, kde se chyba nachází, a je vypsána chybová hláška ve spodním okně o umístění chyby, číslo chybové hlášky a její význam. Pokud není nalezena žádná syntaktická chyba, je ve spodním okně vypsána hláška o úspěšné kompilaci daného souboru podbarvená modrou barvou. Nyní je možné spustit model pomocí tlačítka „Run model“ a pokud je požadován výpis výsledků, zobrazí se v pravém oknu. Zde je také možné na položce „Status“ v záložce „Stats“ ověřit, zda bylo nalezeno optimální řešení. Je však třeba brát na vědomí, že úspěšná kompilace textu programu nezaručuje správnost modelu a jeho fungování, pouze potvrzuje jeho správnost z hlediska syntaxe programovacího jazyku Mosel. Obdobně nalezení optimálního řešení nemusí značit, že model pracuje zamýšleným způsobem.

6.2. Transformace matematického modelu do jazyku Mosel

Software Xpress-IVE používá programovací jazyk Mosel. Jde o vyšší programovací jazyk, který umožňuje uživateli definovat model v podobě blízké matematické formulaci. Při transformaci matematického modelu je třeba dodržet základní strukturu modelu stanovenou programovacím jazykem Mosel. Text programu začíná klíčovým slovem `model`, po němž následuje název modelu a dále příkaz vyvolávající knihovnu řešících metod. Příklad úvodní části modelu:

```
model Koordinace_1_smer_sedlo
```

```
uses "mmxprs";
```

Následuje deklarační část, v níž musí být deklarovány všechny veličiny v modelu vystupující. Deklarační část je oddělena od ostatního textu programu výrazem „`declarations`“ na jeho počátku a spojením „`end-declarations`“ na jeho konci. Následuje příklad deklarační části:

```
declarations
```

```
omn=4
```

```
pmn=4
```

```
t=2
```

```
Olmn=2..omn
```

```

Plmn=1..pmn
s=1..t
tpmn:array(Plmn,s)of real
y:array(Olmn,s) of mpvar

```

end-declarations

Nejprve jsou definovány indexy, které jsou dále použity k definování rozsahu množin. Například množina příjíždějících linek na Masarykovo náměstí *Plmn* má rozsah 1 až 4. Obdobně jsou v modelu definovány i ostatní tři množiny *Olmn*, *Plku* a *Olku*. Dále je třeba definovat množinu nejdříve možných časů příjezdu či odjezdu v daných přestupních uzlech. Použitím klíčového spojení „array of real“ je deklarováno, že jde o veličinu typu pole konstant, jejichž hodnoty jsou z oboru reálných čísel, a která je vázána na veličiny uzavřené v kulatých závorkách. V příkladu výše je uvedena deklarace nejdříve možného času příjezdu linky na Masarykovo náměstí *tpmn*, která je polem o rozsahu velikosti veličiny *Plmn* a velikosti veličiny *s*, tedy v tomto případě má pole velikost 4 x 2. Druhý typ proměnné typu pole je deklarován klíčovým spojením „array of mpvar“, které symbolizuje, že jde o pole proměnných. Po ukončení deklarační části následuje přiřazení hodnot všem konstantám, které v modelu vystupují. Jde například o časy nejdříve možných odjezdů a příjezdů spojů, maximální povolený časový posun spoje nebo hodnoty intenzit přestupujících cestujících. Konkrétní hodnoty jsou unikátní pro každý model a vyplývají z provozní situace, která je modelována.

Další část modelu tvoří soustava omezujících podmínek a optimalizační kritérium. Pokud není definováno jinak, software předpokládá, že všechny proměnné mohou nabývat hodnot v oboru nezáporných čísel. Proto je u proměnných s jiným definičním oborem třeba doplnit obligatorní podmínky. Užívá se zde klíčových výrazů „is_integer“ pro obor celých nezáporných čísel a „is_binary“ u binárních proměnných, které mohou nabývat pouze hodnoty 0 nebo 1.

Nejprve je definována kriteriální funkce a poté je volána procedura *minimize*, která minimalizuje hodnotu optimalizačního kritéria uvedeného za klíčovým slovem „minimize“. Příklad zápisu minimalizace kriteriální funkce je uveden níže. U maximalizačních úloh je zápis kriteriální funkce analogický, pouze se využije procedura *maximize* maximalizující hodnotu optimalizačního kritéria.

```
celkova_procekana_doba:=fmn(3,2)*hmn(3,2)+fmn(4,2)*hmn(4,2)+ hku(1,2)*fku(1,2)
```

```
minimize(celkova_procekana_doba)
```

Poslední částí modelu jsou příkazy sloužící k vypsání dosažených výsledků. Používá se zde příkaz *writeln*, který slouží k vypsání řetězce znaků uzavřených do uvozovek na obrazovku a dále příkazu *getsol*, který vrací vypočtenou hodnotu kriteriální funkce (tedy řešení – odtud název, který je zkratkou pro „get the solution“, v překladu získej řešení) a příkaz *getobjval*, který je nazván zkratkou pro „get the objective function value“, tedy v překladu získej hodnotu účelové funkce a který vrací hodnotu proměnné, která byla optimalizována. Příkaz pro vypsání dosaženého řešení může mít např. tvar:

```
writeln("Celková pročekaná doba je: ", getobjval," min ")
```

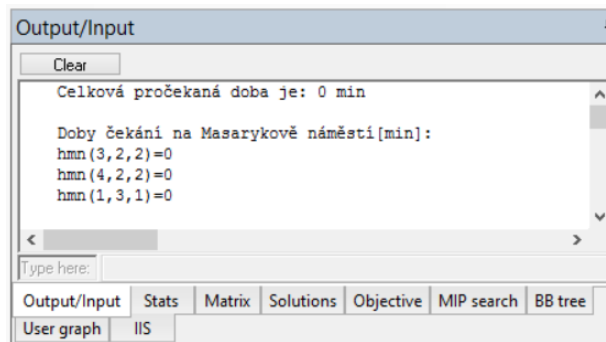
```
writeln(" ")
```

```
writeln("Doby čekání na Masarykově náměstí[min]:")
```

```
forall(k in Os|getsol(zmn(3,2,k))=1)writeln("hmn(",3,"",",2","",k,"")=",getsol(hmn(3,2,k)))
```

```
forall(k in Os|getsol(zmn(4,2,k))=1)writeln("hmn(",4,"",",2","",k,"")=",getsol(hmn(4,2,k)))
```

Nejprve je vypsána vypočtená hodnota optimalizačního kritéria – zde celková pročekaná doba v minutách a poté nápis "Doby čekání na Masarykově náměstí[min]:" a dále jednotlivé doby čekání pro konkrétní přestupy. Příkaz *forall* zajišťuje, že bude následující příkaz proveden pro všechny v něm definované veličiny, v tomto případě u všech veličin $zmn(3,2,k)$ kde k je z množiny Os a jejichž hodnota je rovna 1. Příklad výpisu je uveden na obr. č. 15.



