



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Petra Staňková

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

Diplomová práce

2020

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



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 městské hromadnej dopravy. Žilinská univerzita v Žiline, Žilina, 1999

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

Datum zadání diplomové práce: **16. září 2020**
(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: **1. prosince 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 dne..... 16. září 2020

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 1. prosince 2020



podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

SÍŤOVÁ ČASOVÁ KOORDINACE SPOJŮ MĚSTSKÉ HROMADNÉ DOPRAVY V
PARDUBICÍCH

diplomová práce

prosinec 2020

Bc. 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 ve dvou přestupních uzlech MHD 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 in two transfer hubs, 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

prosinec 2020

Bc. 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

1. Úvod	8
2. Charakteristika sítě linek MHD v Pardubicích	9
2.1. Historie Dopravního podniku města Pardubic	9
2.2. Vývoj sítě trolejbusových linek DPmP	10
2.3. Současná síť linek MHD v Pardubicích	14
3. Analýza koordinovaných přestupních vazeb	15
3.1. Cíle koordinace	15
3.2. Charakteristika vybraných přestupních uzlů	16
3.3. Charakteristika koordinovaných linek MHD	18
3.4. Analýza přestupních vazeb vybraných linek MHD v Pardubicích	21
4. Charakteristika použitého optimalizačního exaktního přístupu	26
4.1. Optimalizační přístupy vhodné pro řešení koordinace jízdních řádů veřejné dopravy	26
4.2. Základní model časové koordinace přestupů – vstupní údaje a použité proměnné	27
4.3. Základní model časové koordinace přestupů – obecný matematický model	29
5. Matematický model pro časovou koordinaci spojů v podmínkách města Pardubice	33
5.1. Obecné modely časové koordinace spojů v jednotlivých přestupních uzlech	33
5.1.1. Obecný model časové koordinace pro Masarykovo náměstí	33
5.1.2. Obecný model časové koordinace pro Krajský úřad	36
5.2. Obecné modely časové koordinace spojů v obou přestupních uzlech	37
5.2.1. Obecné modely časové koordinace v obou přestupních uzlech pro jeden směr jízdy	37
5.2.1.1 Varianta obecného jednosměrného koordinačního modelu pro posloupnost obsluhy přestupních uzlů Masarykovo náměstí – Krajský úřad	37
5.2.2. Obecný model časové koordinace v obou přestupních uzlech pro oba směry jízdy	39
5.3. Vstupní data pro optimalizační výpočet	44
5.4. Kompletní matematický model	46
6. Výpočetní experimenty	49
6.1. Pracovní prostředí Xpress-IVE a jeho funkce	49
6.2. Transformace matematického modelu do jazyku Mosel	50
6.3. Výpočetní experiment a zhodnocení dosažených výsledků	53
6.3.1. Varianta 1 výpočetního experimentu – původní zadání	53
6.3.2. Varianta 2 výpočetního experimentu – odstranění jedné přestupní vazby	56
6.3.3. Varianta 3 – odstranění dvou přestupních vazeb	58
6.3.4. Porovnání jednotlivých variant	60
7. Závěr	63
8. Použitá literatura	65

9. Seznam obrázků.....	66
10. Seznam tabulek	67

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

MHD	městská hromadná doprava
DPM	Dopravní podnik města Pardubic
č.	číslo
min	minuta

1. Úvod

Hromadná osobní doprava obecně 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. [1]

Pardubice jsou krajským městem s 90 000 obyvateli a rozlohou 78 km² [2]. Městská hromadná doprava je zde v provozu 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 linky nové. Z toho důvodu není obsluha nejvýznamnějších center občanské vybavenosti v některých případech optimální.

V této práci se budu zabývat zlepšením přestupních vazeb mezi oblastí 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, na 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 nejdříve charakterizována síť MHD v Pardubicích včetně historických souvislostí 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 tramvajové dráhy na území města i s kolejovým propojením Pardubic s Chlumcem nad Cidlinou přes Lázně 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 – Lázně 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 byla doplněna 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 Lázní Bohdaneč a tzv. městské trati z Jesničánek na zastávku Nemocnice. 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 doplněna 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 dodnes obsluhován pouze autobusy. Trolejbusová linka č. 2 začala fungovat až v roce 1954 a obsluhovala pouze část původní trasy linky č. 2 v úseku Jesničánky – divadlo – Slovany. Úsek Svítkov – divadlo byl obsluhován novou autobusovou linkou č. 4. V roce 1958 byla trolejbusová linka č. 2 dočasně 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 zastávka přemístěna 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 – Stalinova – Švermova – jatka – sv. Josef – Trnová – Semtín – UMA – Lázně Bohdaneč. Po dostavbě vozovny na Dukle byla dočasně prodloužena z nádraží až na zastávku Dukla vozovna, později však byla z úsporných opatření opět zkrácena a její konečná přemístěna ze starého nádraží na nově zavedenou zastávku u Nového nádraží. Po opravě mostu P. Wonky v roce 1988 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 zastávku Třída 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 do stávající sítě doplněna trolejbusová linka č. 5 vedená v trase Dukla vozovna – divadlo – Slovany. Po dostavbě dvou nových trolejových úseků v roce 1965 byla trasa prodloužena do zastávky Dukla točna a Sakařovou ulicí na Židov a na této trase jezdí dodnes s prodloužením na konečnou zastávku Dubina sever, jejíž výstavba byla dokončena v roce 2002.

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 zastávku Hůrka, ale rok nato byla kvůli rekonstrukci Dašické ulice a výstavbě nadjezdu u nemocnice zrušena. Provoz linky byl znovu zahájen v roce 1962 na nové trase Krematorium – Skřivánek – Anenský podjezd – divadlo a trasa linky byla později prodloužena od divadla přes Trnovou do Ohrazenic. Od roku 1970 má aktuální podobu Dukla náměstí – Koněvovo náměstí (dnes Zborovské náměstí) – Krematorium – divadlo – nádraží – Polabiny – Kréta.

Číslem 7 byly původně označovány výpomocné spoje zajišťující dopravu zaměstnanců Východočeských chemických závodů do průmyslové oblasti v Semtíně. Provoz regulérní trolejbusové linky č. 7 byl zahájen až v roce 1960 po trase Dukla vozovna – Třída Míru –

Trnová – Semtín – UMA. Později byla trasa linky upravena a to tak, že došlo k jejímu přesměrování ze zastávky Třída Míru na zastávku Náměstí Budovatelů a dnešní podobu Dukla vozovna – Zborovské náměstí – Masarykovo náměstí – Globus – Semtín – UMA získala až v roce 2003.

Ve stejném roce jako linka č. 7, tj. v roce 1960, 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 náměstí – nádraží – divadlo. V roce 1962 byl zahájen provoz i na autobusové lince č. 10 vedené po trase Nádraží – Dukla náměstí – Koněvovo náměstí.

Trasy všech tří 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 obsluhuje trasu nádraží – Masarykovo náměstí – Halda – Dubina – Spožil – Sezemice a linka č. 10 trasu Ostřešany – Nemošice – Dukla – nádraží – Masarykovo náměstí – Cihelna – Fáblovka – Staré Hradiště – Ohrazenice.

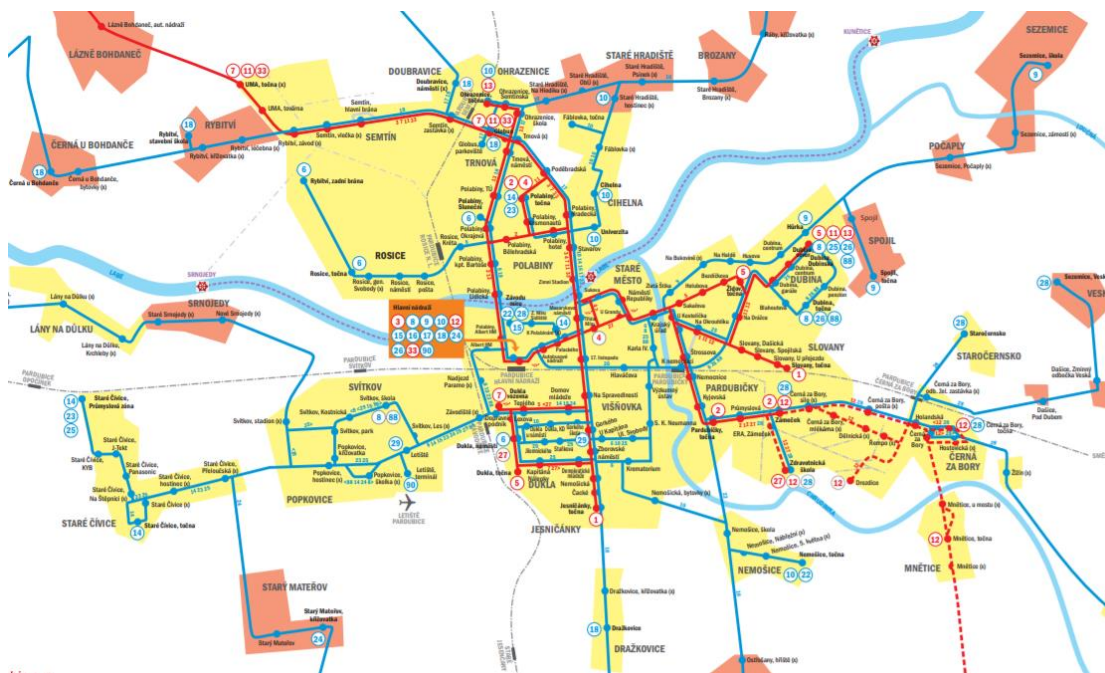
Provoz trolejbusové linky č. 11 byl zahájen v roce 1964 a její trasa vedla souběžně s trasou linky č. 3 až do Trnové, odkud pokračovala na obratiště zřízené u železniční zastávky Semtín. Později byla linka označena jako přebytečná a vzhledem k problémům s trolejovým vedením v oblasti semtínského obratiště byla změněna na autobusovou linku a prodloužena do Pardubiček. V roce 2003 byla její trasa významně změněna do současné podoby Dubina – Drážka – Náměstí 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 obsluhovala trasu 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

sít' téměř nezměnila, pouze některé linky byly prodlouženy (např. linka č. 9 původně končící na zastávce Spožil, dnes zajíždí až na zastávku 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 se rozšiřovala postupně počínaje dvěma nejstaršími linkami, 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, přičemž 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).

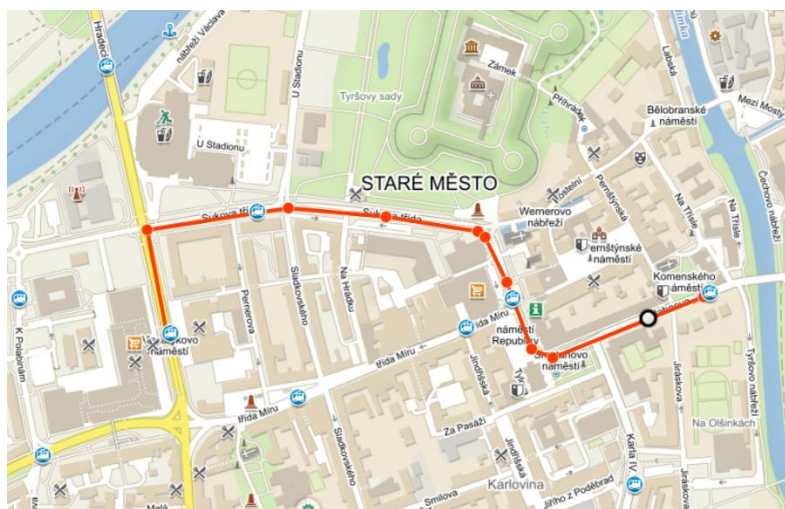
3. Analýza koordinovaných přestupních vazeb

3.1. Cíle koordinace

Cílem koordinace bude zlepšovat 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 oblastí Pardubiček přímou linkou. Tyto ostatní části města 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 Jesničanky 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 č. 1 v trase Jesničanky, točna – Slovany, točna, č. 2 v trase Polabiny, točna – Zámeček, č. 3 v trase Hlavní nádraží – Lázně Bohdaneč, točna, č. 11 v trase UMA, točna – Dubina, sever a autobusovou linku č. 6 v trase Rosice, točna – Dukla, náměstí. Trasy vybraných linek se setkávají na zastávkách 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 obsluhován 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: Znárodnění společně pojížděného úseku linkami č. 1, 2, 11 [7]

3.2. Charakteristika vybraných přestupních uzlů

Zastávka Masarykovo náměstí je významným přestupním uzlem, kde se stýká většina tras linek MHD a část tras regionálních autobusových linek. Zastávka 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 v přímém směru ulic Hradecká přes Wonkův most do Polabin a dále na sever města a na nástupiště č. 3 sloužící linkám odbočujícím vpravo na Sukovu třída 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 víkendového provozu. Dopolodní víkendová přepravní špička je přibližně mezi 8:00 – 11:00 a odpolední víkendová přepravní špička přibližně mezi 14:00 – 19:00. Z pěti koordinovaných linek jízdní řády tří linek (linky č. 1, 2, 6) respektují období víkendové přepravní 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 města a severovýchodní sídliště Slovany. Linka je o víkendu v provozu od 4 do 23 hodin, v období víkendového přepravního sedla jezdí s intervalem 30 minut, v období víkendové přepravní 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 víkendové přepravní špičky má tato linka interval 20 minut, ve víkendovém přepravním 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]

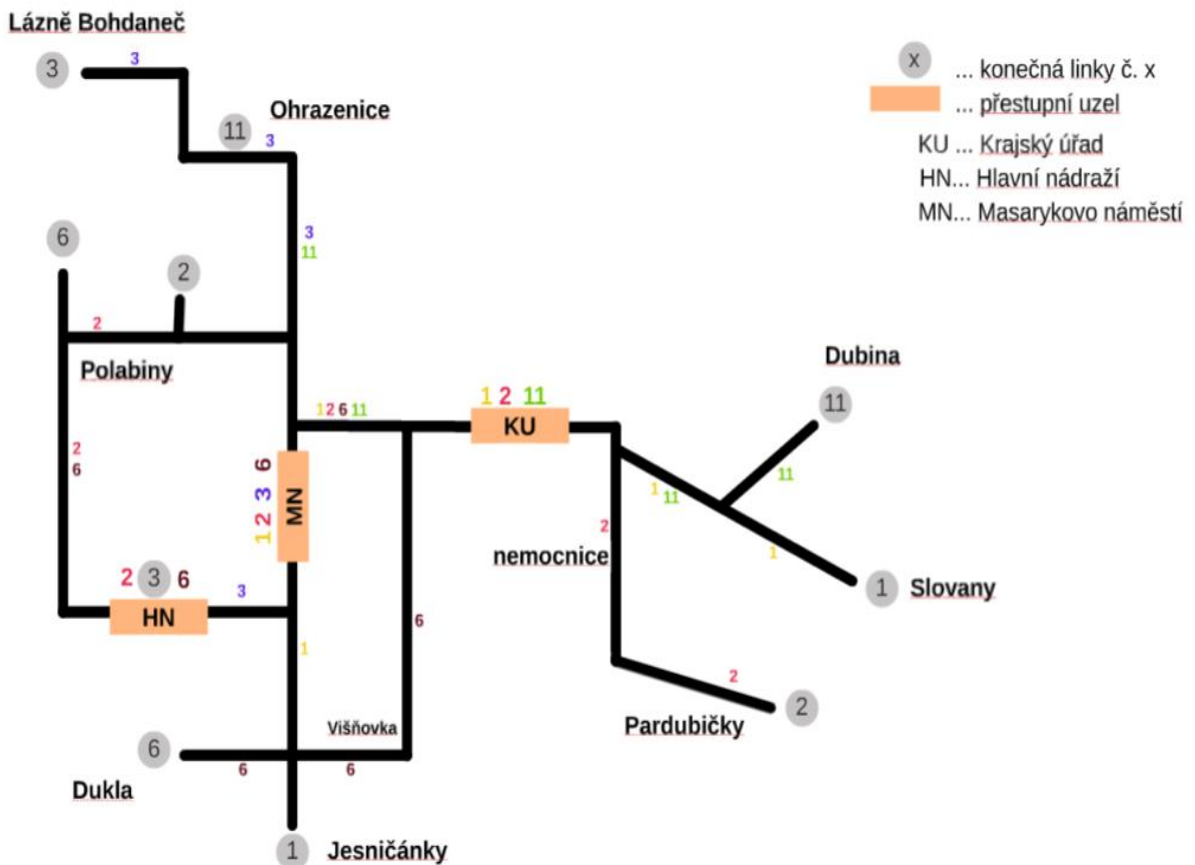
Tabulka č. 1: Kompletní vedení koordinovaných linek k 28. 4. 2020

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 náměstí – 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 návaznosti mezi vybranými linkami v podstatě neexistují; vznikají velmi nahodile jen u části linek. V následujících dvou tabulkách jsou uvedeny současné doby čekání při přestupu mezi vybranými linkami, to je rozdíl mezi časem příjezdu spoje linky č. x a časem odjezdu spoje linky č. y, od kterého byla odečtena doba potřebná na přestup (tedy doba přesunu mezi různými nástupišti). V tabulce č. 2 jsou uvedeny hodnoty dob čekání pro přestupy v přestupním uzlu Masarykovo náměstí, v tabulce č. 3 pak pro přestupy v přestupním uzlu Krajský úřad.