Obr. č. 15: Okno software Xpress-IVE s výpisem dosažených výsledků

6.3. Text programu v optimalizačním software Xpress-IVE

Text modelu Model2_sedlo v programovacím jazyku Mosel:

```
model Model2_sedlo
uses "mmxprs";
declarations
omn=4
oku=3
pmn=4
pku=3
r=2
t=2
q=5
Olmn=1..omn
Olku=1..oku
Plmn=1..pmn
Plku=1..pku
Os=1..r
s=1..t
L=1..q
tpmn:array(Plmn,s)of real
tpku:array(Plku,s)of real
tomn:array(Olmn,s)of real
toku:array(Olku,s)of real
M=10000
fmn:array(Plmn,Olmn) of real
fku:array(Plku,Olku) of real
a:array(L,s) of real
b:array(L,s) of real
takt:array(L) of real
w:array(L) of real
x:array(L,s) of mpvar
y:array(L,s) of mpvar
hmn:array(Plmn,Olmn,Os) of mpvar
```



```
zmn:array(Plmn,Olmn,Os) of mpvar
hku:array(Plku,Olku,Os) of mpvar
zku:array(Plku,Olku,Os) of mpvar
end-declarations
tprestku:=4
tprestmn:=3
tj:=4
o:=1
eMN_JES_MN:=17
eKU_SL_KU:=13
eKU_Z_KU:=23
eMN_POL_MN:=25
eMN_HLN_MN:=8
eMN_LB_MN:=43
eMN_ROS_MN:=28
eMN_DUK_MN:=32
eKU_GL_KU:=28
eKU_DB_KU:=17
tpmn::[4,0,
      0,4,
      0,0,
      0,0]
tpku::[0,0,
      0,0,
      0,0]
tomn::[0,0,
      0,0,
      0,0,
      0,0]
toku::[0,4,
      4,0,
      0,0]
```

fmn::[0,0,226,0,
219,0,127,134,
219,55,0,0,
0,31,0,0]

fkun::[0,7,0,
1,0,15,
0,45,0]

a::[29,29,
29,29,
29,29,
29,29,
29,29]

b::[29,29,
29,29,
29,29,
29,29,
29,29]

takt::[30,30,30,30,30]

w::[60,80,90,80,60]

$(tomn(2,1)+y(2,1))-(tpmn(3,1)+x(3,1))-tprestmn \geq M^*(zmn(3,2,1)-1)$
 $(tomn(2,1)+takt(2)+y(2,1))-(tpmn(3,1)+x(3,1))-tprestmn \geq M^*(zmn(3,2,2)-1)$
 $(tomn(2,1)+y(2,1))-(tpmn(4,1)+x(4,1))-tprestmn \geq M^*(zmn(4,2,1)-1)$
 $(tomn(2,1)+takt(2)+y(2,1))-(tpmn(4,1)+x(4,1))-tprestmn \geq M^*(zmn(4,2,2)-1)$
 $(tomn(3,1)+y(3,1))-(tpmn(1,1)+x(1,1))-tprestmn \geq M^*(zmn(1,3,1)-1)$
 $(tomn(3,1)+takt(3)+y(3,1))-(tpmn(1,1)+x(1,1))-tprestmn \geq M^*(zmn(1,3,2)-1)$
 $(tomn(3,2)+y(3,2))-(tpmn(2,2)+x(2,2))-tprestmn \geq M^*(zmn(2,3,1)-1)$
 $(tomn(3,2)+takt(3)+y(3,2))-(tpmn(2,2)+x(2,2))-tprestmn \geq M^*(zmn(2,3,2)-1)$
 $(tomn(4,2)+y(4,2))-(tpmn(2,2)+x(2,2))-tprestmn \geq M^*(zmn(2,4,1)-1)$
 $(tomn(4,2)+takt(4)+y(4,2))-(tpmn(2,2)+x(2,2))-tprestmn \geq M^*(zmn(2,4,2)-1)$
 $(tomn(1,2)+y(1,2))-(tpmn(3,2)+x(3,2))-tprestmn \geq M^*(zmn(3,1,1)-1)$
 $(tomn(1,2)+takt(1)+y(1,2))-(tpmn(3,2)+x(3,2))-tprestmn \geq M^*(zmn(3,1,2)-1)$