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)	5
2 (Pardubičky)	3 (Lázně Bohdaneč)	7
6 (Dukla)	2 (Pardubičky)	18
2 (Pardubičky)	6 (Dukla)	1
1 (Slovany)	3 (Lázně Bohdaneč)	8
3 (Lázně Bohdaneč)	1 (Slovany)	6
Masarykovo náměstí (sedlo)		
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Celková doba čekání [min]
3 (Lázně Bohdaneč)	2 (Pardubičky)	15
2 (Pardubičky)	3 (Lázně Bohdaneč)	17
6 (Dukla)	2 (Pardubičky)	13
2 (Pardubičky)	6 (Dukla)	13
1 (Slovany)	3 (Lázně Bohdaneč)	18
3 (Lázně Bohdaneč)	1 (Slovany)	26

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)	10
2 (Pardubičky)	1 (Slovany)	10
11 (Dubina)	2 (Pardubičky)	8
2 (Pardubičky)	11 (Dubina)	5
Krajský úřad (sedlo)		
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Celková doba čekání [min]
1 (Slovany)	2 (Pardubičky)	0
2 (Pardubičky)	1 (Slovany)	20
11 (Dubina)	2 (Pardubičky)	18
2 (Pardubičky)	11 (Dubina)	15

Aktuální situaci týkající se návaznosti mezi spoji různých linek v obou přestupních uzlech znázorňují grafická schémata na obr. č. 7 a č. 8. Jsou uvedena zvlášť pro období víkendové přepravní špičky a období víkendového přepravního sedla, které se u některých linek liší intervaly mezi spoji v daném období. Na schématech jsou znázorněny oba přestupní uzly Masarykovo náměstí (značeno MN) a Krajský úřad (značeno KU) jako černé obdélníky a jsou zde naznačeny trasy koordinovaných linek prostřednictvím barevných čar procházejících těmi přestupními uzly, které daná linka obsluhuje. Typ čáry značí takt, ve kterém daná linka v určitém období jezdí – plná čára znamená hodnotu linkového intervalu 30 minut

a přerušovaná čára hodnotu 20 minut. Číslo na volném konci čáry označuje číslo dané linky a číselné hodnoty u přestupního uzlu udávají čas příjezdu (hodnota blíže přestupnímu uzlu) či odjezdu (vzdálenější hodnota od přestupního uzlu) spoje do přestupního uzlu. Ve schématu jsou uvedeny časy odjezdů či příjezdů spojů, pro které vycházely přestupní vazby nejlépe – nejedná se tedy o časy pouze v rámci jednoho taktu. Čas obsluhy zastávky v předchozím či následujícím taktu lze snadno dopočítat odečtením či přičtením hodnoty taktu. Pokud je uvedeno více hodnot času obsluhy zastávky současně, je tak učiněno pro snazší orientaci v případech, kdy v jednom z přestupních uzlů vychází přestup na jinou linku výhodněji až v následujícím linkovém intervalu. Délku čekání přestupujícího cestujícího lze zjistit jako rozdíl času příjezdu spoje linky a času odjezdu spoje linky, na kterou cestující přestupuje, zmenšený o potřebnou přestupní dobu (pro Masarykovo náměstí jde o hodnotu 3 minuty a u Krajského úřadu o hodnotu 4 minuty).

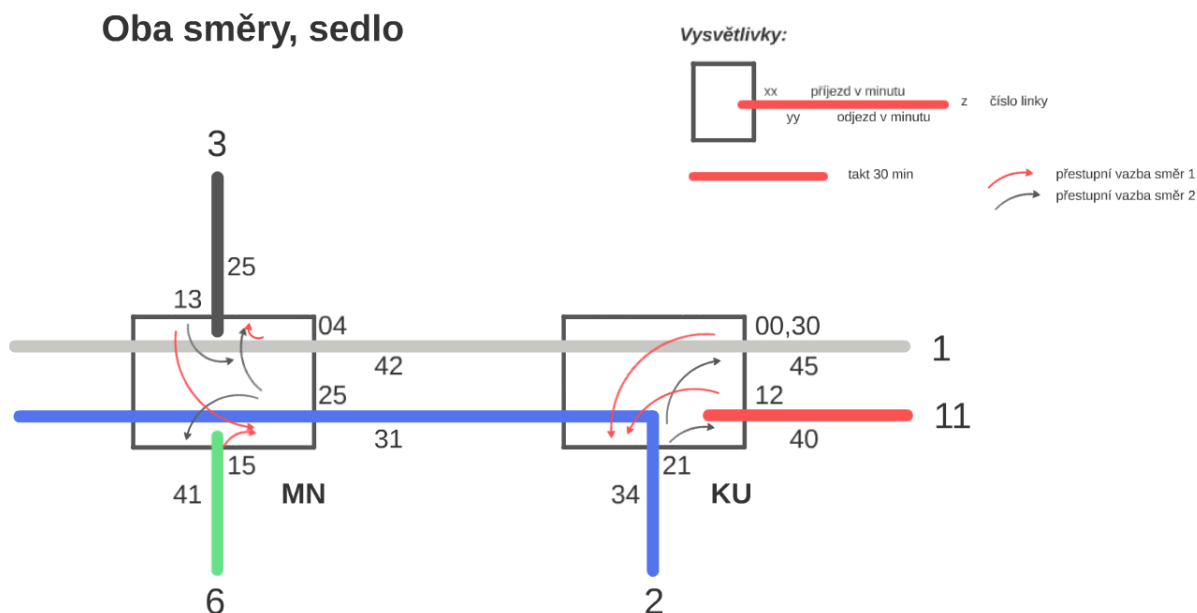
Přestupy mezi linkami jsou naznačeny malými šipkami uvnitř obdélníku reprezentujícího určitý přestupní uzel. Červené šipky označují přestupy ve směru 1 a černé šipky přestupy ve směru 2. Směr 1 odpovídá lince č. 2 ve směru A (Polabiny – Pardubičky) a všem ostatním linkám, které jsou na ni v tomto směru 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 (ze spojů linky č. 3 – na spoje linky č. 2),
- Dukla – Pardubičky (ze spojů linky č. 6 – na spoje linky č. 2),
- Slovany – Lázně Bohdaneč (ze spojů linky č. 1 – na spoje linky č. 3),
- Slovany – Pardubičky (ze spojů linky č. 1 – na spoje linky č. 2),
- Dubina – Pardubičky (ze spojů linky č. 11 – na spoje linky č. 2),

z toho první tři přestupy probíhají na zastávce Masarykovo náměstí a zbývající dva přestupy na zastávce Krajský úřad. Směr 2 pak zahrnuje pět předchozích uvedených přestupních vazeb v opačném směru, pro první kombinaci tedy např. Pardubičky – Lázně Bohdaneč (ze spojů linky č. 2 – na spoje linky č. 3).

Na obr. č. 7 je uvedeno schéma návazností pro období víkendového přepravního sedla. Ze schématu vyplývá, že pro toto období vychází časová návaznost velmi dobře pouze při přestupu ze spojů linky č. 1 na spoje linky č. 2 na zastávce Krajský úřad, kdy rozdíl mezi časem příjezdu spoje linky č. 1 a časem odjezdu spoje linky č. 2 činí 4 minuty, což odpovídá přesně přestupní době stanovené pro Krajský úřad a znamená nulovou časovou ztrátu

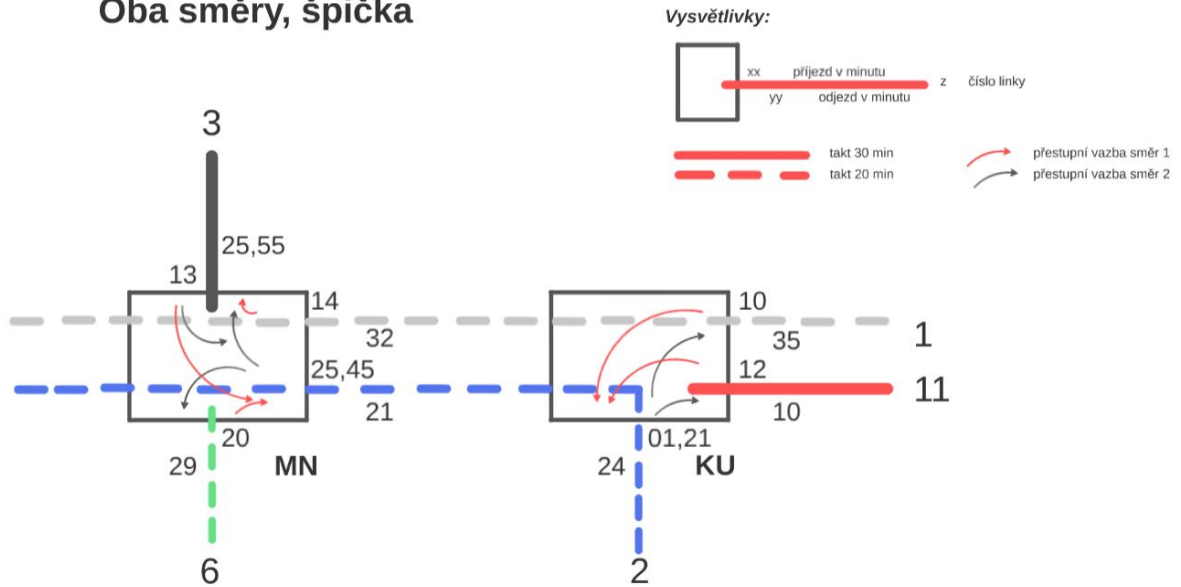
pro cestující. U ostatních přestupních vazeb je doba čekání vyšší než 13 minut a v případě přestupu ze spoje linky č. 2 na spoj linky č. 3, jejichž časy odjezdu a příjezdu jsou shodné, by cestující přestup ze spoje linky č. 2 na spoj linky č. 3 nestihli vykonat a doba čekání by odpovídala době taktu mezi spoji snížené o přestupní dobu.



Obr. č. 7: Schéma přestupních vazeb dle současných jízdních řádů – období víkendového přepravního sedla

V období víkendové přepravní špičky, z důvodu rozdílných linkových intervalů koordinovaných linek, vychází lépe vždy pouze jeden ze dvou možných přestupů v rámci období jedné hodiny – v tabulce č. 2 a 3 jsou uvedeny pouze tyto hodnoty. V období víkendové přepravní špičky vychází velmi dobře přestup ze spoje linky č. 2 na spoj linky č. 6 s dobou čekání 1 minuta a dále poměrně přijatelně i všechny ostatní přestupy na Masarykově náměstí s výjimkou přestupu ze spoje linky č. 6 na spoj linky č. 2, u kterého je doba čekání 18 minut. Na Krajském úřadu je nejnižší doba čekání 5 minut při přestupu z linky č. 2 na linku č. 11. Schéma pro toto období je uvedeno na obr. č. 8.

Oba směry, špička



Obr. č. 8: Schéma přestupních vazeb dle současných jízdních řádů – období víkendové přepravní špičky

4. Charakteristika použitého optimalizačního exaktního přístupu

4.1. Optimalizační přístupy vhodné pro řešení koordinace jízdnicích řádů veřejné dopravy

Koordinaci jízdnicích řádů veřejné osobní dopravy lze dělit na dva základní typy – koordinaci spojů na úsecích anebo v přestupních uzlech. Úsekem je přitom myšlena dvojice vrcholů (tedy zastávek) na dopravní síti, které nemusí být sousední. Koordinace spojů na úsecích slouží k zamezení hromadění vozidel na zastávkách na daném úseku, které může způsobovat provozní potíže při nástupu a výstupu cestujících; k snížení zvýšeného vytížení vozidla, které obsluhuje úsek jako první po delší době a pro snížení časové ztráty cestujících, kteří mohou využít libovolný spoj obsluhující tento úsek.

Cílem koordinace jízdnicích řádů veřejné osobní dopravy v přestupních uzlech je minimalizovat časovou ztrátu všech cestujících vznikající při přestupování mezi spoji dle známé přepravní poptávky v daném uzlu. Optimalizační metody pro koordinaci v přestupním uzlu jsou založeny na dvou základních principech – časovém posunu spojů nebo přidání spojů obsluhujících uzlu. Přidáním spojů se však výrazně zvyšují provozní náklady. Proto se ještě před zvyšováním počtu spojů ověřuje, zda časovými posuny nelze dosáhnout podobného efektu. Ty obvykle nevedou k významnějšímu růstu provozních nákladů, avšak lze je uplatnit jen v případech, kdy lze časovou polohu spojů v uzlu měnit. Spadá sem například metoda jednotkových posunů nebo metoda lineárního programování. [9]

K časové koordinaci spojů v přestupních uzlech je v této práci využito lineární programování, které je univerzálním řešícím nástrojem pro množství různých typů optimalizačních úloh. Při jeho využívání je nejdříve sestaven lineární matematický model, který je zpravidla řešen vhodným optimalizačním software. 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.

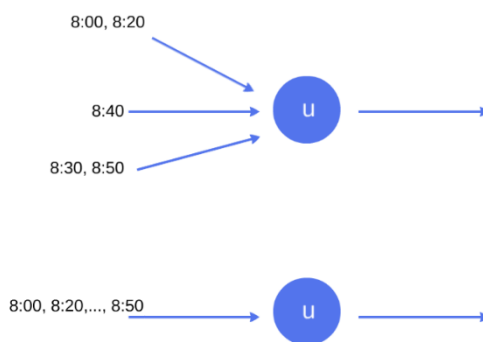
4.2. Základní model časové koordinace přestupů – vstupní údaje a použité proměnné

V této kapitole bude představen základní model časové koordinace spojů v izolovaném uzlu. Do izolovaného přestupního uzlu přijíždí množina spojů z jednoho směru a odjíždí množina spojů do jednoho směru. Mezi přijíždějícími spoji a odjíždějícími spoji mají vzniknout přestupní vazby.

V modelu vystupují tyto vstupní údaje:

- I – množina přijíždějících spojů,
- J – množina odjíždějících spojů,
- f_i – intenzita cestujících přestupujících ze spoje $i \in I$,
- tp_i – nejdříve možný příjezd spoje $i \in I$,
- to_j – nejdříve možný odjezd spoje $j \in J$,
- a_i – maximální povolený časový posun spoje $i \in I$, vztaženo k nejdříve možné časové poloze příjezdu tp_i ,
- b_j – maximální povolený posun spoje $j \in J$, vztaženo k nejdříve možné časové poloze odjezdu to_j ,
- $tprest_{ij}$ – přestupní doba při přestupu ze spoje $i \in I$ na spoj $j \in J$,
- M – prohibitivní konstanta.