$(\text{toku}(2,1)+y(2,1))-(\text{tpku}(3,1)+x(5,1))-\text{tprestku} \geq M^*(\text{zku}(3,2,1)-1)$
 $(\text{toku}(2,1)+\text{takt}(2)+y(2,1))-(\text{tpku}(3,1)+x(5,1))-\text{tprestku} \geq M^*(\text{zku}(3,2,2)-1)$
 $(\text{toku}(2,1)+y(2,1))-(\text{tpku}(1,1)+x(1,1))-\text{tprestku} \geq M^*(\text{zku}(1,2,1)-1)$
 $(\text{toku}(2,1)+\text{takt}(2)+y(2,1))-(\text{tpku}(1,1)+x(1,1))-\text{tprestku} \geq M^*(\text{zku}(1,2,2)-1)$
 $(\text{toku}(3,2)+y(5,2))-(\text{tpku}(2,2)+x(2,2))-\text{tprestku} \geq M^*(\text{zku}(2,3,1)-1)$
 $(\text{toku}(3,2)+\text{takt}(5)+y(5,2))-(\text{tpku}(2,2)+x(2,2))-\text{tprestku} \geq M^*(\text{zku}(2,3,2)-1)$
 $(\text{toku}(1,2)+y(1,2))-(\text{tpku}(2,2)+x(2,2))-\text{tprestku} \geq M^*(\text{zku}(2,1,1)-1)$
 $(\text{toku}(1,2)+\text{takt}(1)+y(1,2))-(\text{tpku}(2,2)+x(2,2))-\text{tprestku} \geq M^*(\text{zku}(2,1,2)-1)$
 $(\text{tomn}(2,1)+y(2,1))-(\text{tpmn}(3,1)+x(3,1))-\text{tprestmn} \leq \text{hmn}(3,2,1)+M^*(1-\text{zmn}(3,2,1))$
 $(\text{tomn}(2,1)+\text{takt}(2)+y(2,1))-(\text{tpmn}(3,1)+x(3,1))-\text{tprestmn} \leq \text{hmn}(3,2,2)+M^*(1-\text{zmn}(3,2,2))$
 $(\text{tomn}(2,1)+y(2,1))-(\text{tpmn}(4,1)+x(4,1))-\text{tprestmn} \leq \text{hmn}(4,2,1)+M^*(1-\text{zmn}(4,2,1))$
 $(\text{tomn}(2,1)+\text{takt}(2)+y(2,1))-(\text{tpmn}(4,1)+x(4,1))-\text{tprestmn} \leq \text{hmn}(4,2,2)+M^*(1-\text{zmn}(4,2,2))$
 $(\text{tomn}(3,1)+y(3,1))-(\text{tpmn}(1,1)+x(1,1))-\text{tprestmn} \leq \text{hmn}(1,3,1)+M^*(1-\text{zmn}(1,3,1))$
 $(\text{tomn}(3,1)+\text{takt}(3)+y(3,1))-(\text{tpmn}(1,1)+x(1,1))-\text{tprestmn} \leq \text{hmn}(1,3,2)+M^*(1-\text{zmn}(1,3,2))$
 $(\text{tomn}(3,2)+y(3,2))-(\text{tpmn}(2,2)+x(2,2))-\text{tprestmn} \leq \text{hmn}(2,3,1)+M^*(1-\text{zmn}(2,3,1))$
 $(\text{tomn}(3,2)+\text{takt}(3)+y(3,2))-(\text{tpmn}(2,2)+x(2,2))-\text{tprestmn} \leq \text{hmn}(2,3,2)+M^*(1-\text{zmn}(2,3,2))$
 $(\text{tomn}(4,2)+y(4,2))-(\text{tpmn}(2,2)+x(2,2))-\text{tprestmn} \leq \text{hmn}(2,4,1)+M^*(1-\text{zmn}(2,4,1))$
 $(\text{tomn}(4,2)+\text{takt}(4)+y(4,2))-(\text{tpmn}(2,2)+x(2,2))-\text{tprestmn} \leq \text{hmn}(2,4,2)+M^*(1-\text{zmn}(2,4,2))$
 $(\text{tomn}(1,2)+y(1,2))-(\text{tpmn}(3,2)+x(3,2))-\text{tprestmn} \leq \text{hmn}(3,1,1)+M^*(1-\text{zmn}(3,1,1))$
 $(\text{tomn}(1,2)+\text{takt}(1)+y(1,2))-(\text{tpmn}(3,2)+x(3,2))-\text{tprestmn} \leq \text{hmn}(3,1,2)+M^*(1-\text{zmn}(3,1,2))$
 $(\text{toku}(2,1)+y(2,1))-(\text{tpku}(3,1)+x(5,1))-\text{tprestku} \leq \text{hku}(3,2,1)+M^*(1-\text{zku}(3,2,1))$
 $(\text{toku}(2,1)+\text{takt}(2)+y(2,1))-(\text{tpku}(3,1)+x(5,1))-\text{tprestku} \leq \text{hku}(3,2,2)+M^*(1-\text{zku}(3,2,2))$
 $(\text{toku}(2,1)+y(2,1))-(\text{tpku}(1,1)+x(1,1))-\text{tprestku} \leq \text{hku}(1,2,1)+M^*(1-\text{zku}(1,2,1))$
 $(\text{toku}(2,1)+\text{takt}(2)+y(2,1))-(\text{tpku}(1,1)+x(1,1))-\text{tprestku} \leq \text{hku}(1,2,2)+M^*(1-\text{zku}(1,2,2))$
 $(\text{toku}(3,2)+y(5,2))-(\text{tpku}(2,2)+x(2,2))-\text{tprestku} \leq \text{hku}(2,3,1)+M^*(1-\text{zku}(2,3,1))$
 $(\text{toku}(3,2)+\text{takt}(5)+y(5,2))-(\text{tpku}(2,2)+x(2,2))-\text{tprestku} \leq \text{hku}(2,3,2)+M^*(1-\text{zku}(2,3,2))$
 $(\text{toku}(1,2)+y(1,2))-(\text{tpku}(2,2)+x(2,2))-\text{tprestku} \leq \text{hku}(2,1,1)+M^*(1-\text{zku}(2,1,1))$
 $(\text{toku}(1,2)+\text{takt}(1)+y(1,2))-(\text{tpku}(2,2)+x(2,2))-\text{tprestku} \leq \text{hku}(2,1,2)+M^*(1-\text{zku}(2,1,2))$
 $\text{toku}(2,1)+y(2,1) \geq \text{tomn}(2,1)+y(2,1)+\text{tj}$
 $\text{tpmn}(1,1)+x(1,1) \geq \text{tpku}(1,1)+x(1,1)+\text{tj}$
 $\text{toku}(1,2)+y(1,2) \geq \text{tomn}(1,2)+y(1,2)+\text{tj}$
 $\text{tpmn}(2,2)+x(2,2) \geq \text{tpku}(2,2)+x(2,2)+\text{tj}$

$tpmn(1,1)+x(1,1)+eMN_JES_MN+o \leq tomn(1,2)+y(1,2)$
 $toku(1,2)+y(1,2)+eKU_SL_KU+o \leq tpku(1,1)+x(1,1)+w(1)$
 $tpku(2,2)+x(2,2)+eKU_Z_KU+o \leq toku(2,1)+y(2,1)$
 $tomn(2,1)+y(2,1)+eMN_POL_MN+o \leq tpmn(2,2)+x(2,2)+w(2)$
 $tpmn(3,1)+x(3,1)+eMN_HLN_MN+o \leq tomn(3,2)+y(3,2)$
 $tomn(3,2)+y(3,2)+eMN_LB_MN+o \leq tpmn(3,1)+x(3,1)+w(3)$
 $tpmn(4,1)+x(4,1)+eMN_ROS_MN+o \leq tomn(4,2)+y(4,2)$
 $tomn(4,2)+y(4,2)+eMN_DUK_MN+o \leq tpmn(4,1)+x(4,1)+w(4)$
 $tpku(3,1)+x(5,1)+eKU_GL_KU+o \leq toku(3,2)+y(5,2)$
 $toku(3,2)+y(5,2)+eKU_DB_KU+o \leq tpku(3,1)+x(5,1)+w(5)$
 $zmn(3,2,1)+zmn(3,2,2) \geq 1$
 $zmn(4,2,1)+zmn(4,2,2) \geq 1$
 $zmn(1,3,1)+zmn(1,3,2) \geq 1$
 $zku(3,2,1)+zku(3,2,2) \geq 1$
 $zku(1,2,1)+zku(1,2,2) \geq 1$
 $zmn(2,3,1)+zmn(2,3,2) \geq 1$
 $zmn(2,4,1)+zmn(2,4,2) \geq 1$
 $zmn(3,1,1)+zmn(3,1,2) \geq 1$
 $zku(2,3,1)+zku(2,3,2) \geq 1$
 $zku(2,1,1)+zku(2,1,2) \geq 1$
 $x(3,1) \leq a(3,1)$
 $x(4,1) \leq a(4,1)$
 $x(1,1) \leq a(1,1)$
 $x(5,1) \leq a(5,1)$
 $y(2,1) \leq b(2,1)$
 $y(3,1) \leq b(3,1)$
 $x(2,2) \leq a(2,2)$
 $x(3,2) \leq a(3,2)$
 $y(1,2) \leq b(1,2)$
 $y(3,2) \leq b(3,2)$
 $y(4,2) \leq b(4,2)$
 $y(5,2) \leq b(5,2)$