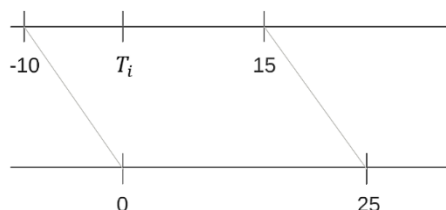
Model lze použít i v případě, že množina přijíždějících spojů I zahrnuje spoje přijíždějící z více směrů, protože je koordinován přestup ze všech spojů množiny I na libovolný z odjíždějících spojů z množiny J a není kladen důraz na jednotlivé linky či jejich charakter. Spoje z více směrů lze tedy sloučit do jedné časové posloupnosti příjezdů spojů beze změny úlohy a jejího principu. Tento postup je naznačen na obrázku č. 9.



Obr. č. 9: 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 časy příjezdů a odjezdů všech spojů posunuty do nejdříve možných krajních časových poloh a k původnímu maximálnímu povolenému časovému posunu spoje je přičtena doba, o kterou lze spoj posunout. Tento postup je nutno aplikovat z důvodu nemožnosti pracovat v modelu se zápornými čísly.

Postup bude demonstrován na následujícím příkladu: v čase T_i přijíždí do uzlu spoj $i \in I$, který lze vzhledem k jeho aktuální poloze posunout v časovém intervalu $\langle -10; 15 \rangle$. Jako nejdříve možný příjezd tp_i spoje $i \in I$ bude určen čas $T_i - 10$, 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 $10 + 15 = 25$ a nový časový interval pro možný posun spoje bude $\langle 0; 25 \rangle$. Maximální povolený časový posun a_i , vztažený k nejdříve možné časové poloze příjezdu tp_i bude tedy 25 minut. Posun časového intervalu je graficky naznačen na obr. č. 10.



Obr. č. 10: Ukázka postupu transformace časového intervalu pro možný posun spoje

V celém modelu jsou časové polohy spojů značeny ve tvaru počtu minut uplynutých od stanoveného nulového bodu, čímž je zaručena nezápornost čísel. Přestupní doba udává minimální dobu potřebnou pro přesun cestujících mezi nástupišti. Hodnota přestupní doby $tp_{rest_{ij}}$ se může lišit pro jednotlivé přestupní vazby mezi přijíždějícím spojem $i \in I$ a odjíždějícím spojem $j \in J$. Prohibitivní konstanta je pomocnou konstantou a jde o velmi vysoké nezáporné číslo, jehož hodnota musí být vyšší než maximální hodnota doby čekání, která může při přestupu mezi spoji dvojic linek nastat a která odpovídá hodnotě doby taktu.

V modelu jsou používány následující 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 odjezdu 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 příjíždějícího spoje $i \in I$ na odjíždějící spoj $j \in J$. [10]

4.3. 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:

$$t_{oj} + y_j - (t_{pi} + x_i + t_{prest_{ij}}) \geq M \cdot (z_{ij} - 1) \quad \begin{array}{l} \text{pro } i \in I, \\ j \in J \end{array} \quad (1.2)$$

$$t_{oj} + y_j - (t_{pi} + x_i + t_{prest_{ij}}) \leq h_i + M \cdot (1 - z_{ij}) \quad \begin{array}{l} \text{pro } i \in I, \\ j \in J \end{array} \quad (1.3)$$

$$\sum_{j \in J} z_{ij} = 1 \quad \text{pro } i \in I \quad (1.4)$$

$$x_i \leq a_i \quad \text{pro } i \in I \quad (1.5)$$

$$y_j \leq b_j \quad \text{pro } j \in J \quad (1.6)$$

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

$$y_j \geq 0 \quad \text{pro } j \in J \quad (1.8)$$

$$h_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (1.9)$$

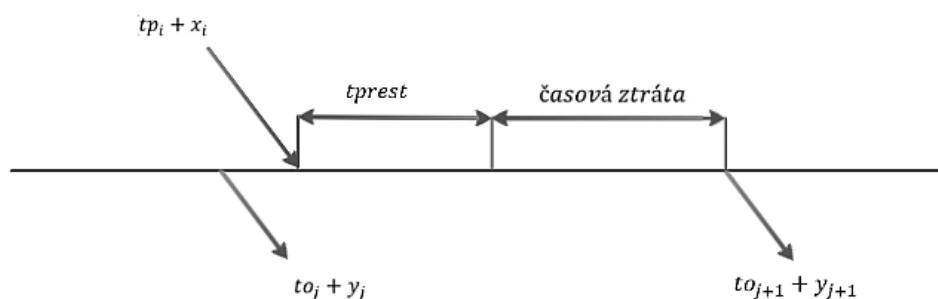
$$z_{ij} \in \{0; 1\} \quad \begin{array}{l} \text{pro } i \in I, \\ j \in J \end{array} \quad (1.10)$$

Funkce (1.1) reprezentuje optimalizační kritérium – celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících. Intenzita cestujících f_i přestupujících ze spoje $i \in I$ v optimalizačním kritériu rozlišuje důležitost přestupů mezi různými kombinacemi příjíždějícího spoje $i \in I$. Očekává se, že algoritmus bude při zkracování doby čekání upřednostňovat návaznosti s vysokými intenzitami přestupujících cestujících, protože ty nejvíce přispívají k výraznému nárůstu hodnoty účelové funkce. V případě, že nejsou hodnoty počtu přestupujících známy nebo není žádoucí přestupy dle nich rozlišovat, je možné intenzitu modelovat stejnými čísly, čímž aplikujeme maximální míru neurčitosti.

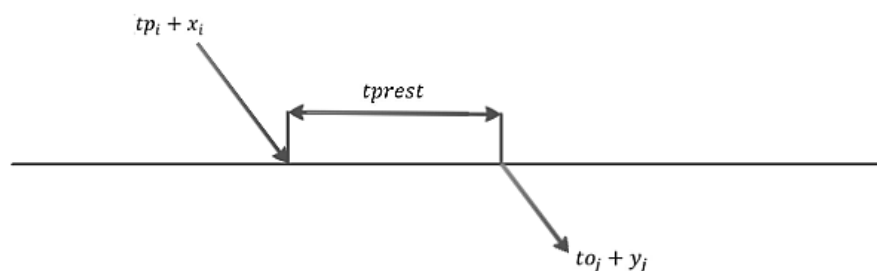
Skupina omezujících podmínek (1.2) zajišťuje, že v případě, kdy čas odjezdu spoje $j \in J$ nastává dříve, než je cestující přestupující z příjíždějícího spoje $i \in I$ připraven k nástupu, přestupní vazba mezi danou dvojicí spojů nevznikne. První dva členy rovnice udávají čas odjezdu spoje $j \in J$ po jeho případném posunu z nejdříve možné časové polohy, tedy skutečný čas odjezdu tohoto spoje určený algoritmem po ukončení optimalizačního výpočtu. Závorka na levé straně rovnice představuje nejdříve možnou časovou polohu příjezdu spoje $i \in I$, navýšenou o přestupní dobu mezi danými spoji a časový posun spoje $i \in I$, tedy nejdříve možný čas příjezdu spoje $i \in I$ po jeho případném posunu. Levá strana rovnice tedy vyjadřuje rozdíl mezi skutečným časem odjezdu spoje a skutečným časem příjezdu spoje zvýšeném o přestupní dobu. Mohou nastat tři situace.

Pokud bude výsledek levé strany rovnice záporný, znamená to, že odjíždějící spoj odjel dříve a tedy přestupujícím cestujícím ujel. Časová ztráta cestujícího je pak rovna délce čekání na čas odjezdu následujícího spoje $t_{o_{j+1}} + y_{j+1}$. V takovém případě je tato podmínka aktivována a pomocná bivalentní proměnná z_{ij} musí být rovna 0, což signalizuje, že přestupní vazba ze spoje $i \in I$ na spoj $j \in J$ nevzniká. Pokud je výsledek levé strany rovnice roven nule, nastává z hlediska cestujících ideální situace – 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 přestupní vazba vzniknout. Třetí situace nastává, pokud je výsledek levé strany rovnice kladný. V tom případě vzniká přestupujícím cestujícím 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. 11.

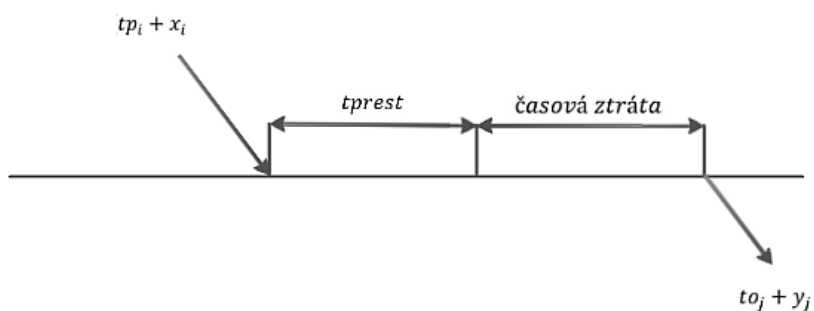
$$t_{o_j} + y_j - (t_{p_i} + x_i + t_{prest}) < 0$$



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



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



Obr. č. 11: Schéma tří možných situací, které mohou při přestupu nastat

Skupina omezujících podmínek (1.3) slouží ke kvantifikaci časové ztráty cestujících přestupujících ze spoje $i \in I$ na spoj $j \in J$, pokud tato přestupní vazba vzniká. Vznik přestupní vazby je umožněn v situaci, kdy levá strana rovnice je nezáporná. Podmínka (1.3) kooperuje s odpovídající podmínkou (1.4), která zajistí, aby každý příjíždějící spoj byl navázán na právě jeden odjíždějící spoj. S poukazem na minimalizaci hodnoty účelové funkce bude vytvořena

vazba na ten odjíždějící spoj, který leží skutečnému času příjezdějího spoje zvýšeného o přestupní dobu nejbliže.

Skupina podmínek (1.5) 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 (1.6) je analogická skupině podmínek (1.5) pro odjíždějící spoj $j \in J$. Skupiny omezujících podmínek (1.7) – (1.10) vymezují definiční obory proměnných použitých v modelu.

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

Při návrhu matematického modelu pro časovou koordinaci spojů v podmínkách města Pardubice byly nejprve vytvořeny matematické modely časové koordinace spojů pro každý přestupní uzel zvlášť. Po ověření jejich funkčnosti byly tyto modely propojeny do modelu časové koordinace spojů v obou přestupních uzlech odděleně vždy jen pro jeden směr jízdy. Tyto modely byly následně sloučeny do finálního modelu časové koordinace spojů v obou přestupních uzlech a pro oba směry jízdy. Časová koordinace je prováděna zvlášť pro dvě časová období – období víkendové přepravní špičky a víkendového přepravního sedla, které se liší intervalem provozu některých linek.

Protože koordinační proces bude probíhat ve dvou přestupních uzlech současně a původní model je vytvořen pouze pro izolovaný uzel, je v první řadě nutno jednoznačně rozlišit všechny vstupní údaje a proměnné, které se budou k jednotlivým přestupním uzlům vztahovat. Bylo tak učiněno přidáním dvou písmen za označení vstupního údaje či proměnné, a to písmen „mn“, pokud se daná veličina týká Masarykova náměstí, nebo písmen „ku“, pokud jde o přestupní uzel Krajský úřad.

5.1. Obecné modely časové koordinace spojů v jednotlivých přestupních uzlech

5.1.1. Obecný model časové koordinace pro Masarykovo náměstí

Do modelu vstupují tyto vstupní údaje:

- Lmn – množina linek, jejichž spoje jsou koordinovány v přestupním uzlu Masarykovo náměstí,
- S_i – množina směrů linky $i \in Lmn$,
- Rmn – množina čtveřic identifikujících požadavky na přestupy mezi spoji jedoucími v daných směrech linek obsluhujících přestupní uzel Masarykovo náměstí,
- Os_i – množina spojů linky $i \in Lmn$,
- fmn_{ikpjl_s} – intenzita cestujících přestupujících ze spoje $k \in Os_i$ na spoj $l \in Os_j$ pro prvek $(i, p, j, s) \in Rmn$,
- tmn_{i1s} – nejdříve možný čas obsluhy zastávky Masarykovo náměstí prvním spojem linky $i \in Lmn$ jedoucím ve směru $s \in S_i$,

- $takt_{is}$ – pravidelný interval mezi spoji (linkový interval) na lince $i \in Lmn$ ve směru $s \in S_i$,
- a_{is} – maximální povolený časový posun spojů linky $i \in Lmn$ jedoucích ve směru $s \in S_i$, vztaženo k nejdříve možné časové poloze obsluhy přestupního uzlu Masarykovo náměstí tmn_{ils} ,
- $tprestmn$ – přestupní doba mezi spoji jednotlivých dvojic linek v přestupním uzlu Masarykovo náměstí,
- M – prohibitivní konstanta

Ve srovnání se základním modelem nejsou pro přestupní uzel Masarykovo náměstí definovány samostatné množiny příjíždějících a odjíždějících spojů, ale je definována pouze jedna množina linek Lmn , která obsahuje všechny linky obsluhující přestupní uzel Masarykovo náměstí. Dále byla pro každou linku $i \in Lmn$ nově zavedena množina směrů jízdy S_i , která určuje, pro které směry jízdy jsou dané veličiny definovány. Množina směrů je formálně definována pro každou linku zvlášť, protože v případě okružních či polookružních linek může mít linka pouze jeden směr ve srovnání s klasickým vedením linek ve dvou směrech.

Přestupní vazby, jejichž vznik je požadován, jsou definovány pomocí množiny čtveřic identifikujících požadavky na přestupy mezi spoji linek obsluhujících Masarykovo náměstí Rmn . Prvky této množiny jsou uspořádané čtveřice (i, p, j, s) , které reprezentují požadavek na přestup ze spojů linky $i \in Lmn$ jedoucích ze směru $p \in S_i$ na spoje linky $j \in Lmn$ jedoucí do směru $s \in S_j$.

Ve srovnání se základním modelem, kde je příjíždějící spoj koordinován s libovolným odjíždějícím spojem, je tedy požadavek na přestup určen pouze pro spoje vybraných dvojic linek. Protože musíme umožnit, aby přestupní vazba mezi spojem linky, ze kterého cestující přestupují, mohla vzniknout na více spojů linky, na které cestující přestupují, je pro odlišení jednotlivých spojů těchto linek nově zavedena množina spojů, která je pro linku $i \in Lmn$ označena O_{S_i} . Množiny O_{S_i} pro $i \in Lmn$ budou obsahovat vždy dva spoje. Druhý spoj je do modelu nutné přidat pro případ, kdy z časových důvodů nebude možné vytvořit přestupní vazbu na první spoj linky, na který cestující budou přestupovat. Přestupní doba mezi spoji jednotlivých dvojic linek bude pro všechny dvojice linek stejná, proto je možné ji definovat jako jednu konstantu pro daný přestupní uzel. Prohibitivní konstanta je pomocnou konstantou a bude se jednat o velmi vysoké nezáporné číslo, jehož hodnota musí být vyšší než maximální

hodnota doby čekání, která může při přestupu mezi spoji dvojic linek nastat a která odpovídá hodnotě doby taktu. Prohibitivní konstanta má pro účely této práce stanovenou hodnotu 1 000.

V modelu vystupují tyto proměnné:

- x_{is} [min] – časový posun spojů linky $i \in Lmn$ ve směru $s \in S_i$ vzhledem k nejdříve možným časům obsluhy přestupního uzlu Masarykovo náměstí tmn_{i1s} ,
- hmn_{ikpjs} [min] – doba čekání cestujících ze spoje $k \in Os_i$ při přestupu reprezentovaném čtveřicí $(i, p, j, s) \in Rmn$,
- zmn_{ikpjs} [min] – pomocná bivalentní proměnná určující vznik přestupní vazby pro čtveřicí $(i, p, j, s) \in Rmn$ ze spoje $k \in Os_i$ na spoj $l \in Os_j$ v přestupním uzlu Masarykovo náměstí.