x(3,1)>=0
x(4,1)>=0
x(1,1)>=0
x(5,1)>=0
y(2,1)>=0
y(3,1)>=0
hmn(3,2,1)>=0
hmn(3,2,2)>=0
hmn(4,2,1)>=0
hmn(4,2,2)>=0
hmn(1,3,1)>=0
hmn(1,3,2)>=0
hku(3,2,1)>=0
hku(3,2,2)>=0
hku(1,2,1)>=0
hku(1,2,2)>=0
zmn(3,2,1)is_binary
zmn(3,2,2)is_binary
zmn(4,2,1)is_binary
zmn(4,2,2)is_binary
zmn(1,3,1)is_binary
zmn(1,3,2)is_binary
zku(3,2,1)is_binary
zku(3,2,2)is_binary
zku(1,2,1)is_binary
zku(1,2,2)is_binary
x(2,2)>=0
x(3,2)>=0
y(1,2)>=0
y(3,2)>=0
y(4,2)>=0
y(5,2)>=0

hmn(2,3,1)>=0
hmn(2,3,2)>=0
hmn(2,4,1)>=0
hmn(2,4,2)>=0
hmn(3,1,1)>=0
hmn(3,1,2)>=0
hku(2,3,1)>=0
hku(2,3,2)>=0
hku(2,1,1)>=0
hku(2,1,2)>=0
zmn(2,3,1)is_binary
zmn(2,3,2)is_binary
zmn(2,4,1)is_binary
zmn(2,4,2)is_binary
zmn(3,1,1)is_binary
zmn(3,1,2)is_binary
zku(2,3,1)is_binary
zku(2,3,2)is_binary
zku(2,1,1)is_binary
zku(2,1,2)is_binary
x(3,1)is_integer
x(4,1)is_integer
x(1,1)is_integer
x(5,1)is_integer
y(2,1)is_integer
y(3,1)is_integer
hmn(3,2,1)is_integer
hmn(3,2,2)is_integer
hmn(4,2,1)is_integer
hmn(4,2,2)is_integer
hmn(1,3,1)is_integer
hmn(1,3,2)is_integer

```

hku(3,2,1)is_integer
hku(3,2,2)is_integer
hku(1,2,1)is_integer
hku(1,2,2)is_integer
x(2,2)is_integer
x(3,2)is_integer
y(1,2)is_integer
y(3,2)is_integer
y(4,2)is_integer
y(5,2)is_integer
hmn(2,3,1)is_integer
hmn(2,3,2)is_integer
hmn(2,4,1)is_integer
hmn(2,4,2)is_integer
hmn(3,1,1)is_integer
hmn(3,1,2)is_integer
hku(2,3,1)is_integer
hku(2,3,2)is_integer
hku(2,1,1)is_integer
hku(2,1,2)is_integer

celkova_procekana_doba:=
(hmn(3,2,1)*fmn(3,2))+(hmn(3,2,2)*fmn(3,2))+(hmn(4,2,1)*fmn(4,2))+(hmn(4,2,2)*fmn(4,2))+
(hmn(1,3,1)*fmn(1,3))+(hmn(1,3,2)*fmn(1,3))+(hku(3,2,1)*fku(3,2))+(hku(3,2,2)*fku(3,2))+(hku
(1,2,1)*fku(1,2))+(hku(1,2,2)*fku(1,2))+(hmn(2,3,1)*fmn(2,3))+(hmn(2,3,2)*fmn(2,3))+(hmn(2,
4,1)*fmn(2,4))+(hmn(2,4,2)*fmn(2,4))+(hmn(3,1,1)*fmn(3,1))+(hmn(3,1,2)*fmn(3,1))+(hku(2,3
,1)*fku(2,3))+(hku(2,3,2)*fku(2,3))+(hku(2,1,1)*fku(2,1))+(hku(2,1,2)*fku(2,1))

minimize(celkova_procekana_doba)

writeln("Celková pročekaná doba je: ", getobjval," min ")

writeln(" ")

writeln("Směr 1:")

writeln("Doby čekání na Masarykově náměstí[min]:")

forall(k in Os|getsol(zmn(3,2,k))=1)writeln("hmn(",3,"",2,"",k,"")=",getsol(hmn(3,2,k)))
forall(k in Os|getsol(zmn(4,2,k))=1)writeln("hmn(",4,"",2,"",k,"")=",getsol(hmn(4,2,k)))
forall(k in Os|getsol(zmn(1,3,k))=1)writeln("hmn(",1,"",3,"",k,"")=",getsol(hmn(1,3,k)))

```

```

writeln(" ")
writeln("Doby čekání na Krajském úřadu[min]:")
forall(k in Os|getsol(zku(3,2,k))=1)writeln("hku(",3,"",2,"",k,")=",getsol(hku(3,2,k)))
forall(k in Os|getsol(zku(1,2,k))=1)writeln("hku(",1,"",2,"",k,")=",getsol(hku(1,2,k)))
writeln(" ")
writeln("Posun přijíždějících linek na Masarykově náměstí:")
writeln("x(",3,"",1,")=",getsol(x(3,1)))
writeln("x(",4,"",1,")=",getsol(x(4,1)))
writeln("x(",1,"",1,")=",getsol(x(1,1)))
writeln(" ")
writeln("Posun přijíždějících linek na Krajském úřadě:")
writeln("x(",5,"",1,")=",getsol(x(5,1)))
writeln("x(",1,"",1,")=",getsol(x(1,1)))
writeln(" ")
writeln("Posun odjíždějících linek na Masarykově náměstí:")
writeln("y(",2,"",1,")=",getsol(y(2,1)))
writeln("y(",3,"",1,")=",getsol(y(3,1)))
writeln(" ")
writeln("Posun odjíždějících linek na Krajském úřadě:")
writeln("y(",2,"",1,")=",getsol(y(2,1)))
writeln(" ")
writeln("Směr 2:")
writeln("Doby čekání na Masarykově náměstí[min]:")
forall(k in Os|getsol(zmn(2,3,k))=1)writeln("hmn(",2,"",3,"",k,")=",getsol(hmn(2,3,k)))
forall(k in Os|getsol(zmn(2,4,k))=1)writeln("hmn(",2,"",4,"",k,")=",getsol(hmn(2,4,k)))
forall(k in Os|getsol(zmn(3,1,k))=1)writeln("hmn(",3,"",1,"",k,")=",getsol(hmn(3,1,k)))
writeln(" ")
writeln("Doby čekání na Krajském úřadu[min]:")
forall(k in Os|getsol(zku(2,3,k))=1)writeln("hku(",2,"",3,"",k,")=",getsol(hku(2,3,k)))
forall(k in Os|getsol(zku(2,1,k))=1)writeln("hku(",2,"",1,"",k,")=",getsol(hku(2,1,k)))
writeln(" ")
writeln("Posun přijíždějících linek na Masarykově náměstí:")