Ve srovnání se základním modelem je časový posun spoje x_{is} nově rozlišován i podle směru jízdy daného spoje linky $i \in Lmn$. Pro linky obsluhující oba přestupní uzly není nutno u proměnných doplňovat označení týkající se přestupního uzlu, neboť posun spojů linky v jednom přestupním uzlu bude odpovídat posunu uvedených spojů i ve druhém přestupním uzlu. Bivalentní proměnná zmn_{ikpjs} určuje, mezi kterými spoji daných linek přestupní vazba vznikne. Ve srovnání s tím u doby čekání přestupujících cestujících již není rozlišeno, o který spoj odjíždějící linky $j \in Lmn$ se jedná, protože díky omezujícím podmínkám je zaručeno, že vždy vznikne přestupní vazba mezi přijíždějícím spojem linky $i \in Lmn$ a právě jedním spojem odjíždějící linky $j \in Lmn$.

Obecný model časové koordinace spojů na Masarykovo náměstí

$$\min(x, hmn, zmn) = \sum_{(i,p,j,s) \in Rmn} \sum_{l \in Os_j} fmn_{i1pjs} hmn_{i1pjs} \quad (2.1)$$

za podmínek:

$$\begin{aligned} [tmn_{j1s} + (l-1)takt_{js} + x_{js}] - (tmn_{i1p} + x_{ip} + tprestmn) & \text{ pro } (i, p, j, s) \in Rmn \\ \geq M(zmn_{i1pjs} - 1) & \text{ pro } l \in Os_j \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} [tmn_{j1s} + (l-1)takt_{js} + x_{js}] - (tmn_{i1p} + x_{ip} + tprestmn) & \text{ pro } (i, p, j, s) \in Rmn \\ \leq hmn_{i1pjs} + (1 - zmn_{i1pjs}) & \text{ pro } l \in Os_j \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\sum_{l \in Os_j} zmn_{i1pjs} = 1 \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rmn \quad (2.4)$$

$$x_{is} \leq a_{is} \quad \text{pro } i \in Rmn, s \in S_i \quad (2.5)$$

$$x_{is} \in R_0^+ \quad \text{pro } i \in Lmn, s \in S_i \quad (2.6)$$

$$hmn_{i1pjs} \in R_0^+ \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rmn \quad (2.7)$$

$$zmn_{i1pjs} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rmn \quad (2.8)$$

$$l \in Os_j$$

Skupiny podmínek (2.2) a (2.3), které svou funkcí odpovídají skupinám podmínek (1.2) a (1.3) v základním modelu, se od skupin podmínek (1.2) a (1.3) liší přidáním členu $(l - 1) takt_{js}$ na levé straně podmínek. Prostřednictvím doplněného výrazu $(l - 1) takt_{js}$ bude vypočítán nejdříve možný čas odjezdu druhého spoje linky $j \in Lmn$ jedoucí za prvním spojem v předepsaném taktu. Pro první spoj linky $j \in Lmn$ je hodnota tohoto výrazu rovna nule, tedy hodnota taktu se k času nejdříve možného odjezdu prvního spoje nepřičítá. Pro druhý spoj je hodnota výrazu v závorce rovna 1, tedy se přičte hodnota jednoho taktu linky, což indikuje čas nejdříve možného odjezdu druhého spoje. Význam účelové funkce a jednotlivých skupin podmínek v modelu (2.1) – (2.8) jsou analogické významům jednotlivých skupin podmínek v základním modelu.

5.1.2. Obecný model časové koordinace pro Krajský úřad

Při tvorbě obecného modelu koordinace spojů na Krajském úřadu byly zavedeny stejné skupiny konstant i proměnných s analogickým značením i významem jako pro model koordinace spojů na Masarykově náměstí. Proměnné a konstanty vztahující se ke konkrétnímu přestupnímu uzlu jsou však zde značeny písmeny „ku“.

Obecný model časové koordinace spojů na Krajském úřadu má tvar:

$$\min(x, hmn, zmn) = \sum_{(i,p,j,s) \in Rku} \sum_{l \in Os_j} fku_{i1pjs} hku_{i1pjs} \quad (2.9)$$

za podmínek:

$$[tku_{j1s} + (l - 1) takt_{js} + x_{js}] - (tku_{i1p} + x_{ip} + tpretku) \geq M(zku_{i1pjs} - 1) \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rku \quad (2.10)$$

$$l \in Os_j$$

$$[tku_{j1s} + (l - 1) takt_{js} + x_{js}] - (tku_{i1p} + x_{ip} + tpretku) \leq hku_{i1pjs} + (1 - zku_{i1pjs}) \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rku \quad (2.11)$$

$$l \in Os_j$$

$$\sum_{l \in Os_j} zku_{i1pjs} = 1 \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rku \quad (2.12)$$

$$x_{is} \leq a_{is} \quad \text{pro } i \in Rku, s \in S_i \quad (2.13)$$

$$x_{is} \in R_0^+ \quad \text{pro } i \in Lku, s \in S_i \quad (2.14)$$

$$hku_{i1pjs} \in R_0^+ \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rku \quad (2.15)$$

$$zku_{i1pjs} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rku \quad (2.16)$$

$$l \in Os_j$$

Význam účelové funkce a jednotlivých skupin podmínek v modelu (2.9) – (2.16) jsou analogické významům jednotlivých skupin podmínek v základním modelu.

5.2. Obecné modely časové koordinace spojů v obou přestupních uzlech

5.2.1. Obecné modely časové koordinace v obou přestupních uzlech pro jeden směr jízdy

Dílčí modely časové koordinace spojů v přestupních uzlech Masarykovo náměstí a Krajský úřad uvedené v předchozí podkapitole byly po ověření jejich funkčnosti postupně propojovány do jednoho modelu koordinujícího přestupy v obou přestupních uzlech. Do tohoto modelu byly přidány následující vstupní údaje:

- L – množina všech koordinovaných linek,
- t_j – doba jízdy mezi oběma přestupními uzly.

Množina všech koordinovaných linek L slouží k rozlišení vstupních údajů, které jsou definovány pro všechny koordinované linky a nelze je dále rozlišit dle toho, který přestupní uzel obsluhují. Příkladem může být linkový interval $takt_{is}$. Doba jízdy mezi oběma přestupními uzly je pro všechny linky a jejich směry vždy stejná.

5.2.1.1 Varianta obecného jednosměrného koordinačního modelu pro posloupnost obsluhy přestupních uzlů Masarykovo náměstí – Krajský úřad

Obecný model časové jednosměrné koordinace v obou přestupních uzlech pro posloupnost přestupních uzlů Masarykovo náměstí – Krajský úřad má tvar:

$$\min(x, hku, hmn, zku, zmn) \quad (3.1)$$

$$= \sum_{(i,p,j,s) \in Rku} \sum_{l \in Os_j} fku_{i1pjs} hku_{i1pjs} + \sum_{(i,p,j,s) \in Rmn} \sum_{l \in Os_j} fmn_{i1pjs} hmn_{i1pjs}$$

za podmínek:

$$\begin{aligned} [tku_{j1s} + (l-1)takt_{js} + x_{js}] - (tku_{i1p} + x_{ip} + tpretku) & \text{ pro } (i, p, j, s) \in Rku, \\ & \geq M(zku_{i1pjs} - 1) \quad l \in Os_j \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} [tmn_{j1s} + (l-1)takt_{js} + x_{js}] - (tmn_{i1p} + x_{ip} + tprestmn) & \text{ pro } (i, p, j, s) \in Rmn & (3.3) \\ \geq M(zmn_{i1pjs} - 1) & l \in Os_j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [tku_{j1s} + (l-1)takt_{js} + x_{js}] - (tku_{i1p} + x_{ip} + tprestku) & \text{ pro } (i, p, j, s) \in Rku, & (3.4) \\ \leq hku_{i1pjs} + (1 - zku_{i1pjs}) & l \in Os_j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [tmn_{j1s} + (l-1)takt_{js} + x_{js}] - (tmn_{i1p} + x_{ip} + tprestmn) & \text{ pro } (i, p, j, s) \in Rmn & (3.5) \\ \leq hmn_{i1pjs} + (1 - zmn_{i1pjs}) & l \in Os_j \end{aligned}$$

$$\sum_{l \in Os_j} zku_{i1pjs} = 1 \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rku \quad (3.6)$$

$$\sum_{l \in Os_j} zmn_{i1pjs} = 1 \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rmn \quad (3.7)$$

$$x_{is} \leq a_{is} \quad \text{pro } i \in L, s \in S_i \quad (3.8)$$

$$tku_{j1s} = tmn_{j1s} + t_j \quad \text{pro } j \in Rku, s \in S_i \quad (3.9)$$

$$tku_{j2s} = tmn_{j1s} + takt_{js} + t_j \quad \text{pro } j \in Rku, s \in S_i \quad (3.10)$$

$$x_{is} \in R_0^+ \quad \text{pro } i \in L, s \in S_i \quad (3.11)$$

$$hku_{i1pjs} \in R_0^+ \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rku \quad (3.12)$$

$$hmn_{i1pjs} \in R_0^+ \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rmn \quad (3.13)$$

$$zku_{i1pjs} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rku, \quad (3.14) \\ l \in Os_j$$

$$zmn_{i1pjs} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rmn \quad (3.15) \\ l \in Os_j$$

Nově jsou do modelu zařazeny dvě skupiny podmínek (3.6) a (3.7), které propojují časy obsluh obou přestupních uzlů linkami projíždějícími oběma uzly ve směru Masarykovo náměstí – Krajský úřad. V případě linek obsluhujících oba přestupní uzly tedy postačí určit čas obsluhy jednoho z přestupních uzlů a čas obsluhy druhého přestupního uzlu lze dle této hodnoty dopočítat. Význam účelové funkce a ostatních skupin omezujících podmínek je analogický jako v případě dílčích modelů popsaných v podkapitole 5.1.

5.2.1.2 Varianta obecného jednosměrného koordinačního modelu pro posloupnost obsluhy přestupních uzlů Krajský úřad – Masarykovo náměstí

Obecný model časové jednosměrné koordinace v obou přestupních uzlech pro posloupnost přestupních uzlů Krajský úřad – Masarykovo náměstí má tvar:

$$\begin{aligned} \min(x, hku, hmn, zku, zmn) & \quad (3.16) \\ & = \sum_{(i,p,j,s) \in Rku} \sum_{l \in Os_j} fku_{i1pjls} hku_{i1pjs} + \sum_{(i,p,j,s) \in Rmn} \sum_{l \in Os_j} fmn_{i1pjls} hmn_{i1pjs} \end{aligned}$$

za podmíněk:

$$\begin{aligned} [tku_{j1s} + (l-1) takt_{js} + x_{js}] - (tku_{i1p} + x_{ip} + tprestku) & \quad \text{pro } (i,p,j,s) \in Rku, \\ & \geq M(zku_{i1pjls} - 1) \quad l \in Os_j \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} [tmn_{j1s} + (l-1) takt_{js} + x_{js}] - (tmn_{i1p} + x_{ip} + tprestmn) & \quad \text{pro } (i,p,j,s) \in Rmn \\ & \geq M(zmn_{i1pjls} - 1) \quad l \in Os_j \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} [tku_{j1s} + (l-1) takt_{js} + x_{js}] - (tku_{i1p} + x_{ip} + tprestku) & \quad \text{pro } (i,p,j,s) \in Rku, \\ & \leq hku_{i1pjs} + (1 - zku_{i1pjls}) \quad l \in Os_j \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} [tmn_{j1s} + (l-1) takt_{js} + x_{js}] - (tmn_{i1p} + x_{ip} + tprestmn) & \quad \text{pro } (i,p,j,s) \in Rmn \\ & \leq hmn_{i1pjs} + (1 - zmn_{i1pjls}) \quad l \in Os_j \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\sum_{l \in Os_j} zku_{i1pjls} = 1 \quad \text{pro } (i,p,j,s) \in Rku \quad (3.21)$$

$$\sum_{l \in Os_j} zmn_{i1pjls} = 1 \quad \text{pro } (i,p,j,s) \in Rmn \quad (3.22)$$

$$x_{is} \leq a_{is} \quad \text{pro } i \in L, s \in S_i \quad (3.23)$$

$$tku_{j1s} = tmn_{j1s} + tj \quad \text{pro } j \in Rku, s \in S_i \quad (3.24)$$

$$tku_{j2s} = tmn_{j1s} + takt_{js} + tj \quad \text{pro } j \in Rku, s \in S_i \quad (3.25)$$

$$x_{is} \in R_0^+ \quad \text{pro } i \in L, s \in S_i \quad (3.26)$$

$$hku_{i1pjs} \in R_0^+ \quad \text{pro } (i,p,j,s) \in Rku \quad (3.27)$$

$$hmn_{i1pjs} \in R_0^+ \quad \text{pro } (i,p,j,s) \in Rmn \quad (3.28)$$

$$zku_{i1pjls} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } (i,p,j,s) \in Rku, \\ l \in Os_j \quad (3.29)$$

$$zmn_{i1pjls} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } (i,p,j,s) \in Rmn \\ l \in Os_j \quad (3.30)$$

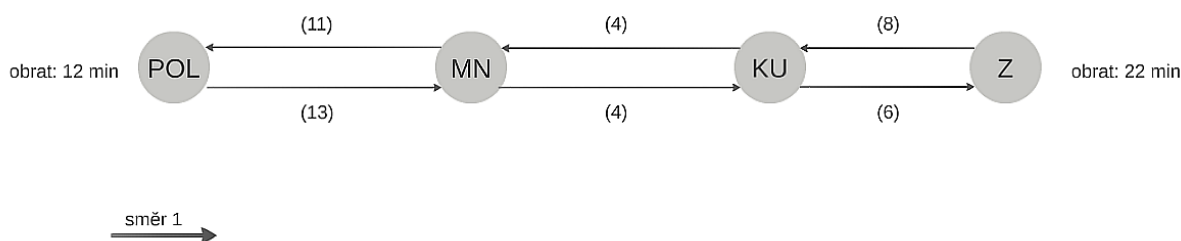
Význam účelové funkce a ostatních skupin omezujících podmínek (3.16) – (3.30) je analogický jako v případě dílčích modelů popsaných v podkapitole 5.1.

5.2.2. Obecný model časové koordinace v obou přestupních uzlech pro oba směry jízdy

Obecný model časové koordinace v obou přestupních uzlech pro oba směry vychází z koncepce modelu koordinace v obou přestupních uzlech pro jeden směr. Nově jsou však koordinovány spoje v obou směrech současně a z toho vyplývá nutnost upravit model takovým

způsobem, aby byl zajištěn dostatek času mezi okamžikem obsluhy přestupního uzlu ve směru 1 a okamžikem obsluhy téhož uzlu stejným vozidlem ve směru 2, tedy zajistit dostatečný časový prostor pro jízdu vozidla mezi přestupním uzlem obsluženým v prvním směru jako první v pořadí na cílovou konečnou zastávku spoje v daném směru, obrát vozidla na dané konečné zastávce a jízdu vozidla zpět z výchozí konečné zastávky do prvního přestupního uzlu na trase v druhém směru. Toho lze dosáhnout nastavením nejdříve možného času obsluhy daného přestupního uzlu na hodnotu, která respektuje dobu potřebnou na přejezdy a obrát spoje na konečné zastávce.

Způsob určení hodnoty nejdříve možného času obsluhy v daném přestupním uzlu bude prezentován na příkladu výpočtu hodnoty nejdříve možného času obsluhy přestupních uzlů pro linku č. 2 v období víkendového přepravního sedla. Na obrázku č. 12 je schematicky znázorněna trasa linky č. 2. Vrcholy grafu reprezentují konečné zastávky linky a přestupní uzly, písmena uvnitř vrcholů jsou zkratkami názvů těchto zastávek. Linka č. 2 ve směru 1 vyjíždí ze zastávky Polabiny, točna (značeno POL), obsluhuje nejprve přestupní uzel Masarykovo náměstí (MN), dále Krajský úřad (KU) a končí na točně Zámeček (Z). Ohodnocení hran reprezentují doby jízdy v minutách na úsecích mezi vyznačenými zastávkami v obou směrech a u konečné zastávky je uvedena doba obratu.



Obrázek č. 12: Schéma trasy linky č. 2

Nejdříve možný čas obsluhy přestupního uzlu poprvé obsluženého daným spojem je možno libovolně zvolit v průběhu definované časové jednotky, pro přehlednost bude hodnota tohoto času odjezdu vždy rovna 00 a jako první bude obslužen první přestupní uzel na trase dané linky ve směru 1. První koordinovaný přestupní uzel obslužený linkou č. 2 ve směru 1 je Masarykovo náměstí, určíme tedy čas odjezdu z tohoto uzlu jako 00. Na základě známé doby jízdy mezi Masarykovým náměstím a točnou Zámeček (10 min), doby obratu na točně (22 min) a doby jízdy z točny zpět na Masarykovo náměstí (12 min) lze určit nejdříve možný čas obsluhy tohoto uzlu v opačném směru stejným vozidlem jako $10 + 22 + 12 = 44$ min.

Tato hodnota však v modelu nebude použita, protože je žádoucí, aby se všechny hodnoty nejdříve možného času obsluhy zastávky koordinovanými linkami nacházely ve stejném intervalu, jehož velikost odpovídá hodnotě taktu linek (jinak by nebylo možné časy obsluhy přestupních uzlů mezi sebou ve stejném taktu koordinovat). Linka č. 2 jezdí v období víkendového přepravního sedla v taktu 30 min, nejdříve možný čas obsluhy uzlu se tedy musí nacházet v intervalu 0 – 30 minut. Proto se od vypočítané hodnoty příjezdu do uzlu Masarykovo náměstí, která činí 44 minut, odečte doba taktu a tím získáme nejdříve možný čas obsluhy Masarykova náměstí ve druhém směru $44 - 30 = 14$ minut. Nejdříve možný čas obsluhy druhého přestupního uzlu Krajský úřad lze pak snadno zjistit po přičtení (ve směru 1) nebo odečtení doby jízdy (směr 2) mezi oběma přestupními uzly k vypočteným nejdříve možným časům obsluhy zastávky Masarykovo náměstí. Tímto způsobem byly určeny nejdříve možné časy obsluhy všech koordinovaných linek v obou směrech, které jsou uvedeny v tabulce č. 4. Zde je nutno poznamenat, že vzhledem k tomu, že u linky č. 2 a linky č. 6 dochází k obrátům vozidel v průběhu dne v různých zastávkách, došlo zde ke zjednodušení ve formě stanovení pouze dvou točen pro každou linku (pro linku č. 2 točny Polabiny a Zámeček, pro linku č. 6 točny Dukla a Rosice), odpovídajících nejčastěji obsluhované trase linky a jiné varianty nebyly uvažovány.

Tabulka č. 4: Nejdříve možné časy obsluhy přestupních uzlů

Masarykovo náměstí		Nejdříve možný čas obsluhy [min]	
Číslo linky	Směr	Sedlo	Špička
1	1	04	04
	2	12	02
2	1	00	00
	2	14	24
3	1	00	00
	2	22	22
6	1	00	20
	2	19	29
Krajský úřad		Nejdříve možný čas obsluhy [min]	
Číslo linky	Směr	Sedlo	Špička
1	1	00	00
	2	16	06
2	1	04	04
	2	10	20
11	1	0	00
	2	29	29

Kromě nejdříve možných časů obsluhy je nutné zjistit ještě dvě veličiny – skutečnou oběžnou dobu linky a plánovanou oběžnou dobu linky. Na základě známých údajů lze vypočítat skutečnou oběžnou dobu linky č. 2 jako součet dob jízdy na všech úsecích v obou směrech a dob obrátů na točnách. Skutečná oběžná doba linky č. 2 je tedy rovna $13 + 4 + 6 + 22 + 8 +$

$4 + 11 + 12 = 80$ minutám. Dále je třeba určit takzvanou plánovanou oběžnou dobu – ta odpovídá nejbližšímu možnému času odjezdu stejného vozidla ze stejné zastávky při zohlednění linkového intervalu (taktu). Plánovanou oběžnou dobu lze tedy určit zaokrouhlením skutečné oběžné doby nahoru na nejbližší celočíselný násobek doby taktu dané linky.

V případě linky č. 2, která v období víkendového přepravního sedla jezdí v taktu 30 minut, je tedy nejbližší celočíselný násobek tohoto taktu skutečné oběžné doby o hodnotě 80 minut trojnásobek doby taktu, tedy plánovaná oběžná doba linky č. 2 v období víkendového přepravního sedla je 90 minut. Na základě známých hodnot skutečných a plánovaných oběžných dob lze určit časovou rezervu spojů linky, která je rovna rozdílu mezi plánovanou a skutečnou oběžnou dobou, tedy pro linku č. 2 má časová rezerva hodnotu $90 - 80 = 10$ minut. Hodnoty skutečných a plánovaných dob oběhu linek a z nich vyplývajících časových rezerv jsou uvedeny v tabulce č. 5.

Tabulka č. 5: Časové rezervy na linkách

Období sedla	Skutečná oběžná doba [min]	Plánovaná oběžná doba [min]	Časová rezerva [min]
Číslo linky			
1	60	60	0
2	80	90	10
3	70	90	20
6	80	90	10
11	60	60	0
Období sedla	Skutečná oběžná doba [min]	Plánovaná oběžná doba [min]	Časová rezerva [min]
Číslo linky			
1	60	60	0
2	80	80	0
3	70	90	20
6	80	80	0
11	60	60	0

Pro využití časových rezerv linek došlo k úpravě proměnné časový posun spoje, která byla definována pro linku a směr, ve kterém tato linka jede, a nově je definována pouze pro danou linku. Dále byly zavedeny následující veličiny:

- b_i – časová rezerva spojů na lince $i \in L$,
- y_i – časový posun spojů linky $i \in L$ ve směru 2, vzhledem k nejdříve možným časům jejich příjezdů do daného přestupního uzlu.

Maximální hodnota časového posunu y_i spojů linky $i \in L$ ve směru 2 je rovna časové rezervě b_i spojů této linky. Maximální časový posun spoje linky $i \in L$ vztaženo k nejdříve možné časové poloze obsluhy přestupního uzlu jedoucího ve směru 1 odpovídá hodnotě proměnné a_i . Maximální časový posun linky ve směru 2 pak odpovídá součtu maximálního povoleného časového posunu spojů dané linky a_i a časové rezervy spojů na této lince b_i . Dojde tedy ke změně levé strany rovnice skupin podmínek (3.2), (3.3), (3.4) a (3.5). Tato změna bude demonstrována na příkladu podmínky pro koordinaci přestupu z prvního spoje linky č. 1 ve směru 1 na první spoj linky č. 3 ve směru 2. Původní tvar podmínky (3.3) pro danou kombinaci spojů je:

$$(tmn_{312} + x_{32}) - (tku_{111} + tj + x_{11} + tprestmn) \geq M * (zmn_{111312} - 1)$$

Upravený tvar dané podmínky bude:

$$(tmn_{312} + x_3 + y_3) - (tku_{111} + tj + x_1 + tprestmn) \geq M * (zmn_{111312} - 1)$$

Dále byl model časové koordinace pro oba směry doplněn o skupinu podmínek zajišťujících, že časový posun spojů ve směru 2 nepřekročí hodnotu časové rezervy spojů této linky:

$$y_i \leq b_i \quad \text{pro } i \in L$$

Obecný model časové koordinace v obou přestupních uzlech pro oba směry jízdy:

$$\min(x, hku, hmn, zku, zmn) = \sum_{(i,p,j,s) \in Rku} \sum_{l \in Os_j} fku_{i1pjls} hku_{i1pjs} + \sum_{(i,p,j,s) \in Rmn} \sum_{l \in Os_j} fmn_{i1pjls} hmn_{i1pjs} \quad (4.1)$$

za podmínek:

$$\begin{aligned} [tku_{j1s} + (l-1) takt_{js} + x_j + (p-1)y_j] - (tku_{i1p} + x_i + (s-1)y_j + tprestku) & \text{ pro } (i,p,j,s) \in Rku, \\ & \geq M(zku_{i1pjls} - 1) \quad l \in Os_j \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} [tmn_{j1s} + (l-1) takt_{js} + x_j + (p-1)y_j] - (tmn_{i1p} + x_i + (s-1)y_j + tprestmn) & \text{ pro } (i,p,j,s) \in Rmn \\ & \geq M(zmn_{i1pjls} - 1) \quad l \in Os_j \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} [tku_{j1s} + (l-1) takt_{js} + x_j + (p-1)y_j] - (tku_{i1p} + x_i + (s-1)y_j + tprestku) & \text{ pro } (i,p,j,s) \in Rku, \\ & \leq hku_{i1pjs} + (1 - zku_{i1pjls}) \quad l \in Os_j \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} [tmn_{j1s} + (l-1) takt_{js} + x_j + (p-1)y_j] - (tmn_{i1p} + x_i + (s-1)y_j + tprestmn) & \text{ pro } (i,p,j,s) \in \\ & \leq hmn_{i1pjs} + (1 - zmn_{i1pjls}) \quad \begin{matrix} Rmn \\ l \in Os_j \end{matrix} \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\sum_{l \in Os_j} zku_{i1pjls} = 1 \quad \text{pro } (i,p,j,s) \in Rku \quad (4.6)$$

$$\sum_{l \in Os_j} zmn_{i1pjls} = 1 \quad \text{pro } (i,p,j,s) \in Rmn \quad (4.7)$$

$$x_i \leq a_i \quad \text{pro } i \in L \quad (4.8)$$

$$y_i \leq b_i \quad \text{pro } i \in L \quad (4.9)$$

$$tku_{j1s} = tmn_{j1s} + tj \quad \text{pro } j \in Rku, s \in S_i \quad (4.10)$$

$$tku_{j2s} = tmn_{j1s} + takt_{js} + tj \quad \text{pro } j \in Rku, s \in S_i \quad (4.11)$$

$$x_i \in R_0^+ \quad \text{pro } i \in L, \quad (4.12)$$

$$y_i \in R_0^+ \quad \text{pro } i \in L, \quad (4.13)$$

$$hku_{i1pjs} \in R_0^+ \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rku \quad (4.14)$$

$$hmn_{i1pjs} \in R_0^+ \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rmn \quad (4.15)$$

$$zku_{i1pjs} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rku \quad (4.16)$$

$$l \in Os_j$$

$$zmn_{i1pjs} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } (i, p, j, s) \in Rmn \quad (4.17)$$

$$l \in Os_j$$

5.3. Vstupní data pro optimalizační výpočet

Pro potřeby modelu bylo žádoucí 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: Přečíslování 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 linek obsluhujících Masarykovo náměstí Lmn je tedy použito přečíslování uvedené v horní části tabulky č. 6 označené „Masarykovo náměstí“ a pro množinu linek Lku obsluhujících přestupní uzel Krajský úřad je použito přečíslování, které je uvedeno ve střední části tabulky č. 6 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. 3 a naopak pokud je veličina označená písmeny „ku“, půjde vždy o linku č. 11. Například hmn_{31121} je doba čekání cestujícího přestupujícího z prvního spoje linky č. 3 (index 3) na spoj linky č. 2 (index 2) na Masarykově

náměstí, zatímco hku_{31121} je doba čekání cestujícího přestupujícího z prvního spoje linky č. 11 (index 3) na spoj linky 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 přečíslování je uvedeno v dolní části tabulky č. 6 označené „Všechny koordinované linky“ a je například využito u množiny všech koordinovaných linek L .

Hodnoty intenzit přestupujících cestujících jsou známy 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*. Průzkumy však byly zpracovány pouze pro zastávky Masarykovo náměstí a Náměstí Republiky a jen pro pracovní den. Z toho důvodu nebyla tato data pro účely této práce vhodná. Z technických důvodů nebylo možné ani provést aktuální průzkum, proto byla použita modelová hodnota intenzit 1 pro všechny přestupní vazby. Zvolení stejných hodnot intenzit přestupujících cestujících přiděluje všem přestupním vazbám stejné váhy a zároveň reprezentuje maximální míru neurčitosti ve vstupních datech podléhajících náhodným vlivům.

Maximální povolený časový posun spoje a_i odpovídá taktu dané linky, sníženému o jednu minutu, tedy např. linka č. 1, která má v období víkendového přepravního sedla takt 30 minut, bude mít maximální povolený časový posun spoje a_1 v daném období roven $30 - 1 = 29$ minut. Takty jednotlivých linek jsou uvedeny v tabulce č. 7.

Tabulka č. 7: Linkové 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

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 prohibitivní konstanta M má hodnotu 1 000.

5.4. Kompletní matematický model

Kompletní matematický model Model2_sedlo má tvar:

$$\begin{aligned} \min f(x, y, h, z) = & fku_{311211} * hku_{31121} + fku_{111211} * hku_{11121} + fku_{212312} * hku_{21232} \\ & + fku_{212112} * hku_{21212} + fmn_{311211} * hmn_{31121} + fmn_{411211} * hmn_{41121} + fmn_{111312} \\ & * hmn_{11132} + fmn_{212312} * hmn_{21232} + fmn_{212412} * hmn_{21242} + fmn_{311112} * hmn_{31112} \end{aligned}$$

za podmínek:

$$(tmn_{211} + x_2 + tj) - (tku_{111} + x_1 + tprestku) \geq M * (zku_{111211} - 1)$$

$$(tmn_{211} + takt_{21} + x_2 + tj) - (tku_{111} + x_1 + tprestku) \geq M * (zku_{111221} - 1)$$

$$(tmn_{211} + x_2 + tj) - (tku_{311} + x_5 + tprestku) \geq M * (zku_{311211} - 1)$$

$$(tmn_{211} + takt_{21} + x_2 + tj) - (tku_{311} + x_5 + tprestku) \geq M * (zku_{311221} - 1)$$

$$(tku_{112} + x_1 + y_1) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 - tj + tprestku) \geq M * (zku_{212112} - 1)$$

$$(tku_{112} + takt_{12} + x_1 + y_1) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 - tj + tprestku) \geq M * (zku_{212122} - 1)$$

$$(tku_{312} + x_5 + y_2) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 - tj + tprestku) \geq M * (zku_{212312} - 1)$$

$$(tku_{312} + takt_{52} + x_5 + y_2) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 - tj + tprestku) \geq M * (zku_{212322} - 1)$$

$$(tmn_{211} + x_2) - (tmn_{311} + x_3 + tprestmn) \geq M * (zmn_{311211} - 1)$$

$$(tmn_{211} + takt_{21} + x_2) - (tmn_{311} + x_3 + tprestmn) \geq M * (zmn_{311221} - 1)$$

$$(tmn_{211} + x_2) - (tmn_{411} + x_4 + tprestmn) \geq M * (zmn_{411211} - 1)$$

$$(tmn_{211} + takt_{21} + x_2) - (tmn_{411} + x_4 + tprestmn) \geq M * (zmn_{411221} - 1)$$

$$(tmn_{312} + x_3 + y_3) - (tku_{111} + tj + x_1 + tprestmn) \geq M * (zmn_{111312} - 1)$$

$$(tmn_{312} + takt_{32} + x_3 + y_3) - (tku_{111} + tj + x_1 + tprestmn) \geq M * (zmn_{111322} - 1)$$

$$(tmn_{312} + x_3 + y_3) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 + tprestmn) \geq M * (zmn_{212312} - 1)$$

$$(tmn_{312} + takt_{32} + x_3 + y_3) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 + tprestmn) \geq M * (zmn_{212322} - 1)$$

$$(tmn_{412} + x_4 + y_4) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 + tprestmn) \geq M * (zmn_{212412} - 1)$$

$$(tmn_{412} + takt_{42} + x_4 + y_4) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 + tprestmn) \geq M * (zmn_{212422} - 1)$$

$$(tku_{112} + x_1 + y_1 - tj) - (tmn_{311} + x_3 + tprestmn) \geq M * (zmn_{311112} - 1)$$

$$(tku_{112} + takt_{12} + x_1 + y_1 - tj) - (tmn_{311} + x_3 + tprestmn) \geq M * (zmn_{311122} - 1)$$

$$(tmn_{211} + x_2 + tj) - (tku_{111} + x_1 + tprestku)u \leq hku_{11121} + M * (1 - zku_{111211})$$