```



```

writeln("x(",2,"",2,"")=",getsol(x(2,2)))
writeln("x(",3,"",2,"")=",getsol(x(3,2)))
writeln(" ")
writeln("Posun příjezdějících linek na Krajském úřadě:")
writeln("x(",2,"",2,"")=",getsol(x(2,2)))
writeln(" ")
writeln("Posun odjíždějících linek na Masarykově náměstí:")
writeln("y(",1,"",2,"")=",getsol(y(1,2)))
writeln("y(",3,"",2,"")=",getsol(y(3,2)))
writeln("y(",4,"",2,"")=",getsol(y(4,2)))
writeln(" ")
writeln("Posun odjíždějících linek na Krajském úřadě:")
writeln("y(",1,"",2,"")=",getsol(y(1,2)))
writeln("y(",5,"",2,"")=",getsol(y(5,2)))
writeln(" ")
writeln("Vytvořené přestupní vazby na Masarykově náměstí")
forall(i in Plmn,j in Olmn|i<>j,k in
Os|getsol(zmn(i,j,k))=1)writeln("zmn(",i,"",j,"",k,"")=",getsol(zmn(i,j,k)))
writeln(" ")
writeln("Vytvořené přestupní vazby na Krajském úřadu")
forall(i in Plku,j in Olku|i<>j,k in
Os|getsol(zku(i,j,k))=1)writeln("zku(",i,"",j,"",k,"")=",getsol(zku(i,j,k)))
end-model

```

6.4. Výpis výsledků optimalizačního výpočtu

Výpis výsledků optimalizačního výpočtu modelu Model1_sedlo:

Celková pročekaná doba je: 0 min

Směr 1:

Doby čekání na Masarykově náměstí[min]:

hmn(3,2,1)=0

hmn(4,2,1)=0

hmn(1,3,2)=0

Doby čekání na Krajském úřadu[min]:

$$hku(3,2,1)=0$$

$$hku(1,2,1)=0$$

Posun přijíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$x(3,1)=20$$

$$x(4,1)=20$$

$$x(1,1)=23$$

Posun přijíždějících linek na Krajském úřadě:

$$x(5,1)=23$$

$$x(1,1)=23$$

Posun odjíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$y(2,1)=23$$

$$y(3,1)=0$$

Posun odjíždějících linek na Krajském úřadě:

$$y(2,1)=23$$

Směr 2:

Doby čekání na Masarykově náměstí[min]:

$$hmn(2,3,2)=0$$

$$hmn(2,4,2)=0$$

$$hmn(3,1,1)=0$$

Doby čekání na Krajském úřadu[min]:

$$hku(2,3,1)=0$$

$$hku(2,1,1)=0$$

Posun přijíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$x(2,2)=23$$

$$x(3,2)=20$$

Posun přijíždějících linek na Krajském úřadě:

$$x(2,2)=23$$

Posun odjíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$y(1,2)=23$$

$$y(3,2)=0$$

$$y(4,2)=0$$

Posun odjíždějících linek na Krajském úřadě:

$$y(1,2)=23$$

$$y(5,2)=27$$

Vytvořené přestupní vazby na Masarykově náměstí

$$zmn(1,3,2)=1$$

$$zmn(2,3,2)=1$$

$$zmn(2,4,2)=1$$

$$zmn(3,1,1)=1$$

$$zmn(3,2,1)=1$$

$$zmn(4,2,1)=1$$

Vytvořené přestupní vazby na Krajském úřadu

$$zku(1,2,1)=1$$

$$zku(2,1,1)=1$$

$$zku(2,3,1)=1$$

$$zku(3,2,1)=1$$

Výpis výsledků optimalizačního výpočtu modelu Model1_spicka:

Celková pročekaná doba je: 0 min

Směr 1:

Doby čekání na Masarykově náměstí[min]:

$$hmn(3,2,2)=0$$

$$hmn(4,2,1)=0$$

$$hmn(1,3,1)=0$$

Doby čekání na Krajském úřadu[min]:

$$hku(3,2,1)=0$$

$$hku(1,2,1)=0$$

Posun přijíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$x(3,1)=29$$

$$x(4,1)=9$$

$$x(1,1)=12$$

Posun přijíždějících linek na Krajském úřadě:

$$x(5,1)=12$$

$$x(1,1)=12$$

Posun odjíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$y(2,1)=12$$

$$y(3,1)=19$$

Posun odjíždějících linek na Krajském úřadě:

$$y(2,1)=12$$

Směr 2:

Doby čekání na Masarykově náměstí[min]:

$$hmn(2,3,1)=0$$

$$hmn(2,4,2)=0$$

$$hmn(3,1,1)=0$$

Doby čekání na Krajském úřadu[min]:

$$hku(2,3,1)=0$$

$$hku(2,1,1)=0$$

Posun přijíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$x(2,2)=13$$

$$x(3,2)=10$$

Posun přijíždějících linek na Krajském úřadě:

$$x(2,2)=13$$

Posun odjíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$y(1,2)=13$$

$$y(3,2)=20$$

$$y(4,2)=0$$

Posun odjíždějících linek na Krajském úřadě:

$$y(1,2)=13$$

$$y(5,2)=17$$

Vytvořené přestupní vazby na Masarykově náměstí

$$zmn(1,3,1)=1$$

$$zmn(2,3,1)=1$$

$$zmn(2,4,2)=1$$

$$zmn(3,1,1)=1$$

$$zmn(3,2,2)=1$$

$$zmn(4,2,1)=1$$

Vytvořené přestupní vazby na Krajském úřadu

$$zku(1,2,1)=1$$

$$zku(2,1,1)=1$$

$$zku(2,3,1)=1$$

$$zku(3,2,1)=1$$

Výpis výsledků optimalizačního výpočtu modelu Model2_sedlo:

Celková pročekaná doba je: 145 min

Směr 1:

Doby čekání na Masarykově náměstí[min]:

$$hmn(3,2,1)=8$$

$$hmn(4,2,1)=17$$

$$hmn(1,3,1)=0$$

Doby čekání na Krajském úřadu[min]:

$$hku(3,2,1)=20$$

$$hku(1,2,1)=20$$

Posun přijíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$x(3,1)=9$$

$$x(4,1)=0$$

$$x(1,1)=0$$

Posun přijíždějících linek na Krajském úřadě:

$$x(5,1)=0$$

$$x(1,1)=0$$

Posun odjíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$y(2,1)=20$$

$$y(3,1)=7$$

Posun odjíždějících linek na Krajském úřadě:

$$y(2,1)=20$$

Směr 2:

Doby čekání na Masarykově náměstí[min]:

$$hmn(2,3,1)=11$$

$$hmn(2,4,1)=22$$

$$hmn(3, 1, 1)=0$$

Doby čekání na Krajském úřadu[min]:

$$hku(2, 3, 1)=25$$

$$hku(2, 1, 1)=22$$

Posun příjezdějících linek na Masarykově náměstí:

$$x(2, 2)=0$$

$$x(3, 2)=19$$

Posun příjezdějících linek na Krajském úřadě:

$$x(2, 2)=0$$

Posun odjíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$y(1, 2)=22$$

$$y(3, 2)=18$$

$$y(4, 2)=29$$

Posun odjíždějících linek na Krajském úřadě:

$$y(1, 2)=22$$

$$y(5, 2)=29$$

Vytvořené přestupní vazby na Masarykově náměstí

$$zmn(1, 3, 1)=1$$

$$zmn(2, 3, 1)=1$$

$$zmn(2, 4, 1)=1$$

$$zmn(3, 1, 1)=1$$

$$zmn(3, 2, 1)=1$$

$$zmn(4, 2, 1)=1$$

Vytvořené přestupní vazby na Krajském úřadu

$$zku(1, 2, 1)=1$$

$$zku(2, 1, 1)=1$$

$$zku(2, 3, 1)=1$$

$$zku(3, 2, 1)=1$$

Výpis výsledků optimalizačního výpočtu modelu Model2_spicka:

Celková pročekaná doba je: 145 min

Směr 1:

Doby čekání na Masarykově náměstí[min]:

$$hmn(3,2,1)=17$$

$$hmn(4,2,1)=17$$

$$hmn(1,3,1)=0$$

Doby čekání na Krajském úřadu[min]:

$$hku(3,2,1)=20$$

$$hku(1,2,1)=20$$

Posun přijíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$x(3,1)=0$$

$$x(4,1)=0$$

$$x(1,1)=0$$

Posun přijíždějících linek na Krajském úřadě:

$$x(5,1)=0$$

$$x(1,1)=0$$

Posun odjíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$y(2,1)=20$$

$$y(3,1)=7$$

Posun odjíždějících linek na Krajském úřadě:

$$y(2,1)=20$$

Směr 2:

Doby čekání na Masarykově náměstí[min]:

$$hmn(2,3,1)=2$$

$$hmn(2,4,1)=22$$

$$hmn(3,1,1)=0$$

Doby čekání na Krajském úřadu[min]:

$$hku(2,3,1)=25$$

$$hku(2,1,1)=22$$

Posun přijíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$x(2,2)=0$$

$$x(3,2)=19$$

Posun přijíždějících linek na Krajském úřadě:

$$x(2,2)=0$$

Posun odjíždějících linek na Masarykově náměstí:

$$y(1,2)=22$$

$$y(3,2)=9$$

$$y(4,2)=29$$

Posun odjíždějících linek na Krajském úřadě:

$$y(1,2)=22$$

$$y(5,2)=29$$

Vytvořené přestupní vazby na Masarykově náměstí

$$zmn(1,3,1)=1$$

$$zmn(2,3,1)=1$$

$$zmn(2,4,1)=1$$

$$zmn(3,1,1)=1$$

$$zmn(3,2,1)=1$$

$$zmn(4,2,1)=1$$

Vytvořené přestupní vazby na Krajském úřadu

$$zku(1,2,1)=1$$

$$zku(2,1,1)=1$$

$$zku(2,3,1)=1$$

$$zku(3,2,1)=1$$

6.5. Zhodnocení dosažených výsledků výpočetního experimentu

V tabulce č. 9 jsou uvedeny celkové doby čekání pro jednotlivé modely při jednotkových intenzitách přestupujících cestujících na všech relacích. Je zřejmé, že po přidání provozních podmínek prudce narostla celková doba čekání. V tabulce č. 10 jsou uvedeny doby čekání vycházející na jednoho přestupujícího cestujícího na jednotlivých přestupních vazbách pro oba modely s provozními podmínkami.

Tabulka č. 9: Dosažená celková doba čekání

Model	Celková doba čekání [min]
Model1_sedlo	0
Model1_spicka	0
Model2_sedlo	145
Model2_spicka	145

Tabulka č. 10: Doba čekání dle přestupních vazeb

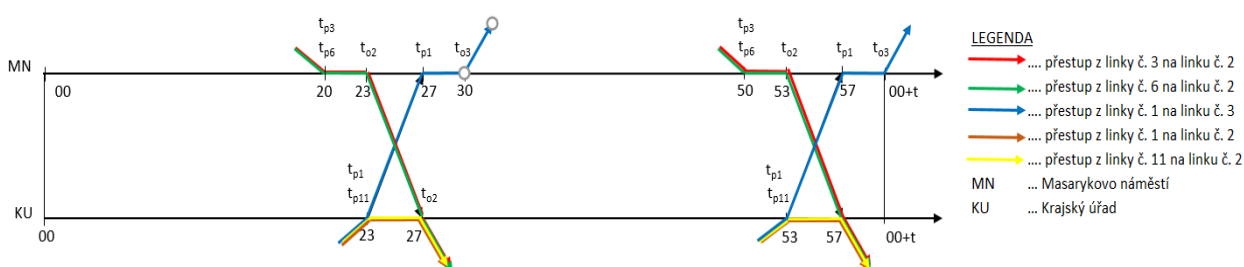
Směr	Model2_sedlo		Model2_spicka	
	Přestupní vazba	Doba čekání [min]	Přestupní vazba	Doba čekání [min]
1	3 - 2	8	3 - 2	17
1	6 - 2	17	6 - 2	17
1	1 - 3	0	1 - 3	0
1	1 - 2	20	1 - 2	20
1	11 - 2	20	11 - 2	20
2	2 - 3	11	2 - 3	2
2	2 - 6	22	2 - 6	22
2	3 - 1	0	3 - 1	0
2	2 - 1	25	2 - 1	25
2	2 - 11	22	2 - 11	22

Dobře tedy vychází pouze přestup mezi linkou č. 1 a linkou č. 3 a to v libovolném směru i období s nulovou dobou čekání a přestup z linky č. 2 na linku č. 3 v období špičky s dobou čekání 2 minuty. Vzhledem k vysokým dobám čekání u všech ostatních přestupních vazeb lze konstatovat, že není matematický model na bázi lineárního programování za stávajících provozních podmínek vhodným řešícím nástrojem tohoto problému. Výsledky dosažené u modelu bez provozních podmínek však mohou posloužit jako inspirace při vytváření přestupních vazeb jinou metodou.

Dosažené výsledky u modelů bez provozních podmínek byly znázorněny pomocí grafických schémat, popsanych v podkapitole 3.4. Na obrázku č. 16 jsou znázorněny přestupní vazby pro směr 1 modelu Model1_sedlo. Je z něj patrné, že doby čekání v přestupních uzlech přesně odpovídají minimální přestupní době a přestupujícím cestujícím nevznikne žádná časová

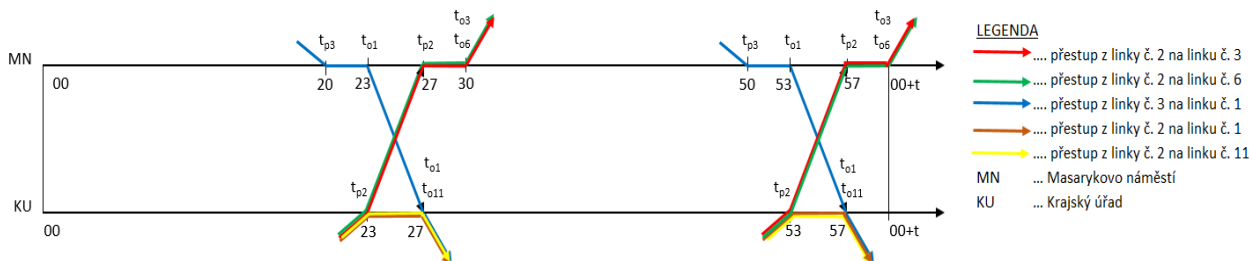
ztráta. Hodnota optimalizačního kritéria celkové pročekané doby tedy dosáhla minimální možné hodnoty. Ačkoliv model určuje jako vytvořené přestupní vazby $zmn(1,3,2)$, $zmn(3,2,1)$, $zmn(4,2,1)$, $zku(1,2,1)$ a $zku(3,2,1)$, tedy přestupní vazba 1 – 3 je posunutá o dobu taktu oproti ostatním třem vazbám, jak značí poslední index těchto veličin o hodnotě 2, ze schématu jasně vyplývá, že přestupní vazby vznikají díky stejné hodnotě provozního intervalu u všech linek po celé období hodiny. Analogicky tomu je u směru 2, který je znázorněn na obrázku č. 17. Model zde určil jako vytvořené přestupní vazby $zmn(2,3,2)$, $zmn(2,4,2)$, $zmn(3,1,1)$, $zku(2,1,1)$ a $zku(2,3,1)$, tedy přestupní vazby 2 – 3 a 2 – 6 jsou vázány na odjezd linky č. 2 posunutý o dobu taktu, přestup s nulovou čekací dobou opět vzniká po období celé hodiny.

SMĚR 1



Obr. č.16: Schéma přestupních vazeb dle dosažených výsledků – Model1_sedlo, směr 1

SMĚR 2



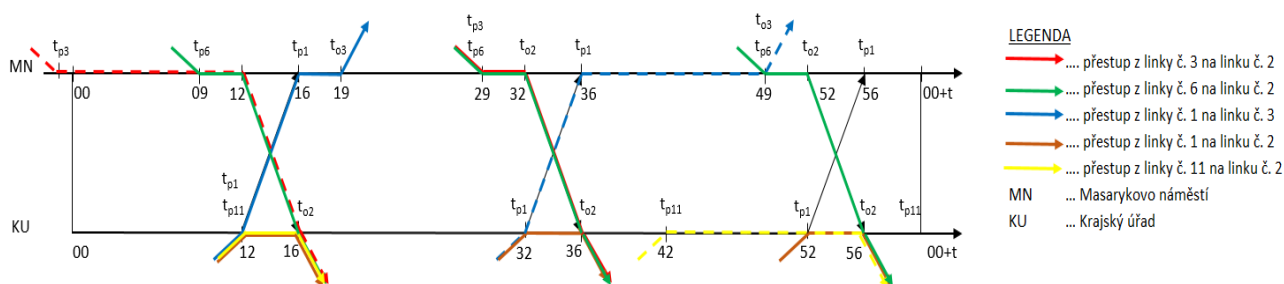
Obr. č.17: Schéma přestupních vazeb dle dosažených výsledků – Model1_sedlo, směr 2

Model1_spicka určil pro směr 1 jako vznikající přestupní vazby následující: $zmn(3,2,2)$, $zmn(4,2,1)$, $zmn(1,3,1)$, $zku(1,2,1)$, $zku(3,2,1)$, tedy přestupy 1 – 3 a 6 – 2 na Masarykově náměstí a 1 – 2 a 11 – 2 na Krajském úřadu vznikají na začátku každé hodiny (jsou vázány na první odjezd linky č. 2 v dané hodině) zatímco přestup 3 – 2 je vázán na odjezd linky č. 2 posunutý o dobu taktu. Vzhledem k rozdílným provozním intervalům linek jsou přestupy s nulovou čekací dobou zaručeny po celou hodinu pouze u linek se stejným provozním intervalem (tedy zeleně značený přestup 6 – 2 a hnědě znázorněný přestup 1 – 2) a u ostatních pouze v dobu stanovenou výpočtem – to je každý první odjezd linky č. 2 v dané hodině při přestupu z linky č. 11 na Krajském úřadu, každý druhý odjezd linky č. 2 při přestupu z linky č. 3 na Masarykově náměstí a každý první příjezd linky č. 1 při přestupu na linku č. 3 na Masarykově náměstí. Na obrázku č. 18 jsou znázorněny přestupní vazby ve směru 1

modelu Model1_spicka. Přerušovanou čarou jsou značeny teoreticky možné přestupy, které však nebyly určeny modelem jako vznikající a u nichž je doba čekání delší než minimální přestupní doba – odpovídá rozdílu mezi provozními intervaly linek, mezi kterými existuje přestupní vazba. Doba čekání je tedy u všech přestupů značených přerušovanou čarou rovna $30 - 20 = 10$ min.

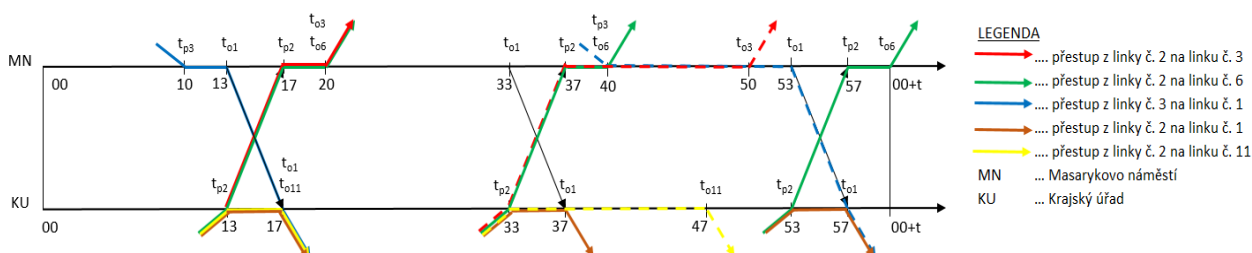
Ve směru 2 je opět situace analogická. Vytvořené přestupní vazby v tomto směru jsou $zmn(2,3,1)$, $zmn(2,4,2)$, $zmn(3,1,1)$, $zku(2,1,1)$ a $zku(2,3,1)$ a byly znázorněny na obrázku č. 19. Zeleně značené přestupní vazba 6 – 2 a hnědě značená přestupní vazba 1 – 2 opět vzniká po celé období hodiny, zatímco u ostatních přestupních vazeb je nulová čekací doba pouze každý první odjezd linky č. 2 v dané hodině při přestupu z linky č. 11 na Krajském úřadu, každý první odjezd linky č. 2 při přestupu z linky č. 3 na Masarykově náměstí a každý první příjezd linky č. 1 při přestupu na linku č. 3 na Masarykově náměstí

SMĚR 1



Obr. č.18: Schéma přestupních vazeb dle dosažených výsledků – Model1_spicka, směr 1

SMĚR 2



Obr. č.19: Schéma přestupních vazeb dle dosažených výsledků – Model1_spicka, směr 2

7. Závěr

Práce se zabývá návrhem matematického modelu síťové časové koordinace spojů městské hromadné dopravy v Pardubicích na základě matematického modelu časové koordinace spojů vytvořeného v minulosti prof. RNDR. Jaroslavem Janáčkem, Csc., s cílem zlepšení přestupních vazeb oblasti Pardubičky, kde se nachází Krajská nemocnice Pardubice a významná průmyslová zóna, s ostatními částmi města.