$$(tmn_{211} + takt_{21} + x_2 + tj) - (tku_{111} + x_1 + tprestku) \leq hku_{11121} + M * (1 - zku_{111221})$$

$$\begin{aligned}
& (tmn_{211} + x_2 + tj) - (tku_{311} + x_5 + tprestku) \leq hku_{31121} + M * (1 - zku_{311211}) \\
& (tmn_{211} + takt_{21} + x_2 + tj) - (tku_{311} + x_5 + tprestku) \leq hku_{31121} + M * (1 - zku_{311221}) \\
& (tku_{112} + x_1 + y_1) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 - tj + tprestku) \leq hku_{21212} + M * (1 - zku_{212112}) \\
& (tku_{112} + takt_{12} + x_1 + y_1) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 - tj + tprestku) \leq hku_{21212} + M * (1 - zku_{212122}) \\
& (tku_{312} + x_5 + y_5) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 - tj + tprestku) \leq hku_{21232} + M * (1 - zku_{212312}) \\
& (tku_{312} + takt_{52} + x_5 + y_5) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 - tj + tprestku) \leq hku_{21232} + M * (1 - zku_{212322})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (tmn_{211} + x_2) - (tmn_{311} + x_3 + tprestmn) \leq hmn_{31121} + M * (1 - zmn_{311211}) \\
& (tmn_{211} + takt_{21} + x_2) - (tmn_{311} + x_3 + tprestmn) \leq hmn_{31121} + M * (1 - zmn_{311221}) \\
& (tmn_{211} + x_2) - (tmn_{411} + x_4 + tprestmn) \leq hmn_{41121} + M * (1 - zmn_{411211}) \\
& (tmn_{211} + takt_{21} + x_2) - (tmn_{411} + x_4 + tprestmn) \leq hmn_{41121} + M * (1 - zmn_{411221}) \\
& (tmn_{312} + x_3 + y_3) - (tku_{111} + x_1 + tj + tprestmn) \leq hmn_{11132} + M * (1 - zmn_{111312}) \\
& (tmn_{312} + takt_{32} + x_3 + y_3) - (tku_{111} + x_1 + tj + tprestmn) \leq hmn_{11132} + M * (1 - zmn_{111322}) \\
& (tmn_{312} + x_3 + y_3) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 + tprestmn) \leq hmn_{21232} + M * (1 - zmn_{212312}) \\
& (tmn_{312} + takt_{32} + x_3 + y_3) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 + tprestmn) \leq hmn_{21232} + M * (1 - zmn_{212322}) \\
& (tmn_{412} + x_4 + y_4) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 + tprestmn) \leq hmn_{21242} + M * (1 - zmn_{212412}) \\
& (tmn_{412} + takt_{42} + x_4 + y_4) - (tmn_{212} + x_2 + y_2 + tprestmn) \leq hmn_{21242} + M * (1 - zmn_{212422}) \\
& (tku_{112} + x_1 + y_1 - tj) - (tmn_{311} + x_3 + tprestmn) \leq hmn_{31112} + M * (1 - zmn_{311112}) \\
& (tku_{112} + takt_{12} + x_1 + y_1 - tj) - (tmn_{311} + x_3 + y_3 + tprestmn) \leq hmn_{31112} + M * (1 - zmn_{311122})
\end{aligned}$$

$$zku_{311211} + zku_{311221} \geq 1$$

$$zku_{111211} + zku_{111221} \geq 1$$

$$zku_{212312} + zku_{212322} \geq 1$$

$$zku_{212112} + zku_{212122} \geq 1$$

$$zmn_{311211} + zmn_{311221} \geq 1$$

$$zmn_{411211} + zmn_{411221} \geq 1$$

$$zmn_{111312} + zmn_{111322} \geq 1$$

$$zmn_{212312} + zmn_{212322} \geq 1$$

$$zmn_{212412} + zmn_{212422} \geq 1$$

$$zmn_{311112} + zmn_{311122} \geq 1$$

$$x_1 \leq a_1$$

$$x_2 \leq a_2$$

$$x_3 \leq a_3$$

$$x_4 \leq a_4$$

$$x_5 \leq a_5$$

$$y_1 \leq b_1$$

$$y_4 \leq b_4$$

$$y_2 \leq b_2$$

$$y_5 \leq b_5$$

$$y_3 \leq b_3$$

$$zku_{111211} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{311221} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{212312} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{111221} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{212112} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{212322} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{311211} \in \{0; 1\}$$

$$zku_{212122} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{311211} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{411221} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{212312} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{212422} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{311221} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{111312} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{212312} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{311112} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{411211} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{111322} \in \{0; 1\}$$

$$zmn_{212412} \in \{0; 1\}$$

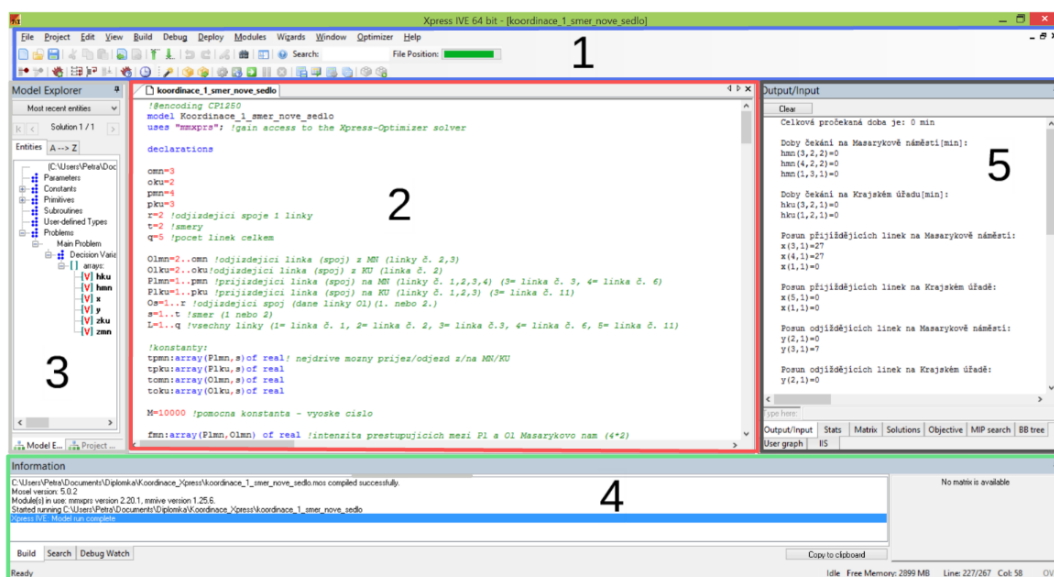
$$zmn_{311122} \in \{0; 1\}$$

6. Výpočetní experimenty

Pro výpočetní experimenty s matematickým modelem realizované v předložené 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 základních částí (oken), jak je naznačeno na obrázku č. 13 barevnými rámečky označenými čísly. V horní části plochy (rámeček 1) se nachází menu a lišta nástrojů. Nejdůležitějšími nástroji jsou zde tlačítko „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 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. 13: Pracovní prostředí software 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 vypsáno chybové hlášení 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 textu programu 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 vystupující v modelu. Deklarační část je oddělena od ostatního textu programu klíčovými slovy „*declarations*“ na jejím počátku a „*end-declarations*“ na jejím konci. Následuje příklad deklarační části:

```
declarations
```

```
w=4
```

```
t=2
```

```
r=2
```

```
c=5
```

```
L=1c
```

$Lmn=1..w$

$S=1..t$

$Os=1..r$

$tmn:array(Lmn,Os,S)of\ real$

$x:array(L)\ of\ mpvar$

end-declarations

Nejprve jsou definovány indexy, které jsou dále použity k definování rozsahu množin. Například množina linek obsluhujících Masarykovo náměstí Lmn má rozsah 1 až 4. Obdobně jsou v modelu definovány i ostatní množiny Lku a L . 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 veličiny nejdříve možný čas obsluhy zastávky Masarykovo náměstí tmn , která je polem o rozsahu velikosti veličiny Lmn , velikosti veličiny Os a velikosti veličiny S , tedy v tomto případě má pole velikost $4 \times 2 \times 2$. Druhý typ veličiny 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 hodnoty maximálních povolených časových posunů spojů jednotlivých linek, hodnoty linkových intervalů 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 včetně definičních oborů proměnných 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.

V případě zadávání optimalizačního kritéria je nejdříve definován funkční předpis dané kritérium reprezentující a poté je volána procedura *minimize*, která minimalizuje hodnotu optimalizačního kritéria uvedeného za klíčovým slovem „minimize“. Příklad zápisu minimalizace kritériální funkce je uveden níže. U maximalizačních úloh je zápis kritériální

funkce analogický, pouze se využije procedura *maximize* maximalizující hodnotu optimalizačního kritéria.

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

minimize(celkova_procekana_doba)
```

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

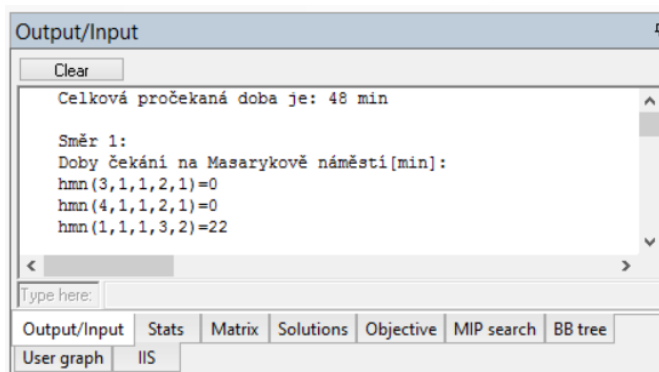
```
writeln("Celková pročekaná doba je: ", getobjval," min ")

writeln(" ")