Úvodní kapitoly se věnují charakterizování linkové sítě veřejné hromadné dopravy v Pardubicích včetně historické souvislosti jejího vývoje, jejího současného stavu a dále jsou analyzovány přestupní vazby ve vybrané části linkové sítě veřejné hromadné dopravy v Pardubicích.

Následující kapitoly jsou obsahují obecné přiblížení lineárního modelu prof. Janáčka, který tvoří přímý matematický základ koordinačních modelů navržených na podmínky veřejné hromadné dopravy v Pardubicích. Práce dále obsahuje návrh těchto upravených matematických modelů časové koordinace vybraných spojů MHD v Pardubicích pro kombinaci přestupních uzlů Masarykovo náměstí a Krajský úřad, které byly dále rozšířeny o provozní podmínky.

Další část práce je věnována analýze vstupních dat potřebných pro optimalizační výpočet a způsobu jejich získání. Určité problémy se vyskytly u určování jízdních dob vozidel potřebných v provozních podmínkách – vozidlové jízdní řády jsou totiž i v rámci jedné linky poměrně rozdílné a u linky č. 2 a linky č. 6 dochází k obrátům vozidel v různých zastávkách. Došlo tedy k zjednodušení ve formě stanovení pouze dvou točen pro každou linku, odpovídajících nejčastěji obsluhované trase linky a jiné varianty nebyly uvažovány.

Následně je popsána transformace navržených matematických modelů do programovacího jazyku Mosel, který využívá optimalizační software Xpress-IVE, který je schopný navržené modely účinně řešit a ve kterém byly provedeny výpočetní experimenty s navrženými modely a popsány a zhodnoceny dosažené výsledky.

Výpočetní experimenty s modely ukázaly, že stávající provozní podmínky vedou k řešení z hlediska celkové doby čekání v praxi neupotřebitelnému. To je zřejmě způsobeno velmi

rozdílnými hodnotami dob jízdy jednotlivých linek mezi přestupními uzly a jejich točnami a jejich rozdílnými hodnotami dob oběhů. Matematický model na bázi lineárního programování tedy za stávajících provozních podmínek zřejmě není vhodným řešícím nástrojem. Výsledky dosažené u modelu bez provozních podmínek však mohou posloužit jako inspirace při návrhu přestupních vazeb jinou metodou.

8. Použitá literatura

- [1] PARDUBICE.EU: *Geografie*. pardubice.eu [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.pardubice.eu/o-pardubicich/informace-o-meste/geografie/>
- [2] SUROVEC, P: *Technológia hromadnej osobnej dopravy (cestná a mestská doprava)*. Žilinská univerzita v Žilině, 1998. ISBN 80-7100-494-4.
- [3] DOPRAVNÍ PODNIK MĚSTA PARDUBIC A. S: *Historie veřejné dopravy v Pardubicích a okolí*. dpmp.cz [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <http://www.dpmp.cz/historie-verejne-dopravy-v-pardubicich-a-okoli/>
- [4] TROLEJBUS.CZ: *Trolejbusové linky a tratě*. trolejbus.cz [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <http://www.trolejbus.cz/kniha3.htm>
- [5] ČESKOSLOVENSKÉ TROLEJBUSY: *Dobové schéma MHD v roce 1980*. trolejbusy1936.cz [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <http://www.trolejbusy1936.cz/PUSCHMHD1980-A.png>
- [6] DOPRAVNÍ PODNIK MĚSTA PARDUBIC A. S: *Schéma MHD Pardubice 2019*. dpmp.cz [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <http://www.dpmp.cz/doc/mapa/mapa-2-04.htm>
- [7] mapy.cz
- [8] DOPRAVNÍ PODNIK MĚSTA PARDUBIC A. S: *Zastávkové jízdní řády*. dpmp.cz [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <http://www.dpmp.cz/zastavkove-jizdni-rady/>
- [9] JANÁČEK, Jaroslav. *Model časové koordinace v přestupním uzlu*. Dosud nepublikováno
- [10] CZECH CONSULT, *Optimalizace MHD na území města Pardubice a přilehlém okolí: Vyhodnocení směrových vztahů (tabelární přílohy, grafikony)*. Praha, 2016.
- [11] FICO: *FICO Xpress Optimization Help*. fico.cz [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.fico.com/fico-xpress-optimization/docs/dms2019-04/overview.html>

9. Seznam obrázků

- Obr. č. 1: *Dobové schéma MHD v Pardubicích z roku 1980*
- Obr. č. 2: *Aktuální schéma MHD v Pardubicích z roku 2019*
- Obr. č. 3: *Znázornění společně pojížděného úseku linkami č. 1, 2, 11*
- Obr. č. 4: *Zastávka Masarykovo náměstí*
- Obr. č. 5: *Zastávka Krajský úřad*
- Obr. č. 6: *Schéma tras koordinovaných linek*
- Obr. č. 7: *Schéma přestupních vazeb dle současných jízdních řádů – směr 1, období sedla*
- Obr. č. 8: *Schéma přestupních vazeb dle současných jízdních řádů – směr 1, období špičky*
- Obr. č. 9: *Schéma přestupních vazeb dle současných jízdních řádů – směr 2, období sedla*
- Obr. č. 10: *Schéma přestupních vazeb dle současných jízdních řádů – směr 2, období špičky*
- Obr. č. 11: *Schéma slučování spojů z různých směrů*
- Obr. č. 12: *Schéma posunu času příjezdu spoje*
- Obr. č. 13: *Schéma tří možných situací, které mohou při přestupu nastat*
- Obr. č. 14: *Pracovní prostředí softwaru Xpress-IVE s vyznačenými jednotlivými částmi*
- Obr. č. 15: *Okno software Xpress-IVE s výpisem dosažených výsledků*
- Obr. č. 16: *Schéma přestupních vazeb dle dosažených výsledků – Model1_sedlo, směr 1*
- Obr. č. 17: *Schéma přestupních vazeb dle dosažených výsledků – Model1_sedlo, směr 2*
- Obr. č. 18: *Schéma přestupních vazeb dle dosažených výsledků – Model1_spicka, směr 1*
- Obr. č. 19: *Schéma přestupních vazeb dle dosažených výsledků – Model1_spicka, směr 2*

10. Seznam tabulek

- Tabulka č. 1: Kompletní vedení koordinovaných linek k 28. 4. 2020*
- Tabulka č. 2: Celkové doby čekání – současný stav – Masarykovo náměstí*
- Tabulka č. 3: Celkové doby čekání – současný stav – Krajský úřad*
- Tabulka č. 4: Doby oběhů vozidel*
- Tabulka č. 5: Doba jízdy vozidel na jednotlivých relacích*
- Tabulka č. 6: Přečíslování koordinovaných linek pro potřeby modelu*
- Tabulka č. 7: Hodnoty intenzit přestupujících cestujících*
- Tabulka č. 8: Provozní intervaly koordinovaných linek*
- Tabulka č. 9: Dosažená celková doba čekání*
- Tabulka č. 10: Doba čekání dle přestupních vazeb*