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

writeln("hmn(",3,",",1,",",1,",",2,",",1,",",1,)=",getsol(hmn(3,1,1,2,1)))
```

Nejprve je tedy vypsána vypočtená hodnota optimalizačního kritéria – v případě úloh o časové koordinaci celková pročekaná doba v minutách a poté text "Doby čekání na Masarykově náměstí [min]:" a dále jednotlivé doby čekání pro konkrétní přestupy. Příklad výpisu je uveden na obr. č. 14.



Obr. č. 14: Okno software Xpress-IVE s výpisem dosažených výsledků

6.3. Výpočetní experiment a zhodnocení dosažených výsledků

V experimentální části práce byly provedeny tři varianty výpočetních experimentů pro obě koordinační období (víkendové přepravní sedlo, víkendová přepravní špička).

První varianta výpočetního experimentu odpovídá původnímu zadání, tedy koordinaci pěti dvojic linek ve dvou přestupních uzlech. Ve druhé variantě výpočetního experimentu byla z koordinace vyloučena přestupní vazba mezi linkou č. 1 a linkou č. 3 v obou směrech, tedy byly ponechány pouze přestupní vazby vázané na linku č. 2. To odpovídá hlavnímu cíli práce zlepšit především přepravní vztahy mezi oblastí Pardubiček, obsluhovanou linkou č. 2, a jinými částmi města. Ve třetí variantě výpočetního experimentu pak byla navíc z koordinace vyjmuta i přestupní vazba mezi linkou č. 11 a linkou č. 2 s cílem zjistit, jestli by toto nepřineslo výraznější snížení dob čekání na ostatních linkách. Linka č. 11 byla zvolena k vyjmutí z koordinace proto, že má konečnou zastávku na Dubině, stejně jako linka č. 8, která obsluhuje zastávku U nemocnice, a tak je i bez koordinace zajištěna alespoň přepravní relace Dubina – nemocnice (byť se tedy nejedná o relaci Dubina – Pardubičky).

Nejprve budou představeny dosažené výsledky v rámci jednotlivých výpočetních experimentů a porovnány se současným stavem. Poté budou jednotlivé varianty porovnány mezi sebou z hlediska celkových dob čekání a uplatnitelnosti těchto variant v praxi.

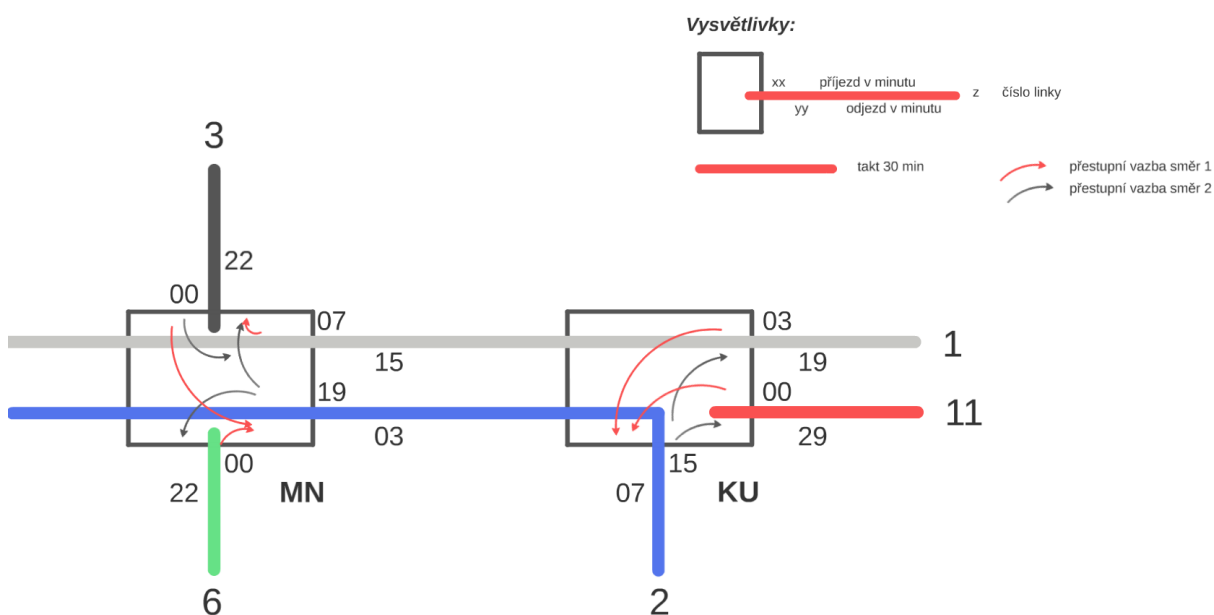
6.3.1. Varianta 1 výpočetního experimentu – původní zadání

V tabulce č. 8 jsou uvedeny doby čekání cestujících pro variantu 1 a období víkendového přepravního sedla po ukončení optimalizačního výpočtu. Vzhledem k tomu, že současná doba čekání jsou vyhovující pouze u přestupů z linky č. 1 na linku č. 2, došlo k výraznému zlepšení na všech relacích s výjimkou této přestupní vazby, u které zůstala nulová doba čekání zachována. Po koordinaci zůstává poměrně vysoká doba čekání při přestupu z linky č. 2 na linku č. 1 (10 min) a dále při přestupu mezi linkami č. 1 a 3 v obou směrech (12 min) a to i přesto, že zde došlo ke zlepšení ve srovnání se současnou situací.

Tabulka č. 8: Doby čekání – varianta 1, víkendové přepravní sedlo

Masarykovo náměstí (sedlo)				
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Současná doba čekání [min]	Doba čekání určená optimalizačním výpočtem [min]	Změna [min]
3 (Lázně Bohdaneč)	2 (Pardubičky)	15	0	-15
2 (Pardubičky)	3 (Lázně Bohdaneč)	17	0	-17
6 (Dukla)	2 (Pardubičky)	13	0	-13
2 (Pardubičky)	6 (Dukla)	13	0	-13
1 (Slovany)	3 (Lázně Bohdaneč)	18	12	-6
3 (Lázně Bohdaneč)	1 (Slovany)	26	12	-14
Krajský úřad (sedlo)				
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Současná doba čekání [min]	Doba čekání určená optimalizačním výpočtem [min]	Změna [min]
1 (Slovany)	2 (Pardubičky)	0	0	0
2 (Pardubičky)	1 (Slovany)	20	10	-10
11 (Dubina)	2 (Pardubičky)	18	3	-15
2 (Pardubičky)	11 (Dubina)	15	0	-15
Celkem:		155	37	-118

Na obrázku č. 15 je znázorněna síťová grafika koordinovaných linek pro variantu 1 a období víkendového přepravního sedla a jsou zde uvedeny časy odjezdů a příjezdů spojů daných linek.



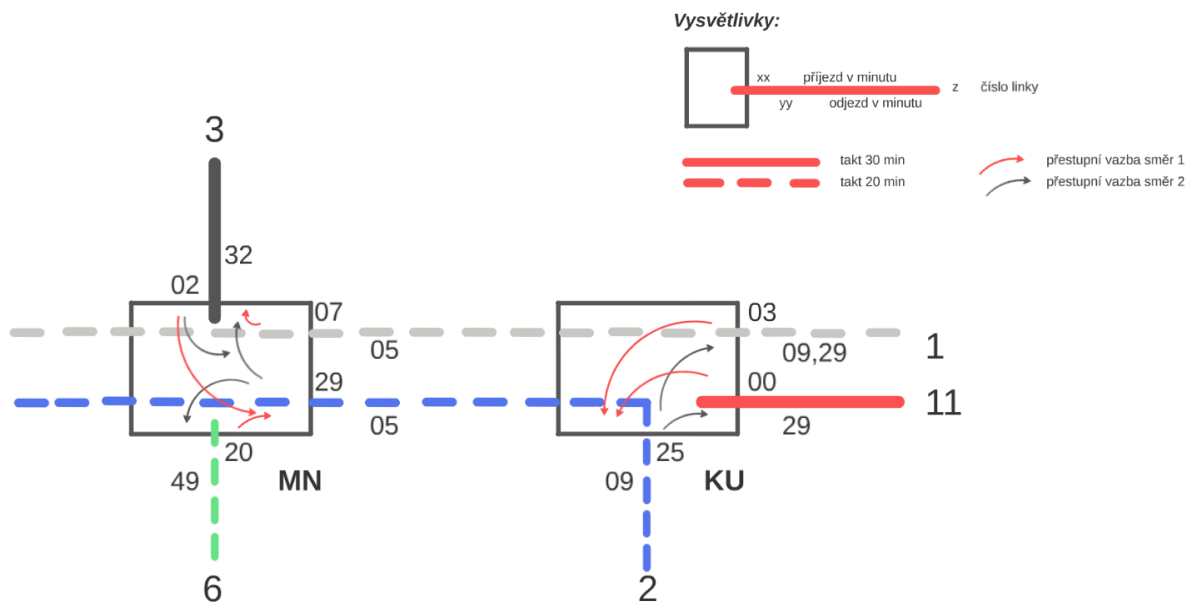
Obr. č. 15: Síťová grafika – varianta 1, víkendové přepravní sedlo

V tabulce č. 9 jsou uvedeny doby čekání cestujících v období víkendové přepravní špičky. Současné doby čekání v tomto období nejsou tak vysoké, jako v období víkendového přepravního sedla, proto rozdíl celkových dob čekání v současném stavu a po koordinaci není tak výrazný. Značná doba čekání zde vychází při přestupu z linky č. 2 na linku č. 6 (17 min) a z linky č. 1 na linku č. 3 (22 min).

Tabulka č. 9: Doby čekání – varianta 1, víkendová přepravní špička

Masarykovo náměstí (špička)				
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Současná doba čekání [min]	Doba čekání určená optimalizačním výpočtem	Změna [min]
3 (Lázně Bohdaneč)	2 (Pardubičky)	5	0	-5
2 (Pardubičky)	3 (Lázně Bohdaneč)	7	0	-7
6 (Dukla)	2 (Pardubičky)	18	2	-16
2 (Pardubičky)	6 (Dukla)	1	17	16
1 (Slovany)	3 (Lázně Bohdaneč)	8	22	14
3 (Lázně Bohdaneč)	1 (Slovany)	6	0	-6
Krajský úřad (špička)				
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Současná doba čekání [min]	Doba čekání určená optimalizačním výpočtem	Změna [min]
1 (Slovany)	2 (Pardubičky)	10	2	-8
2 (Pardubičky)	1 (Slovany)	10	0	-10
11 (Dubina)	2 (Pardubičky)	8	5	-3
2 (Pardubičky)	11 (Dubina)	5	0	-5
Celkem:		78	48	-30

Na obrázku č. 16 je znázorněna síťová grafika koordinovaných linek pro variantu 1 a období víkendové přepravní špičky a jsou zde uvedeny časy odjezdů a příjezdů spojů daných linek.



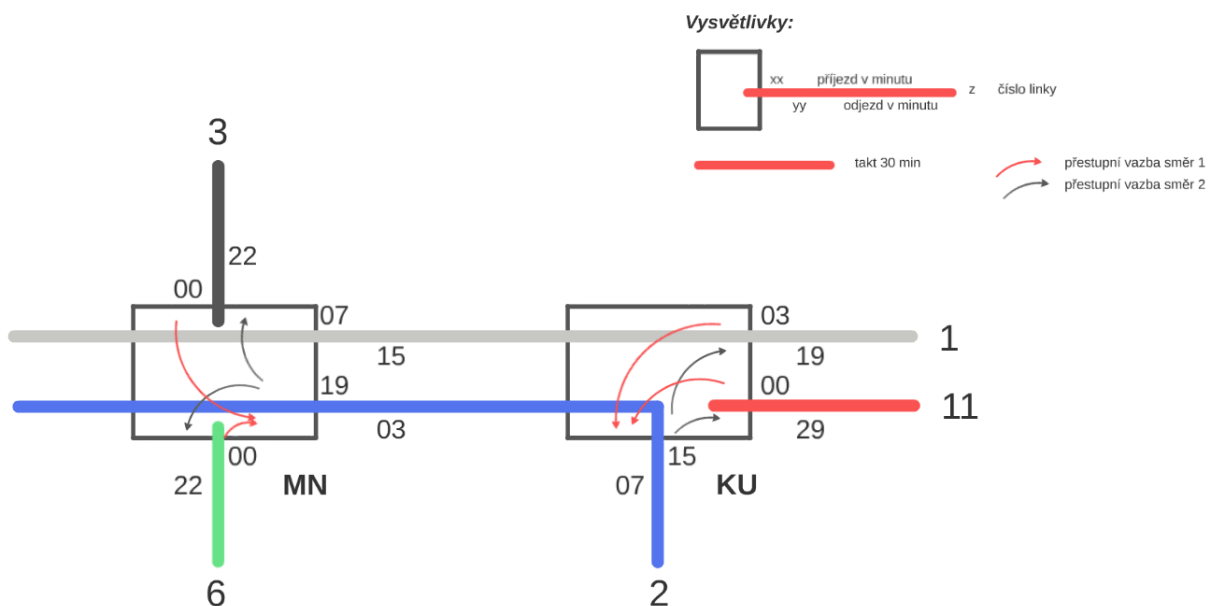
Obr. č. 16: Síťová grafika – varianta 1, víkendová přepravní špička

6.3.2. Varianta 2 výpočetního experimentu – odstranění jedné přestupní vazby

Ve druhé variantě výpočetního experimentu byly ke koordinaci ponechány pouze přestupní vazby ostatních linek s linkou č. 2. Byl tedy odstraněn požadavek na vytvoření přestupní vazby mezi spoji linky č. 1 a spoji linky č. 3 v obou směrech, pro které ve variantě 1 v období víkendového přepravního sedla vyšla nejvyšší doba čekání a v období víkendové přepravní špičky ve směru 1 také. Doby čekání pro variantu 2 a období víkendového přepravního sedla po ukončení optimalizačního výpočtu jsou uvedeny v tabulce č. 10. Nejvyšší doba čekání zde nastává při přestupu z linky č. 2 na linku č. 11 (10 min), ta také tvoří převážnou část celkové doby čekání v tomto období (13 min). Na obrázku č. 17 je znázorněna síťová grafika koordinovaných linek pro variantu 2 a období víkendového přepravního sedla a jsou zde uvedeny časy odjezdů a příjezdů spojů daných linek.

Tabulka č. 10: Doby čekání – varianta 2, víkendové přepravní sedlo

Masarykovo náměstí (sedlo)				
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Současná doba čekání [min]	Doba čekání určená optimalizačním výpočtem [min]	Změna [min]
3 (Lázně Bohdaneč)	2 (Pardubičky)	15	0	-15
2 (Pardubičky)	3 (Lázně Bohdaneč)	17	0	-17
6 (Dukla)	2 (Pardubičky)	13	0	-13
2 (Pardubičky)	6 (Dukla)	13	0	-13
Krajský úřad (sedlo)				
Linka č. x (koordinovaná)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Současná doba čekání	Doba čekání určená optimalizačním	Změna [min]
1 (Slovany)	2 (Pardubičky)	0	0	-
2 (Pardubičky)	1 (Slovany)	20	0	-20
11 (Dubina)	2 (Pardubičky)	18	3	-15
2 (Pardubičky)	11 (Dubina)	15	10	-5
Celkem:		111	13	-98



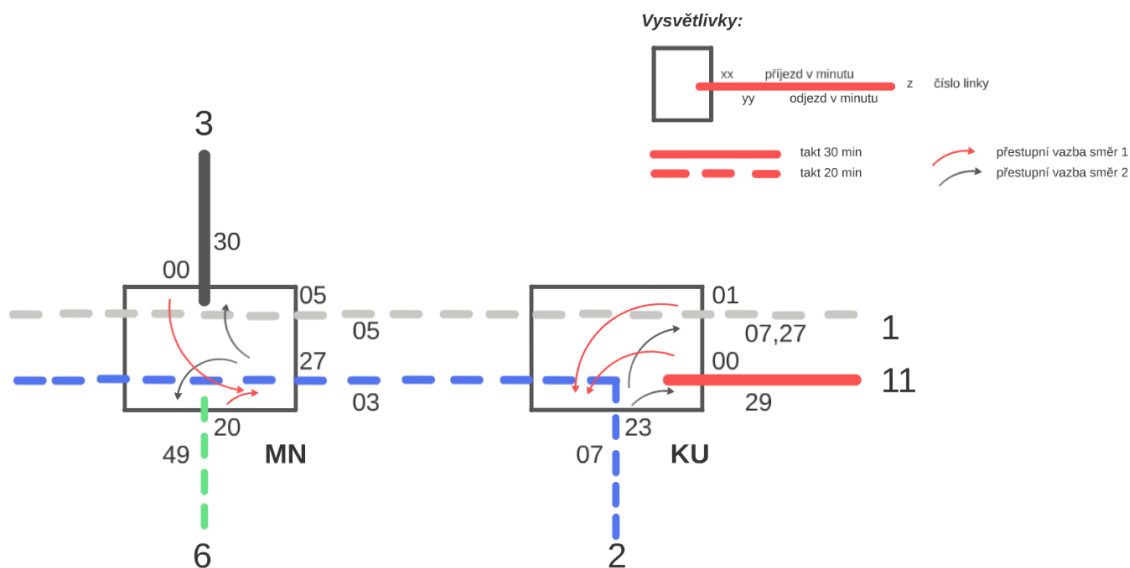
Obr. č. 17: Síťová grafika – varianta 2, víkendové přepravní sedlo

V tabulce č. 11 jsou uvedeny doby čekání cestujících u varianty 2 v období víkendové přepravní špičky. Rozdíl celkových dob čekání v současném stavu a po koordinaci zde opět není tak výrazný jako v období víkendového přepravního sedla. Značná doba čekání zde vychází pouze při přestupu ze spojů linky č. 2 na spoje linky č. 6 (19 min).

Tabulka č. 11: Doby čekání – varianta 2, víkendová přepravní špička

Masarykovo náměstí (špička)				
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Současná doba čekání [min]	Doba čekání určená optimalizačním výpočtem [min]	Změna [min]
3 (Lázně Bohdaneč)	2 (Pardubičky)	5	0	-5
2 (Pardubičky)	3 (Lázně Bohdaneč)	7	0	-7
6 (Dukla)	2 (Pardubičky)	18	0	-18
2 (Pardubičky)	6 (Dukla)	1	19	18
Krajský úřad (špička)				
Linka č. x (koordinovaná)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Současná doba čekání	Doba čekání určená optimalizačním	Změna [min]
1 (Slovany)	2 (Pardubičky)	10	2	-8
2 (Pardubičky)	1 (Slovany)	10	0	-10
11 (Dubina)	2 (Pardubičky)	8	3	-5
2 (Pardubičky)	11 (Dubina)	5	2	-3
Celkem:		64	26	-38

Na obrázku č. 18 je znázorněna síťová grafika koordinovaných linek pro variantu 2 a období víkendové přepravní špičky a jsou zde uvedeny časy odjezdů a příjezdů spojů daných linek.



Obr. č. 18: Síťová grafika – varianta 2, víkendová přepravní špička

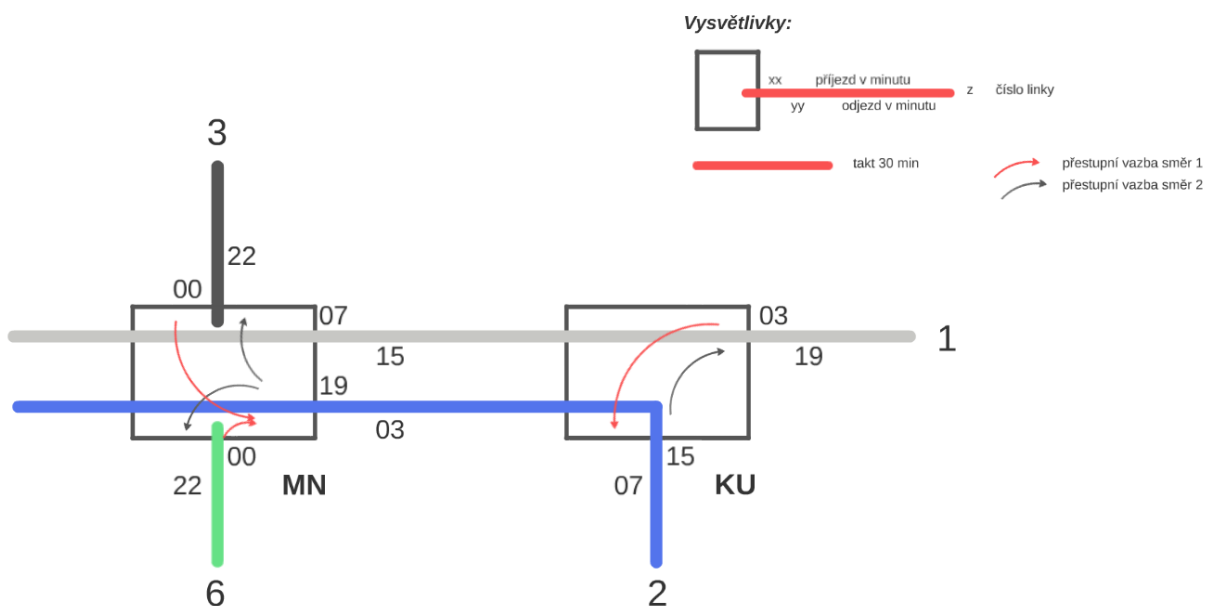
6.3.3. Varianta 3 – odstranění dvou přestupních vazeb

Ve třetí variantě byl ve srovnání s variantou 2 navíc z koordinace odstraněn požadavek na přestupní vazbu mezi spoji linky č. 11 a spoji linky č. 2. Ke koordinaci byly tedy ponechány pouze přestupní vazby mezi spoji linky č. 1, spoji linky č. 2, spoji linky č. 3 a spoji linky č. 6. Doby čekání pro variantu 3 a období víkendového přepravního sedla po ukončení optimalizačního výpočtu jsou uvedeny v tabulce č. 12. Pro tuto variantu a období vychází celková doba čekání nulová.

Tabulka č. 12: Doby čekání – varianta 3, víkendové přepravní sedlo

Masarykovo náměstí (sedlo)				
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Celková doba čekání [min]	Celková doba čekání určená optimalizačním výpočtem [min]	Změna [min]
3 (Lázně Bohdaneč)	2 (Pardubičky)	15	0	-15
2 (Pardubičky)	3 (Lázně Bohdaneč)	17	0	-17
6 (Dukla)	2 (Pardubičky)	13	0	-13
2 (Pardubičky)	6 (Dukla)	13	0	-13
Krajský úřad (sedlo)				
Linka č. x (koordinovaná)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Celková doba čekání [min]	Celková doba čekání určená optimalizačním	Změna [min]
1 (Slovany)	2 (Pardubičky)	0	0	0
2 (Pardubičky)	1 (Slovany)	20	0	-20
Celkem:		78	0	-78

Na obrázku č. 19 je znázorněna síťová grafika koordinovaných linek pro variantu 3 a období víkendové přepravní špičky a jsou zde uvedeny časy odjezdů a příjezdů spojů daných linek.



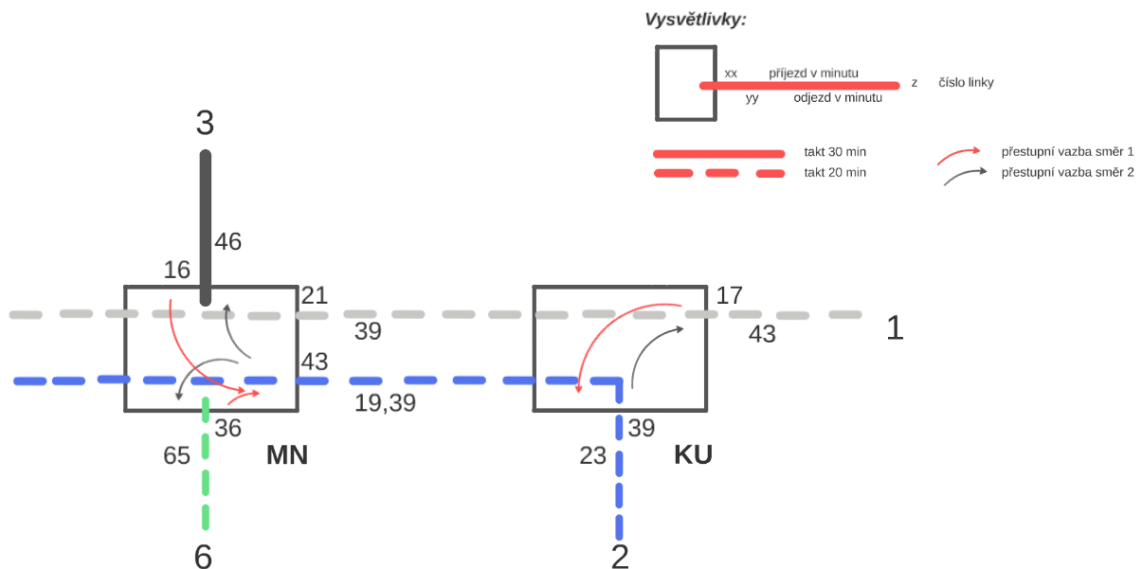
Obr. č. 19: Síťová grafika – varianta 3, víkendové přepravní sedlo

V tabulce č. 13 jsou uvedeny doby čekání pro variantu 3, období víkendové přepravní špičky po ukončení optimalizačního výpočtu. Rozdíl celkových dob čekání v současném stavu a po koordinaci zde opět není tak výrazný jako v období víkendového přepravního sedla. Nejvyšší doba čekání nastává při přestupu z linky č. 2 na linku č. 6 (19 min).

Tabulka č. 13: Doby čekání – varianta 3, víkendová přepravní špička

Masarykovo náměstí (špička)				
Linka č. x (koordinovaná oblast)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Současná doba čekání [min]	Doba čekání určená optimalizačním výpočtem [min]	Změna [min]
3 (Lázně Bohdaneč)	2 (Pardubičky)	5	0	-5
2 (Pardubičky)	3 (Lázně Bohdaneč)	7	0	-7
6 (Dukla)	2 (Pardubičky)	18	0	-18
2 (Pardubičky)	6 (Dukla)	1	19	18
Krajský úřad (špička)				
Linka č. x (koordinovaná)	Linka č. y (koord. oblast) - přestup	Současná doba čekání [min]	Doba čekání určená optimalizačním	Změna [min]
1 (Slovany)	2 (Pardubičky)	10	2	-8
2 (Pardubičky)	1 (Slovany)	10	0	-10
Celkem:		51	21	-30

Na obrázku č. 20 je znázorněna síťová grafika koordinovaných linek pro variantu 3 a období víkendové přepravní špičky a jsou zde uvedeny časy odjezdů a příjezdů spojů daných linek.



Obr. č. 20: Síťová grafika – varianta 3, víkendová přepravní špička

6.3.4. Porovnání jednotlivých variant

V tabulce č. 14 jsou uvedeny ke srovnání současné a dosažené celkové doby čekání jednotlivých variant. Dále je zde uvedena změna celkových dob čekání v minutách a v procentech. V období víkendového přepravního sedla vychází největší změna celkové doby čekání pro variantu 1, což lze vysvětlit vysokými dobami čekání defacto u všech přestupů, které byly po koordinaci významně sníženy. U varianty 2 a 3 je nižší celková současná doba čekání, a proto není změna tak výrazná. Ve srovnání s tím procentuální změna celkové doby čekání po koordinaci proti současné celkové době čekání v období víkendového přepravního sedla je nejvyšší u varianty 3, ve které došlo k snížení celkové doby čekání z původní hodnoty 78 minut na 0 minut, tedy bylo redukováno 100 % celkové doby čekání.

Z hlediska provozovatele není použití varianty 1 výhodné – doba čekání při přestupu ze spojů linky č. 1 na spoje linky č. 3 v obou směrech je rovna 12 minutám a dá se předpokládat, že takto dlouhá doba čekání již nebude pro cestující atraktivní, protože se blíží polovině hodnoty doby taktu 15 min, což je doba, kterou by cestující průměrně čekali na spoj při náhodném příchodu na zastávku. Varianty 2 a 3 se od sebe liší tím, zda je koordinován přestup mezi spoji linek č. 2 a 11. Doba čekání při vykonání tohoto přestupu ve směru 1 jsou 3 minuty, ve směru 2 pak 10 minut. Tvoří tedy dohromady celkovou dobu čekání za toto období u varianty 2 a po odstranění této přestupní vazby v obou směrech ve variantě 3 je celková doba čekání nulová. Zde nastává otázka, která varianta je vhodnější k aplikaci v praxi. Dá se opět očekávat, že doba čekání 10 minut ve druhém směru nebude pro přestupující cestující dostatečně atraktivní, ovšem v prvním směru vychází doba čekání

pouze 3 minuty a při použití varianty 3 a tedy nekoordinování přestupu ze spojů linky č. 2 na spoje linky č. 11 by doba čekání při tomto přestupu s nejvyšší pravděpodobností výrazně narostla. Pokud navíc oblast Pardubiček považujeme za cílovou, tedy vyvolávající poptávku po přepravě, bude pro cestující důležité se tam dostat co nejrychleji a cesta zpět v opačném směru nebude už mít tak velký význam.

V období víkendové přepravní špičky vychází největší změna celkové doby čekání překvapivě pro variantu 2, zřejmě by tedy snížením počtu koordinovaných přestupních vazeb, a tedy počtu omezujících podmínek bylo možno dosáhnout výhodnějšího řešení. Procentuální změna vychází u varianty 2 i varianty 3 stejná – koordinací je redukováno 59 % současné celkové doby čekání. Z hlediska změn dob čekání je tedy nejvýhodnější varianta 2, která přinesla největší snížení celkové doby čekání jak v minutách, tak v procentech. Toto snížení je však ve srovnání se snížením celkové doby čekání v období víkendového přepravního sedla výrazně nižší, což je způsobeno výrazně nižší celkovou dobou čekání v současném stavu, která je v období víkendové přepravní špičky téměř přesně poloviční ve srovnání s víkendovým přepravním sedlem.

Z hlediska provozovatele je v období víkendové přepravní špičky zřejmě nejvýhodnější varianta 2. Při přestupu ze spojů linky č. 1 na spoje linky č. 3 je doba čekání 22 minut a vzhledem k tomu, že byl uplatněn požadavek na vznik přestupní vazby mezi spoji daných dvou linek ke koordinaci pouze doplňkově pro zlepšení spojení východní části města se severní a severozápadní oblastí bez hlubšího cíle, nemá zřejmě za těchto výsledků smysl snažit se koordinaci této přestupní vazby aplikovat v praxi, a tedy varianta 1 není shledána vhodnou k převedení do praxe. U varianty 2 nastává obdobná situace jako u této varianty v období víkendového přepravního sedla – nejvyšší doba čekání zde nastává při přestupu z linky č. 2 na linku č. 6 ve směru 2 (19 min), ovšem dá se očekávat, že bude větší zájem ze strany cestujících o přestup mezi těmito linkami v prvním směru, pro který je doba čekání nulová. Navíc vzhledem k taktu 20 minut obou zmiňovaných linek by se v případě, že se cestující stihne přemístit mezi nástupišti za dvě minuty místo předpokládaných tří minut, mohl stihnout předchozí spoj odjíždějící linky č. 6, a tedy by nemusel čekat vůbec.

Tabulka č. 14: Doby čekání – porovnání variant

sedlo				
Varianta	Současná celková doba čekání [min]	Dosažená celková doba čekání [min]	Změna [min]	Změna [%]
Varianta 1	155	37	-118	-76
Varianta 2	111	13	-98	-88
Varianta 3	78	0	-78	-100
špička				
Varianta	Současná celková doba čekání [min]	Dosažená celková doba čekání [min]	Změna [min]	Změna [%]
Varianta 1	78	48	-30	-38
Varianta 2	64	26	-38	-59
Varianta 3	51	21	-30	-59

7. Závěr

Diplomová 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. Cílem práce bylo prověření možností zlepšení přestupních vazeb mezi spoji linek obsluhujících městskou část Pardubičky, kde se nachází Krajská nemocnice Pardubice a významná průmyslová zóna, s ostatními částmi města.

Úvodní kapitoly diplomové práce se věnují charakteristice linkové sítě městské hromadné dopravy v Pardubicích včetně historických souvislostí jejího vývoje, jejího současného stavu a dále jsou analyzovány přestupní vazby ve vybrané části linkové sítě městské hromadné dopravy v Pardubicích.

Následující kapitoly obsahují obecné představení lineárního modelu prof. Janáčka, který tvoří přímý matematický základ koordinačních modelů navržených na podmínky městské hromadné dopravy v Pardubicích. Práce dále popisuje obecné modely časové koordinace vybraných spojů MHD v Pardubicích v jednotlivých přestupních uzlech a postup jejich propojování do obecného modelu koordinace spojů v obou přestupních uzlech pro jeden a následně i pro oba směry současně.

Další část práce je věnována analýze vstupních dat potřebných pro optimalizační výpočet a způsobu jejich získání. Určité problémy se vyskytly u určování časových rezerv na linkách – vozidlové jízdní řády jsou totiž i v rámci jedné linky poměrně rozdílné a konkrétně u linky č. 2 a linky č. 6 dochází k obrátům vozidel v průběhu dne v různých zastávkách. Došlo tedy k zjednodušení ve formě stanovení pouze dvou konečných zastávek 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.

Byly provedeny výpočetní experimenty pro tři varianty koordinující odlišný počet dvojic spojů a výsledky těchto variant byly mezi sebou porovnány. Z hlediska redukce doby čekání v minutách vychází pro období víkendového přepravního sedla nejlépe výsledky varianty 1 (snížení celkové doby čekání ze 155 minut na 37 minut) a pro období víkendové přepravní špičky výsledky varianty 2 (snížení celkové doby čekání z 64 minut na 26 minut). Z hlediska procentuální změny celkové doby čekání (ale současně s redukcí počtu koordinovaných linek) vychází pro období víkendového přepravního sedla naopak nejlépe výsledky varianty 3 (redukce celkové doby čekání o 100 %) a pro období víkendové přepravní špičky jsou na tom shodně výsledky varianty 2 a varianty 3 (redukce celkové doby čekání o 59 %). Pro potřeby provozovatele MHD se však nejslibněji pro obě období jeví výsledky varianty 2.

Navržený model se ukázal jako funkční a ze vzájemného porovnání dosažených výsledků a současného stavu je zřejmý pozitivní efekt, který lineární programování přineslo. Je tedy možné konstatovat, že metody lineárního programování mají potenciál přispět k řešení problému časové koordinace spojů v přestupních uzlech v reálných podmínkách. Tato práce může posloužit jako inspirace pro vytvoření v současné době neexistujících přestupních vazeb mezi oblastí Pardubičky a vybranými ostatními částmi města.

8. Použitá literatura

- [1] SUROVEC, P: *Technológia hromadnej osobnej dopravy (cestná a mestská doprava)*. Žilinská univerzita v Žilině, 1998. ISBN 80-7100-494-4.
- [2] PARDUBICE.EU: *Geografie*. pardubice.eu [online]. [cit. 2020xPRE07-29]. Dostupné z: <https://www.pardubice.eu/o-pardubicich/informace-o-meste/geografie/>
- [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] ČERNÁ, A; ČERNÝ, J.: *Manažerské rozhodování o dopravních systémech*. Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-849-7.
- [10] JANÁČEK, Jaroslav. *Model časové koordinace v přestupním uzlu*. Dosud nepublikováno
- [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 – období víkendového přepravního sedla*
- Obr. č. 8: *Schéma přestupních vazeb dle současných jízdních řádů – období víkendové přepravní špičky*
- Obr. č. 9: *Schéma slučování spojů z různých směrů*
- Obr. č. 10: *Ukázka postupu transformace časového intervalu pro možný posun spoje*
- Obr. č. 11: *Schéma tří možných situací, které mohou při přestupu nastat*
- Obr. č. 12: *Schéma trasy linky č. 2*
- Obr. č. 13: *Pracovní prostředí software Xpress-IVE s vyznačenými jednotlivými částmi*
- Obr. č. 14: *Okno software Xpress-IVE s výpisem dosažených výsledků*
- Obr. č. 15: *Síťová grafika – varianta 1, víkendové přepravní sedlo*
- Obr. č. 16: *Síťová grafika – varianta 1, víkendová přepravní špička*
- Obr. č. 17: *Síťová grafika – varianta 2, víkendové přepravní sedlo*
- Obr. č. 18: *Síťová grafika – varianta 2, víkendová přepravní špička*
- Obr. č. 19: *Síťová grafika – varianta 3, víkendové přepravní sedlo*
- Obr. č. 20: *Síťová grafika – varianta 3, víkendová přepravní špička*

10. Seznam tabulek

<i>Tabulka č. 1:</i>	<i>Kompletní vedení koordinovaných linek k 28. 4. 2020</i>
<i>Tabulka č. 2:</i>	<i>Celkové doby čekání – současný stav – Masarykovo náměstí</i>
<i>Tabulka č. 3:</i>	<i>Celkové doby čekání – současný stav – Krajský úřad</i>
<i>Tabulka č. 4:</i>	<i>Nejdříve možné časy obsluhy přestupních uzlů</i>
<i>Tabulka č. 5:</i>	<i>Časové rezervy na linkách</i>
<i>Tabulka č. 6:</i>	<i>Přečíslování koordinovaných linek pro potřeby modelu</i>
<i>Tabulka č. 7:</i>	<i>Linkové intervaly koordinovaných linek</i>
<i>Tabulka č. 8:</i>	<i>Doby čekání – varianta 1, víkendové přepravní sedlo</i>
<i>Tabulka č. 9:</i>	<i>Doby čekání – varianta 1, víkendová přepravní špička</i>
<i>Tabulka č. 10:</i>	<i>Doby čekání – varianta 2, víkendové přepravní sedlo</i>
<i>Tabulka č. 11:</i>	<i>Doby čekání – varianta 2, víkendová přepravní špička</i>
<i>Tabulka č. 12:</i>	<i>Doby čekání – varianta 3, víkendové přepravní sedlo</i>
<i>Tabulka č. 13:</i>	<i>Doby čekání – varianta 3, víkendová přepravní špička</i>
<i>Tabulka č. 14:</i>	<i>Doby čekání – porovnání variant</i>